

การปรับปรุงผิวและสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางธรรมชาติดัดแปรโดยใช้ไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต

Improving Surface and Physical Properties of Modified Natural Rubber Sheet by Using Isophorone Diisocyanate

สุวิทย์ ไชยพลบาล

Suwit Chaiponban

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เลขหมู่ TS1892 ส775 2553 ฉ.2
Bib Key 320904
11 มิ.ย. 2553

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงผิวและสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางธรรมชาติดัดแปรโดยใช้ไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต

ผู้เขียน นายสุวิทย์ ไชยพลบาล

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สอาด ริยะจันทร์)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(ดร.วัชนิดา ชินผา)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สอาด ริยะจันทร์)

.....กรรมการ

(ดร.ศิริศาส เอื้อใจ)

.....กรรมการ

(ดร.ชวนพิศ ขาวคง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงผิวและสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางธรรมชาติดัดแปรโดยใช้ไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต
ผู้เขียน	นายสุวิทย์ ไชยพลบาล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

วิธีการใหม่ที่สามารถเพิ่มความเข้ากันระหว่างร่างกายมนุษย์และวัสดุที่ทำจากยางธรรมชาติคือ การดัดแปรผิวยางธรรมชาติด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต เพื่อประยุกต์ใช้งานการใช้งานทางด้านการแพทย์ วัตถุประสงค์ของงานนี้คือศึกษาการดัดแปรผิวทางเคมีของแผ่นยางธรรมชาติดัดแปร จากยางธรรมชาติ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กรดอะคริลิค และกรดมาลีอิค ด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ขอบเขตของงานในครั้งนี้ประกอบด้วย 5 ส่วนคือ 1) พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 2) พอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 3) แผ่นยางธรรมชาติและแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค 4) การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม แผ่นยางธรรมชาติกราฟต์กรดอะคริลิค และแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิค ด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต 5) การปรับปรุงแผ่นพอลิเมอร์ผสม แผ่นยางธรรมชาติกราฟต์กรดอะคริลิค และแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิค ด้วยพรีพอลิยูรีเทน ในส่วนแรกพอลิเมอร์ผสมเตรียมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และส่วนที่ 2 คือ พอลิเมอร์ผสมเตรียมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมโยง ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสม ปริมาณกลีเซอรอล ชนิดพอลิเมอร์ และปริมาณกรดมาลีอิคต่ออัตราส่วนการบวมตัว ความทนทานต่อตัวทำละลาย และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความทนทานต่อตัวทำละลาย น้ำ และโทลูอีนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้น การศึกษาอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี และ CP/MAS ^{13}C NMR เป็นการยืนยันการเกิดขึ้นของพันธะเอสเทอร์และอีเทอร์ ที่ตำแหน่ง 1566 cm^{-1} และ 85 ppm ตามลำดับ เป็นการเชื่อมโยงของกรดมาลีอิคกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้จากเทคนิค SEM และ AFM พบว่ามีลักษณะเป็นการผสมที่เข้ากันได้บางส่วน สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้มีค่าสูงกว่ายาง

ธรรมชาติกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีความเป็นขั้วมากกว่ายางธรรมชาติ สภาวะของพอลิเมอร์ผสมที่ดีที่สุดคือพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ที่อัตราส่วน 60/40 โดยใช้กรดมาลีอิค 40% และกลีเซอรอล 10% โดยน้ำหนัก ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงถึง 48 MPa นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมสามารถย่อยสลายได้เองทางชีวภาพเมื่อใช้ปริมาณกรดมาลีอิคน้อย ในส่วนที่ 3 เป็นการดัดแปรแผ่นยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ โดยใช้กรดอะคริลิคและเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ทำภายใต้สภาวะรังสียูวี ทำให้ได้แผ่นยางธรรมชาติกราฟต์กรดอะคริลิค และแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค ประสบผลสำเร็จในการเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์กรดอะคริลิค และแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิคยืนยันโดยเทคนิค ATR-FTIR และ SEM และผลที่ชัดเจนเห็นได้จากการลดลงของค่ามุมสัมผัสของแผ่นยางธรรมชาติ และแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์หลังจากกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค ส่วนที่ 4 เกี่ยวข้องกับการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม แผ่นยางธรรมชาติกราฟต์กรดอะคริลิค และแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิค ด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต พบว่าสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อการบวมตัว ของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนทำการดัดแปร ซึ่งจากการสังเกตหมู่ NCO ของตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตโดยเทคนิค ATR-FTIR แสดงสเปคตรัมที่ 2271 cm^{-1} ความต้านทานต่อแรงดึงของตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตมีค่าสูงที่สุดในพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ปริมาณกรดมาลีอิค 40% ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต สำหรับส่วนสุดท้ายตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตเคลือบด้วยพรีพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากบิวเทน ไดออล และไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตที่อุณหภูมิห้อง สภาวะที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเคลือบด้วยพรีพอลิยูรีเทน คือที่อัตราส่วนระหว่างบิวเทน ไดออล และไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตเท่ากับ 2:1 วัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าตัวอย่างหลังจากเคลือบด้วยพรีพอลิยูรีเทนมีสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อน้ำและโทลูอีน รวมทั้งสภาวะอากาศที่ดี ตัวอย่างที่ได้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ คือ *Stapphylococus aureus Escherichia coli* และ *Acinnetobacter baumannii* ได้ มีความเป็นไปได้ในการนำวัสดุที่เตรียมได้สำหรับงานวิจัยนี้มาทำเป็นผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

Thesis Title	Improving surface and physical properties of modified natural rubber sheet by using isophorone diisocyanate
Author	Mr.Suwit Chaiponban
Major Program	Polymer Science and Technology
Academic Year	2009

Abstract

One novel approach to enhance biocompatible human material of natural rubber (NR) is the surface chemical modification of NR with isophorone diisocyanate for application in medical field. The aim of this work is to study the surface chemical modification of modified NR sheet obtained from NR, PVA, acrylic acid (ACC) and maleic acid by isophorone diisocyanate. The scopes of the present work consist of five parts including 1) polymer blend of NR and PVA 2) polymer blend of epoxidized natural rubber (ENR) and PVA 3) NR and ENR sheet grafted with acrylic acid to get NR-g-ACC and ENR-g-ACC 4) chemical modification of polymer blend and NR-g-ACC and ENR-g-ACC with isophorone diisocyanate and 5) surface chemical treatment of the modified polymer blend and the modified NR-g-ACC and ENR-g-ACC with prepolyurethane. In the first part, the polymer blend was prepared from NR and PVA and the second part is focused on the polymer blend derived from ENR and PVA by maleic acid as a crosslinker. The influence of polymer blend ratio, glycerol contents, polymer type and maleic acid contents on the swelling ratio, solvent resistance, and mechanical properties of the resulting polymer blend was investigated. Results showed that the swelling resistances of NR/PVA blend and ENR/PVA blend in water and toluene increased as a function of maleic acid. ATR-FTIR and CP/MAS ^{13}C NMR study indicated the presence of an ester linkage and ether linkage at 1566 cm^{-1} and 85 ppm, respectively in maleic acid crosslinked with PVA. The morphology of the NR/PVA and ENR/PVA exhibits the partially miscible blend observed from SEM and AFM. The mechanical properties and the adhesion force of ENR/PVA blend were higher than that of NR/PVA blend due to the more polarity of ENR comparing to NR. The best condition of polymer blend, giving 48 MPa of tensile strength was 60/40 ENR/PVA blend and 40% maleic acid and 10 %w/w of glycerol. In addition, the biodegradable behavior of sample in the presence of low amount of maleic acid was good in soil. In the third part, the surface of NR and ENR sheet modified with ACC and benzoyl peroxide as an

initiator under UV irradiation to get NR-g-ACC and ENR-g-ACC sheet. The successfully preparing ENR-g-ACC and NR-g-ACC was confirmed from ATR-FTIR and SEM evidence. It is clear that the contact angle of NR and ENR sheet decreased after ACC grafting modification. The fourth part is concerning about chemical treatment of the polymer blend and NR-g-ACC and ENR-g-ACC with isophorone diisocyanate. It was found that the mechanical properties and the swelling resistance of the modified polymer was significantly increased comparing to unmodified sample. In addition, the NCO group of the modified sample with isophorone diisocyanate was observed at 2271 cm^{-1} by ATR-FTIR. The highest tensile strength of the modified sample was found in 60/40 ENR/PVA blend containing 40% maleic acid and modified isophorone diisocynate. In the final part, the sample modified isophorone diisocynate was coated with prepolyurethane from butanediol and isophorone at ambient temperature. The optimum condition of modified sample with prepolyurethane was ratio of 2:1 butanediol and isophorone diisocynate and 24 h of cure reaction time at 80 ^{o}C. Results showed that the properties of sample coated with prepolymer urethane exhibited the good mechanical properties and water and toluene resistance as well as environment resistance. The antibacterial application of the resulting sample was estimated and results showed that the sample could restrain the types of bacteria namely *Stapphylococus aureus Escherichia coli* and *Acinnetobacter baumannii.* The possible application of this work would be expected in medical material product.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สอาด ริยะจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่กรุณาแนะนำแนวทางในการทำวิจัย รวมทั้งให้คำปรึกษาที่ดีโดยตลอดมา ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.วัชนิดา ชินผา ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง ดร.ศิริศาส เอื้อใจ และดร.ชวนพิศ ขาวคง ที่รับเป็นกรรมการสอบและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. จิราภรณ์ ไชยบัญดิษฐ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สารไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในการศึกษาขั้นพื้นฐาน ขอบคุณนายณฐพนธ์ ภูผิวแก้วในการช่วยทดสอบตัวอย่างการวัดมุมสัมผัสและการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR ขอบคุณ นายณัฐพล อุทัยพันธ์ และนายวิสุทธิ์ แก้วสกุล สำหรับความช่วยเหลือในการทดสอบวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนอุดหนุนการทำวิจัยเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อสมพงศ์ และ คุณแม่ทัศนาพร ไชยพลบาลรวมทั้งญาติๆ ทุกคนในครอบครัวที่ให้ทั้งกำลังใจที่ดีและกำลังทรัพย์สนับสนุนการศึกษา ขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจและผู้ร่วมงานทุกคนตลอดจนเจ้าหน้าที่สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ให้ความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา และขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ตั้งแต่เริ่มเรียนรู้จนถึงปัจจุบันนี้

สุวิทย์ ไชยพลบาล

สารบัญ

		หน้า
สารบัญ		(8)
รายการตาราง		(13)
รายการรูป		(16)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ		(32)
บทที่		
1.	บทนำ	1
	1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
	1.2 วัตถุประสงค์	4
	1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2.	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
	2.1 ยางธรรมชาติ	6
	2.1.1 สมบัติเด่นของยางธรรมชาติ	7
	2.1.2 สมบัติด้อยของยางธรรมชาติ	7
	2.2 การดัดแปรยางธรรมชาติ	8
	2.2.1 การดัดแปรยางธรรมชาติโดยการดัดแปรโครงสร้าง	8
	2.2.1.1 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์	9
	2.2.1.2 การวิเคราะห์สมบัติยางธรรมชาติอิพอกไซด์	11
	2.2.2 การดัดแปรยางธรรมชาติโดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น	14
	2.2.3 ร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้	15
	2.2.3.1การแบ่งประเภทของ Interpenetrating networks	18
	2.2.3.2 คุณสมบัติและประโยชน์ของ IPN	19
	2.2.4 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	19
	2.3 การเกิดฟิล์มของพอลิเมอร์คอลลอยด์	21
	2.3.1 ลักษณะการเกิดฟิล์มของพอลิเมอร์คอลลอยด์	21
	2.3.2 กลไกการเกิดฟิล์มของพอลิเมอร์คอลลอยด์	22
	2.3.3 วิธีการที่พอลิเมอร์คอลลอยด์แห้ง	24
	2.3.4 อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์ม	27
	2.3.5 ทฤษฎีการเกิดฟิล์มจากพอลิเมอร์คอลลอยด์	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การปรับปรุงผิวพอลิเมอร์	30
2.4.1 วิธีในการปรับปรุงผิวพอลิเมอร์	31
2.4.1.1 Flame treatment	31
2.4.1.2 Metal deposition	31
2.4.1.3 Chemical treatment	32
2.4.1.4 Corona discharge	32
2.4.1.5 Irradiation	34
2.4.1.6 Graft copolymerization	34
2.4.2 พอลิยูรีเทน	35
2.5 การวิเคราะห์พื้นผิวของพอลิเมอร์	36
2.5.1 Contact Angle Measurement	37
2.5.2 Attenuated Total Reflectance Infrared Spectroscopy	37
2.5.3 Scanning Electron Microscopy	38
2.5.4 Atomic Force Microscopy	39
2.5.5 X-ray Photoelectron Spectroscopy	40
2.6 การตรวจสอบเอกสาร	40
2.7 ความใหม่ของงานวิจัยในครั้งนี้	49
3. วิธีการวิจัย	50
3.1 สารเคมี	50
3.2 อุปกรณ์	55
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	57
3.4 วิธีดำเนินการทดลอง	64
3.4.1 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์	64
3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม	65
3.4.3 การกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยางธรรมชาติ	66
3.4.4 การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	68
3.4.5 การเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วยพรีพอลิยูรีเทน	70
3.4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	70

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	3.4.7 สมบัติด้านการบ่มเร่ง	72
	3.4.8 การทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย	72
	3.4.9 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริก	73
	3.4.10 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์	74
	3.4.11 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยรังสีอินฟราเรดโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์	74
	3.4.12 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี	74
	3.4.13 การวัดมุมสัมผัส	74
	3.4.14 การวัดความเสียดทานของพื้นผิว	75
	3.4.15 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ	76
	3.4.16 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน	77
	3.4.17 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์	77
	3.4.18 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	78
	3.4.19 การทดสอบความต้านทานการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย	78
	3.5 บทสรุปของงานวิจัย	79
4.	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	80
	4.1 ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์	80
	4.1.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม	80
	4.1.2 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม	88
	4.1.3 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย	91
	4.1.4 ศึกษาการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	102
	4.1.5 ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	105
	4.1.6 ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	112
	4.1.7 การวัดมุมสัมผัส	115
	4.1.8 การวัดความเสียดทานของพื้นผิว	116
	4.1.9 ศึกษาการทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม	117
	4.1.10 สรุปผลการทดลองตอนที่ 1	120

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์	121
4.2.1 ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสม	121
4.2.2 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม	124
4.2.3 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย	133
4.2.4 ศึกษาการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	146
4.2.5 ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	148
4.2.6 ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	156
4.2.7 การวัดมุมสัมผัส	162
4.2.8 การวัดความเสียดทานของพื้นผิว	164
4.2.9 ศึกษาการทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม	165
4.2.10 สรุปผลการทดลองตอนที่ 2	167
4.3 ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิคและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค	169
4.3.1 ศึกษาการเตรียมการกราฟต์	169
4.3.2 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม	170
4.3.3 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย	172
4.3.4 ศึกษาการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	174
4.3.5 ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	176
4.3.6 ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	180
4.3.7 การวัดมุมสัมผัส	182
4.3.8 สรุปผลการทดลองตอนที่ 3	183
4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นพอลิเมอร์ผสม	185
4.4.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม	185
4.4.2 ความต้านทานต่อตัวทำละลาย	187
4.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม	193
4.4.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	200
4.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	205
4.4.6 การวัดมุมสัมผัส	209

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.7 การทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม	211
4.4.8 สรุปผลการทดลองตอนที่ 4	213
4.5 การดัดแปรแผ่นยางผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	216
4.5.1 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์	216
4.5.2 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์	231
4.5.3 ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค	245
4.5.4 สรุปผลการทดลองตอนที่ 5	255
4.6 ศึกษาการเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วยพอลียูเทน	257
4.6.1 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์	257
4.6.2 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์	269
4.6.3 ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค	281
4.6.4 การทดสอบความต้านทานการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย	288
4.6.5 สรุปผลการทดลองตอนที่ 6	290
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	292
5.1 ศึกษาการเตรียมและ สมบัติของพอลิเมอร์ผสมจาก NR/PVA และพอลิเมอร์ผสมจาก ENR/PVA	292
5.2 การศึกษาการเตรียมยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	294
5.3 การดัดแปรแผ่นยางผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	296
5.4 การเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วยพอลียูรีเทน	297
5.5 ข้อเสนอแนะ	299
บรรณานุกรม	300
ภาคผนวก	306
ก.	307
ข.	313
ประวัติผู้เขียน	352

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติโดยทั่วไปทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของ PVA	20
3.1 สมบัติของเทอริค 16 เอ	51
3.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	53
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์	64
3.4 อัตราส่วนต่างๆที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม	65
3.5 ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม	66
4.1 สเปคตรัมอินฟราเรดของ PVA และ PVA-M	90
4.2 ค่าความสามารถในการละลาย (solubility parameter) ของตัวทำละลายต่างๆ	96
4.3 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ	112
4.4 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 NR และPVA M40	116
4.5 ตำแหน่งเลขคลื่นของพีคสเปคตรัมอินฟราเรดหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติอิพอกไซด์	125
4.6 ผลของการแปรเวลาของการทำปฏิกิริยาต่อ Absorbance ratio และปริมาณหมู่อิพอกไซด์	126
4.7 ค่าสัญญาณ ^{13}C-NMR ของ PVA ENR และกรดมาลีอิก	132
4.8 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ	155
4.9 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 ENR และPVA M40	163
4.10 ความเสียดทานของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ENR และPVA ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	164
4.11 ผลการทดสอบโอโซน รอยแตกที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า จำนวนรอยแตกต่อพื้นที่ และความยาวเฉลี่ยของรอยแตก	166
4.12 ลักษณะสเปคตราที่สำคัญ ของแผ่นยาง NR และ ENR หลังจากการให้แสงยูวี	172
4.13 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของ NR-g-ACC และENR-g-ACC	180
4.14 เปรียบเทียบมุมสัมผัส NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	183
4.15 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ	204

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.16 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% PVA ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	210
4.17 ผลการทดสอบโอโซน รอยแตกที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า จำนวนรอยแตกต่อพื้นที่และความยาวเฉลี่ยของรอยแตก	213
4.18 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตก่อนและหลังวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	218
4.19 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA M40 จากเครื่องAFM	228
4.20 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	230
4.21 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตก่อนและหลังวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	233
4.22 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ขนาด 1 cm^2 และ 4 cm^2 ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% เปรียบเทียบกับแผ่นยาง ENR	233
4.23 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA M40 จากเครื่อง AFM	242
4.24 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	244
4.25 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆ	246
4.26 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆ	247
4.27 สมบัติเชิงกลของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนต เปรียบเทียบกับแผ่นยาง NR และ ENR	250
4.28 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนต จากเครื่อง AFM	254
4.29 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	254

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.30 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของแผ่น NCO-NR/PVA-PU M40 จากเครื่องAFM	266
4.31 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M40 จากเครื่อง AFM	276
4.32 การบวมตัวในน้ำของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU	284
4.33 สมบัติเชิงกลแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU	285
4.34 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของแผ่นยาง NCO-ENR-g-ACC และ NCO-NR-g-ACC จากเครื่อง AFM	287
4.35 ความกว้างของ Clear zone ที่เป็นขอบเขตในการยับยั้งจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ไม่ให้เจริญเติบโตบนแผ่นทดสอบชนิดต่างๆ	289
4.36 ความสามารถในการยึดติดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (1 mm^2) ของ *Stapphylococus aureus Escherichia coli* และ *Acinnetobacter baumannii* บนแผ่นทดสอบชนิดต่างๆ	289

ภาคผนวก

ก.1 ความเข้มข้นของสารเคมีต่างๆ	307
ก.2 น้ำหนักของแผ่น NR/PVA M40 และ ENR/PVA M40 ก่อนและหลังต้มในน้ำร้อน	309
ก.3 ค่า ABS ที่ความเข้มข้นของกรดมาลีอิคต่างๆ	310
ก.4 ปริมาณกรดมาลีอิคที่ละลายจากการตรวจสอบด้วยเครื่องยูวี	310
ก.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40 และ 50 %	311

รายการรูป

รูป	หน้า
1.1 ผลิตภัณฑ์กีพาจากยางธรรมชาติ	2
2.1 สูตรโครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติ	6
2.2 ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันโดยใช้กรดเปอร์ฟอร์มิคและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	10
2.3 ปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอิพอกไซด์	10
2.4 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์โดยใช้กรดเปอร์ฟอร์มิค	11
2.5 การบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน	14
2.6 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ผสมแบบต่างๆ	16
2.7 แสดงปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์แบบสอดไขว้	17
2.8 โครงสร้างร่างแหพอลิเมอร์แบบกึ่งสอดไขว้	17
2.9 แผนภาพจำลองของ (a) full IPN และ (b) semi-IPN	18
2.10 แสดงสูตรโครงสร้างของ PVA โดย A คือ partially hydrolyzed และ B คือ fully hydrolyzed	21
2.11 กระบวนการที่อนุภาคพอลิเมอร์คอลลอยด์เปลี่ยนรูปเป็นแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์	23
2.12 ลักษณะการแห้งของพอลิเมอร์คอลลอยด์บนวัสดุรองรับที่ไม่มีรูพรุน	26
2.13 การปรับปรุงผิวด้วยกรดซัลฟูริค a) poly(sulfone) b)poly(ether ketone)	32
2.14 แผนภาพแสดงการปรับปรุงผิวโดยใช้โคโรน่า	33
2.15 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของพอลิเมอร์จากการปรับปรุงผิวด้วย corona discharge	33
2.16 การกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่นโดยทั่วไป	35
2.17 โครงสร้างทางเคมีของพอลียูรีเทน	35
2.18 ระดับความลึกของการวิเคราะห์จากเทคนิคต่างๆ	36
2.19 การรวมกันระหว่าง ของแข็ง/ของเหลว/ก๊าซ ของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์	37
2.20 ลักษณะการทำงานของ ATR-FTIR	38
2.21 เค้าโครงและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราด	39
2.22 ลักษณะการทดสอบโดย AFM	40
3.1 โครงสร้างโมเลกุลของเตตระไฮโดรฟูราน	52
3.2 โครงสร้างโมเลกุลของกรดมาลีอิค	52
3.3 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	53
3.4 โครงสร้างโมเลกุลของกรดอะคริลิค	53

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.5 โครงสร้างโมเลกุลของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	54
3.6 โครงสร้างโมเลกุลของไดเมทิลฟอร์มาไมด์	54
3.7 โครงสร้างโมเลกุลของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์	54
3.8 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์	55
3.9 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม	56
3.10 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ก. ลักษณะภายนอก ข. ลักษณะภายใน	56
3.11 เครื่องตัดชิ้นทดสอบความทนทานต่อแรงดึง	57
3.12 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดึง	57
3.13 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	58
3.14 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)	59
3.15 Thermo gravimetric Analyzer	59
3.16 Dynamic Mechanical Thermal Analyzer	60
3.17 Differential Scanning Calorimeter และ Differential Thermal Analyzer	60
3.18 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	61
3.19 ตู้อบสุญญากาศ	61
3.20 ตู้อบความร้อน	62
3.21 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน	63
3.22 ภาพแสดงเครื่องมือการวัดมุมสัมผัสเชิงฟิสิกส์	63
3.23 เครื่องวัดความเสียดทานของพื้นผิว	64
3.24 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมพอลีไวนิลแอลกอฮอล์	66
3.25 อุปกรณ์สำหรับแช่แผ่นฟิล์มในกรดอะคริลิคโมโนเมอร์	68
3.26 ชุดอุปกรณ์สำหรับให้รังสียูวี	67
3.27 การดัดแปรพอลิเมอร์ผสมด้วยไดไอโซไซยาเนตวิธีที่ 1	68
3.28 การดัดแปรพอลิเมอร์ผสมด้วยไดไอโซไซยาเนตวิธีที่ 2	69
3.29 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มจากการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมด้วยไดไอโซไซยาเนตวิธีที่ 2	70
3.30 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (Die C) สำหรับการทดสอบความทนต่อแรงดึง	71
3.31 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบดูการละลายของพอลิเมอร์ผสม	73
3.32 ภาพแสดงลักษณะตัวอย่างขณะทำการวิเคราะห์มุมสัมผัส	75
3.33 ภาพแสดงลักษณะของแรงเสียดทาน	75

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.34 ภาพลักษณะการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ	77
3.35 แผนภาพบทสรุปงานวิจัยทั้งหมด	79
4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 80/20 70/30 60/40 และ 50/50 เปรียบเทียบกับ NR	81
4.2 ลักษณะการเกิดโครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA	82
4.3 ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆคือ 80/20 70/30 60/40 และ 50/50 เปรียบเทียบกับ NR	82
4.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 เมื่อปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 10 20 30 40 50 และ 60%	83
4.5 ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 เมื่อปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 10 20 30 40 50 และ 60%	84
4.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 40 เมื่ออุณหภูมิในการวัลคาไนซ์เป็น 0 100 120 140 และ160 °C	85
4.7 ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 40 เมื่อระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เป็น 0 100 120 140 และ160 °C	86
4.8 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 40 เมื่ออุณหภูมิในการวัลคาไนซ์เป็น 120 ° C ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เป็น 1/3 2/3 1 3 5 9 12 และ24 ชั่วโมง	87
4.9 ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 40 เมื่ออุณหภูมิในการวัลคาไนซ์เป็น 120 ° C ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เป็น 1/3 2/3 1 3 5 9 12 และ24 ชั่วโมง	87
4.10 สเปคตราอิฟราเรดของแผ่นฟิล์ม PVA โดยที่ I คือ PVA บริสุทธิ์ II คือ PVA ที่ทรีทด้วยความร้อน III คือ PVA ที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิค	88
4.11 ปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค	89
4.12 สเปคตราอินฟราเรดของยางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA โดยใช้กรดมาลีอิค ปริมาณ 0 40 และ 50 เปรียบเทียบ NR และ PVA บริสุทธิ์	90
4.13 ผลของ XRD pattern ที่ มุม 2-Theta ของ NR/PVA M0 และ M50 และยาง NR	91
4.14 การบวมตัวในน้ำของ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 % ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	92

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.15 ความสามารถในการละลายน้ำของ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 % ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	93
4.16 การบวมตัวในโทลูอีนของ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 % ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	94
4.17 ลักษณะการเกิดโครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA	94
4.18 ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 % ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	95
4.19 การบวมของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ในอะซิโตน	96
4.20 การบวมตัวของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ในตัวทำละลายต่างๆ คือ เตตระไฮโดรฟูราน คลอโรฟอร์ม โทลูอีน และไซโคลเฮกเซน เป็นเวลา 5 วัน	96
4.21 ค่าการดูดซับน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนวัลคาไนซ์	97
4.22 ค่าการดูดซับน้ำที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังวัลคาไนซ์-	98
4.23 ค่าการดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนวัลคาไนซ์	98
4.24 ค่าการดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังวัลคาไนซ์	99
4.25 ค่าการคายออกของน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนวัลคาไนซ์	100
4.26 ค่าการคายออกของน้ำที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังวัลคาไนซ์	100
4.27 ค่าการคายออกของโทลูอีนที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนวัลคาไนซ์	101
4.28 ค่าการคายออกของโทลูอีนที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังวัลคาไนซ์	101
4.29 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง	102
4.30 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง	103
4.31 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง	104
4.32 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง	105

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.33 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) M0 B) M10 C) M30 วัลคาไนซ์ที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า	106
4.34 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) M0 B) M20 และ C) M40 ก่อนวัลคาไนซ์ หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน ที่กำลังขยาย 200 เท่า	107
4.35 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) NR/PVA M0 (edge, before swelling) B) NR/PVA M0 (edge, after swelling) C) NR/PVA M40 (edge, before swelling) D) NR/PVA M40 (edge, after swelling) จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	108
4.36 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) NR/PVA M0 (middle, before swelling) B)NR/PVA M0 (middle, after swelling) C)NR/PVA M40 (middle, before swelling) D) NR/PVA M40 (middle, after swelling) จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	109
4.37 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) NR/PVA M0 (edge, before swelling) B) NR/PVAM0 (edge, after swelling) C) NR/PVAM40 (edge, before swelling) D) NR/PVA M40 (edge, after swelling) จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	110
4.38 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) NR/PVA M0 (middle, before swelling) B)NR/PVAM0 (middle, after swelling) C)NR/PVAM40 (middle, before swelling) D) NR/PVA M40 (middle, after swelling) จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	111
4.39 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 80/20 และ 60/40	113
4.40 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 10 และ 20	113
4.41 Tan δ กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 10 และ20 และ PVA	114
4.42 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M20 และ M40 เปรียบเทียบกับ NR	115

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.43 เปรียบเทียบมุมสัมผัส NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 NR และ PVA M40	116
4.44 เปรียบเทียบความเสียดทานของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 NR และPVA หลังวัลคาไนซ์	117
4.45 ลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบโอโซน	118
4.46 สเปคตราของ NR/PVA M0 และ NR/PVA M40 หลังการทดสอบโอโซน	119
4.47 ภาพปฏิกิริยาแสดงปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางธรรมชาติและโอโซน	119
4.48 การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60 และยางธรรมชาติอิพอกไซด์	122
4.49 ปฏิกิริยาระหว่างพอลีไวนิล แอลกอฮอล์กับกรดมาลีอิค	122
4.50 ลักษณะการเกิดโครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA	123
4.51 การบวมตัวในโทลูอีนของ ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ตั้งแต่ 0-60 นาที	123
4.52 สเปคตราอิฟราเรดของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอิพอกไซด์	124
4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างหมู่อิพอกซิเดชันกับเวลาการทำปฏิกิริยา	127
4.54 ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันโดยใช้กรดฟอร์มิคและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	127
4.55 สเปคตรัมอินฟราเรดของ ENR/PVA M 40 ก่อนและหลังการทดสอบบวมตัวในน้ำ	128
4.56 ผล XRD pattern ของ ENR/P VA M0 และ M40 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ และ PVA	129
4.57 สเปคตรา ^{13}C NMR ของ a)PVA b)ENR/PVA M0 และ c)ENR/PVA M40	131
4.58 การบวมตัวในน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60 % และยาง ENR ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	134
4.59 ความสามารถในการละลายน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60 % และยาง ENR ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	134
4.60 การบวมตัวในน้ำของ ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ 0-60 นาที และยางธรรมชาติอิพอกไซด์	135
4.61 ความสามารถในการการละลายน้ำของ ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ 0-60 นาที และยางธรรมชาติอิพอกไซด์	136
4.62 การบวมตัวในโทลูอีนของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60 % และยาง ENR ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	137

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.63 ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60 % และยาง ENR ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	137
4.64 การบวมตัวในโทลูอีนของ ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ 0-60 นาที และยางธรรมชาติอิพอกไซด์	138
4.65 ความสามารถในการละลายโทลูอีนของ ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ 0-60 นาที และยาง ENR	138
4.66 การดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม Uncured ENR/PVA	139
4.67 การคายออกโทลูอีนที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม Uncured ENR/PVA	140
4.68 การดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA	140
4.69 การคายออกโทลูอีนที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA	141
4.70 การดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA ที่ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ต่างๆ	141
4.71 การคายออกโทลูอีนที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA ที่ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ต่างๆ	142
4.72 การดูดซับน้ำที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม Uncured ENR/PVA	143
4.73 การคายออกน้ำที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม Uncured ENR/PVA	143
4.74 การดูดซับน้ำที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA	144
4.75 การคายออกน้ำที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA	144
4.76 การดูดซับน้ำที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA ที่ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ต่างๆ	145
4.77 การคายออกน้ำที่ระยะเวลาการต่างๆของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA ที่ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ต่างๆ	145
4.78 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆ ก่อนและหลังการวัลคาไนซ์	146
4.79 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆก่อนและหลังการวัลคาไนซ์	147
4.80 ค่าความสามารถในการยืด (%)ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆก่อนและหลังการวัลคาไนซ์	148

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.81 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของ ENR/PVA A) M0 B) M20 C) M40 วัลคาไนซ์ที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	149
4.82 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของ ENR/PVA A) M0 B) M20 C) M40 วัลคาไนซ์ที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที หลังทดสอบการบวมตัวในน้ำ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	150
4.83 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของ ENR/PVA A) M0 B) M20 C) M40 วัลคาไนซ์ที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	150
4.84 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA M0 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	151
4.85 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA M0 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	152
4.86 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	153
4.87 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	154
4.88 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จากเทคนิค TEM	156
4.89 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40 และ PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40	158
4.90 Derivative weight กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40 และ PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40	159
4.91 Tan δ กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 NR และ PVA	160
4.92 มอดุลัสสะสมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 NR และ PVA	160
4.93 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC	161
4.94 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M20 และ M40 เปรียบเทียบกับ ENR	162
4.95 เปรียบเทียบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 ENR และ PVA M40	163

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.96 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40 และ ENR	163
4.97 เปรียบเทียบความเสียดทานของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ENR และPVA ก่อนและหลังวัลคาไนซ์	165
4.98 ลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบโอโซน	165
4.99 ปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับโอโซน	166
4.100 สเปคตราอินฟราเรดของ ENR/PVA M 0 และ40 หลังการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน	167
4.101 แบบจำลองปฏิกิริยาที่เกิดการกราฟต์บนแผ่นยางด้วยกรดอะคริลิค	169
4.102 ปฏิกิริยาระหว่างอะคริลิคกับยางธรรมชาติ	170
4.103 เปรียบเทียบสเปคตราของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	171
4.104 เปรียบเทียบสเปคตราของ ENR-g-ACC bottom ENR-g-ACC top และ ENR	171
4.105 การบวมตัวในน้ำของ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้รังสียูวีต่างๆ	173
4.106 ความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิคที่ระยะเวลาการให้รังสียูวีต่างๆ	173
4.107 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของ NR และ ENR ก่อนและหลังการให้แสงยูวี	174
4.108 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของ NR และ ENR ก่อนและหลังการให้แสงยูวี	175
4.109 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของ NR และ ENR ก่อนและหลังการให้แสงยูวี	176
4.110 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของ NR-g-ACC ที่ระยะการให้แสงยูวีต่างๆ A) 0 B) 30 และC) 60 นาที และ ENR-g-ACC C) 0 D) 30 และE) 60 นาที	177
4.111 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง	178
4.112 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง	179
4.113 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีต่างๆ	181
4.114 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของ NR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีต่างๆ	182

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.115 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีต่างๆ	182
4.116 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัสของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	183
4.117 เปรียบเทียบสเปคตราของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์	185
4.118 เปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA	186
4.119 ผล XRD pattern ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA	187
4.120 การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 %	188
4.121 ความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 – 40 %	189
4.122 การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 %	189
4.123 ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 %	190
4.124 การดูดซับของน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA	191
4.125 การคายออกของน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA	191
4.126 การดูดซับของโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA	192
4.127 การคายออกของโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA	193
4.128 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40%	194
4.129 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	194
4.130 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40%	195
4.131 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	196
4.132 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40%	196
4.133 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	197
4.134 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% โดยเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 %	298

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.135 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% โดยการเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 %	299
4.136 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% โดยการเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 %	299
4.137 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA A) M0 B) M20 C) M40 วัลคาไนซ์ที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	201
4.138 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M0 จากเครื่อง AFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	202
4.139 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M0 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	203
4.140 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	203
4.141 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ	204
4.142 สมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริกของพอลิเมอร์ผสม NR/PVAและ ENR/PVA	206
4.143 สมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริกของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	206
4.144 Tan δ กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA NR และ PVA	207
4.145 มอดุลัสสะสมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA NR และ PVA	208
4.146 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เปรียบเทียบกับ ENR	209
4.147 เปรียบเทียบมุมสัมผัส ของพอลิเมอร์ผสมNR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% PVA NR ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	210
4.148 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัส ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% NR ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC	211
4.149 ลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบโอโซน	212

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.150 ลักษณะการเกิดโครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA	216
4.151 แสดงแผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่นพอลิเมอร์ผสม	216
4.152 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต โดยใช้วิธีที่ 1	217
4.153 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต โดยใช้วิธีที่ 2	218
4.154 สเปคตราอิฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆก่อน และหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	219
4.155 การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	220
4.156 ความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	220
4.157 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA	221
4.158 การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	221
4.159 ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณ กรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	222
4.160 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต	223
4.161 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต	224
4.162 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต	225
4.163 ค่าความสามารถในการยืด ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต	226
4.164 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต หลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ A) M20 และ B) M40	227

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.165 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน A) M0 B) M20 และ C) M40	227
4.166 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height	228
4.167 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	229
4.168 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	230
4.169 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	231
4.170 แผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่นพอลิเมอร์ผสม	231
4.171 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยใช้วิธีที่ 2	232
4.172 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ขนาด 1 cm^2 และ 4 cm^2 ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% เปรียบเทียบกับแผ่นยาง ENR	234
4.173 สเปคตราอินฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ก่อนและหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	235
4.174 การบวมตัวในน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	236
4.175 ความสามารถในการละลายน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	236
4.176 การบวมตัวในโทลูอีนของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	237
4.177 ความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	237
4.178 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	238

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.179 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	239
4.180 ค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	240
4.181 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน A) M0 B) M20 และ C) M40	241
4.182 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height	242
4.183 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	243
4.184 เปรียบเทียบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	244
4.185 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	244
4.186 แผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่น NR-g-ACC	245
4.187 แผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่น ENR-g-ACC	245
4.188 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆ	246
4.189 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่างๆ	247
4.190 โครงสร้างทางเคมีของแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิคผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	248
4.191 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับกับแผ่นยาง ENR-g-ACC	248
4.192 การบวมตัวในน้ำของ NR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	249
4.193 การบวมตัวในน้ำของ ENR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	250
4.194 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง NR และ NR-g-ACC หลังเคลือบไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	251
4.195 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง ENR และ ENR-g-ACC หลังเคลือบไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต	251

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.196 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วย ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection	252
4.197 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วย ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height	253
4.198 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต กับพอลิยูรีเทน	257
4.199 ลักษณะแผ่น NCO-NR/PVA-PU	258
4.200 สเปคตราอินฟราเรดของแผ่น NCO-NR/PVA-PU	259
4.201 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA	260
4.202 การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำของแผ่น NCO-NR/PVA-PU	261
4.203 การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของแผ่น NCO-NR/PVA-PU	262
4.204 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของแผ่น NCO-NR/PVA-PU	263
4.205 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของแผ่น NCO-NR/PVA-PU พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของแผ่น NCO-NR/PVA-PU มีค่าเพิ่มขึ้น	264
4.206 ค่าความสามารถในการยืดของแผ่น NCO-NR/PVA-PU	265
4.207 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA-PU	265
4.208 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA-PU จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height	266
4.209 เปรียบเทียบลักษณะพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ที่ปริมาณกลีเซอรอล 5 10 และ 20%ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ	267
4.210 เปรียบเทียบลักษณะพอลิเมอร์ผสม NR/PVA NCO-NR/PVA และ NCO-NR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ กับ NR	268
4.211 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่น ENR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต กับพอลิยูรีเทน	269
4.212 ลักษณะของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M0 และ NCO-ENR/PVA-PU M40	270
4.213 สเปคตราอินฟราเรดของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU	270
4.214 การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU	271
4.215 การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU	272

รายการรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.216 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU	273
4.217 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU	274
4.218 ค่าความสามารถในการยืดของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU	274
4.219 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน A) M0 B) M20 และ C) M40	275
4.220 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height	276
4.221 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M20	277
4.222 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40 และ 50%	278
4.223 เปรียบเทียบลักษณะพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ที่ปริมาณกลีเซอรอล 5 10 และ 20% ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ	279
4.224 เปรียบเทียบลักษณะพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA NCO-ENR/PVA และ NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ กับ ENR	280
4.225 โครงสร้างทางเคมีของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU	282
4.226 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับแผ่น NR-g-ACC	283
4.227 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PUจากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection	286
4.228 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height	287

ภาคผนวก

ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหมู่อิพอกซิเดชันกับเวลาการทำปฏิกิริยา	308
ก.2 ค่า 100 % มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังล้างกรด	311
ก.3 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังล้างกรด	312
ก.4 ค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังล้างกรด	312

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ตัวย่อ

ตัวย่อ	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
A_r	Absorbance ratio	อัตราส่วนการดูดกลืน
ASTM	American Society for Testing and Materials	มาตรฐานการทดสอบ
cm	centimeter	เซนติเมตร
d	d-spacing	ระยะห่างระหว่างชั้น
DMTA	dynamic mechanical thermal analysis	เครื่องทดสอบทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต
DSC	differential scanning calorimetry	เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี
E	modulus	มอดุลัส
ENR	epoxidized natural rubber	ยางธรรมชาติอิพอกไซด์
FTIR	fourier transformed infrared	เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
g	gram	กรัม
h	hour	ชั่วโมง
Hz	hertz	เฮิรตซ์
IPN	inter penetrating polymer network	ร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้
kg	kilogram	กิโลกรัม
L	observed distance between bench marks on the intended specimen	ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด
L_0	original distance between bench marks length of origins meter	ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ
m	milli	เมตร มิลลิ (10^{-3})
MFT	minimum film formation	อุณหภูมิต่ำสุดของการเกิดฟิล์ม
mg	milligram	มิลลิกรัม
ml	milliliter	มิลลิลิตร
mm	millimeter	มิลลิเมตร

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

ตัวย่อ

ตัวย่อ	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
mm/min	millimeter per minute	มิลลิเมตรต่อนาที
min	minute	นาที
mol	mole	โมล
MPa	mega pascal	เมกกะพาสคาล
Mw	molecular weight	น้ำหนักโมเลกุล
N	newton	นิวตัน
NH_3	ammonium	แอมโมเนียม
N/mm^2	newton per millisquare	นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
nm	nanometer	นาโนเมตร
NMR	nucler magnetic resonance spectroscopy	เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนท์สเปกโทรสโกปี
phr	part per hundred rubber	ส่วนในร้อยส่วนของยาง
PVA	poly(vinyl alcohol)	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
psi	pound per square inch	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
SEM	scanning electron microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
TEM	transmission electron microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
TGA	thermogravimetric analysis	เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก
T_g	glass transition temperature	อุณหภูมิคล้ายแก้ว
V	volume	ปริมาตร
W	weight	น้ำหนัก
wt%	weight percent	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
XRD	X-ray diffraction	การกระเจิงของรังสีเอกซ์

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
π	Pi	ไพ
γ	gamma	แกมมา
Å	angstrom	อังสตรอม (10^{-10} m)
$^{\circ}C$	celsius degree	องศาเซลเซียส
$^{\circ}C/min$	degree Celsius per minute	องศาเซลเซียสต่อนาที
$\cos\theta$	cosine theta	คอสเทต้า
E'	storage modulus	ค่ามอดุลัสสะสม
E"	loss modulus	ค่ามอดุลัสสูญเสีย
λ	wavelength	ความยาวคลื่น
σ_b	stress at break	ความเค้น ณ จุดขาด
ε_b	strain at break	ความเครียด ณ จุดขาด
μm	micrometer	ไมโครเมตร (10^{-6} m)
tan δ	loss tangent	ค่าแทนเจนต์สูญเสีย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ยางพาราเป็นผลผลิตทางการเกษตรหลักของประเทศไทย และมีปลูกกันมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งแต่เดิมยางพารามีการปลูกกันเฉพาะภาคใต้และภาคตะวันออกเท่านั้นซึ่งถือว่ามีปริมาณมากแล้วนั้น แต่ในปัจจุบันแล้วได้มีการขยายการเพาะปลูกไปสู่ภาคอีสานรวมทั้งภาคเหนือด้วย ซึ่งเป็นการดีทำให้ประชาชนภาคอีสานและภาคเหนือมีความเป็นอยู่ดีขึ้น แต่ในทางกลับกันทำให้มีกำลังการผลิตยางพารามีปริมาณมากกว่าความต้องการใช้ภายในประเทศและความสามารถในการส่งออก วิธีแก้ปัญหาเฉพาะหน้าโดยการขายเหมายางในราคาถูกไม่ใช่ทางแก้ในระยะยาวและส่งผลให้ราคายางลดต่ำลงเรื่อย ๆ วิธีแก้ปัญหาที่ยั่งยืนกว่าคือการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับยางธรรมชาติโดยวิธีต่างๆ อาทิเช่น การปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติให้สามารถใช้งานได้ทนทานขึ้น หรือการนำยางธรรมชาติมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ

ผลที่มีการนำยางธรรมชาติไปใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นการแปรรูปจากยางแห้ง ซึ่งได้แก่การผลิตเป็นยางล้อรถทั้งยางในและยางนอก ซีล น้ำมันและโอริง ผลิตภัณฑ์กีฬา และสปริงต่างๆ (www.blueoceanrubber.com) เป็นต้น รวมถึงการแปรรูปจากน้ำยางไม่ว่าจะเป็นการผลิตถุงมือยางเพื่อใช้ทางการแพทย์ และอุตสาหกรรมต่างๆ ถุงยางอนามัย ที่นอนสุขภาพ ลูกโป่ง และผลิตภัณฑ์อื่นๆอีกมากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นดีเยี่ยม มีค่าการยืดตัวก่อนขาดค่อนข้างสูง ทนทานต่อการฉีกขาด และการสึกหรอได้ดี และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดีนั่งเอง แต่อย่างไรก็ตามในการใช้งานของยางธรรมชาติยังมีข้อจำกัด คือ ไม่ทนต่อน้ำมันและสารที่มีขั้ว มีความว่องไวต่อออกซิเจนในอากาศและโอโซน ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย รวมทั้งในปัจจุบันมีราคาถูกกว่าที่ควรจะเป็นดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่หน่วยงานสถาบันและองค์กรที่เกี่ยวข้องกับยางพารา ต้องศึกษาการผลิตยางชนิดใหม่จากยางธรรมชาตินำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อการใช้งานที่กว้างขวางและหลากหลายยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางพารา แทนการส่งยางพาราในรูปวัตถุดิบไปขายยังต่างประเทศ

ผลิตภัณฑ์กีฬาจากยางธรรมชาติ



รูปที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์กีฬาจากยางธรรมชาติ (www.blueoceanrubber.com)

วิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติให้สามารถใช้งานได้ทนทานขึ้น วิธีการหนึ่งก็คือการดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติ โดยการดัดแปรโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการดัดแปรยางธรรมชาตินั่นคือ การดัดแปรโดยใช้ปฏิกิริยาเคมี เป็นการดัดแปรโดยเติมหมู่ฟังก์ชันที่มีลักษณะเด่นลงไป เช่น การทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน (epoxidation) เป็นการเพิ่มวงแหวนอิพอกไซด์ (epoxide group) หรือวงแหวนออกซิเรน (oxirane ring) ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วมากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติการทนต่อน้ำมัน และสามารถเป็นชั้นกั้นก๊าซและสารโมเลกุลเล็กได้ดี

มีหลากหลายงานวิจัยที่มีการดัดแปรยางธรรมชาติ เช่นการดัดแปรยางธรรมชาติให้ทนทานต่อน้ำมันมากขึ้นโดยการเบลนด์กับยางคลอโรปรีน (Sanguansap *et al.*,2005) การดัดแปรด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลทเพื่อเพิ่มความขรุขระให้กับผิวยางธรรมชาติในการประยุกต์ใช้ทำถุงมือ (Sruanganurak *et al.*,2007) การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อเคลือบผิวของยางธรรมชาติเพื่อให้ยางธรรมชาติสามารถทนทานต่อการเสื่อมมากขึ้น (Jin *et al.*,2007) กราฟต์โค

พอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับมาลีอิค แอนไฮไดรด์ (NR-*g*-MA) หรือเรียกว่ายางธรรมชาติมาลีเอท (MNR) เพื่อใช้งานเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Nakason *et al.*, 2007) การเตรียม interpenetrating polymer network membranes สังเคราะห์จากยางธรรมชาติและพอลีสไตรีน โดยใช้เทคนิคพอลีเมอไรเซชันแบบต่อเนื่อง (Mathewa *et al.*,2002) หรือว่าจะเป็นการพบ lecithinase homolog (Hev b 4) จากยางธรรมชาติ (Hevea brasiliensis, Q6T4P0_HEVBR) คือตัวการที่สำคัญที่ทำให้เกิดการแพ้โปรตีนในน้ำยาง (Kolarich *et al.*,2006) แต่สำหรับการใช้งานยางธรรมชาติในทางการแพทย์นั่นจะพบปัญหาในเรื่องของการแพ้โปรตีน ความเหนียว ความทนทานต่อการบ่มเร่งและความร้อน รวมทั้งความไม่ทนทานต่อสารที่มีขั้ว ซึ่งพอจะมีงานวิจัยอยู่บ้างที่ศึกษาดัดแปรยางธรรมชาติเพื่อใช้งานทางด้านการแพทย์ อย่างเช่น การดัดแปรยางธรรมชาติให้มีหมู่ฟังก์ชั่นที่ปลายสายโซ่ 2 ข้าง (telecheliccis-1,4-oligoisoprenes) เพื่อทำปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ (Kebir *et al.*,2007) อีกงานวิจัยคือการเตรียมบล็อกโคพอลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิยูรีเทน (Gopakumar *et al.*,2005) ดังนั้นการทำให้ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้นจึงมีความน่าสนใจ นอกจากจะทำให้ยางธรรมชาติสามารถทนทานต่อสารที่มีขั้วเพิ่มมากขึ้นแล้วยังมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติในทางการแพทย์ วิธีการในครั้งนี้ที่จะทำให้ยางธรรมชาติมีขั้วนั้นก็คือการผสมกับพอลิเมอร์ที่มีขั้วอยู่แล้วหรืออาจจะใช้วิธีดัดแปรผิวยางธรรมชาติให้มีความเป็นขั้วเพิ่มมาก เช่นการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชั่นดังที่กล่าวมาแล้ว การผสมพอลิเมอร์ที่มีขั้วกับยางธรรมชาตินั้นทำได้ยากเพราะมีปัญหาในเรื่องความเข้ากันนั่นเอง วิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ที่มีขั้วกับยางธรรมชาตินั้นเข้ากันได้ในครั้งนี้อาศัยกระบวนการเกิดฟิล์ม โดยอาศัยหลักการที่ว่ายางธรรมชาติที่อยู่ในระบบคอลลอยด์ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบเมื่อผสมกับอีกระบบของพรีพอลิเมอร์ (พอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ) ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงน่าสามารถเข้ากันได้ เมื่อมีการระเหยน้ำออกไปจะทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มขึ้น และพรีพอลิเมอร์นั้นจะสามารถแทรกอยู่ในสายโซ่ของยางธรรมชาติได้ จึงทำให้ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้นได้ งานวิจัยนี้จึงพยายามศึกษาหาความเหมาะสมสำหรับการเติมหมู่ฟังก์ชัน OH หรือ COOH บนผิวของฟิล์มยางธรรมชาติ เพื่อให้สามารถทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนตและพอลิยูรีเทน โดยใช้วิธีการดัดแปรทางเคมีบนผิวของยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติมีความสามารถความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ (biocompatibility) รวมไปถึงความต้านทานต่อความร้อน โอโซน และแสงแดดดียิ่งขึ้นอีกด้วย วิธีการเพื่อปรับปรุงผิวของยางธรรมชาติ คือการดัดแปรทางเคมีโดยใช้ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกรดอะคริลิค ซึ่งโดยธรรมชาตินั้นโมเลกุลของยางธรรมชาติไม่สามารถทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนตได้ แต่โดยทั่วไปไดไอโซไซยาเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกับสารที่มีโปรตอนที่ว่องไว รวมไปถึงแอลกอฮอล์ กรด และฟีนอล ดังนั้นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จึงถูกใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ หลังจากนั้นนำยางธรรมชาติที่ดัดแปรโมเลกุลแล้วไปทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนตได้โครงสร้างที่ไม่มีขั้วเพื่อสามารถประยุกต์ใช้งาน

รวมถึงการเกิดหมู่ไฮดร็อกซิลมากมายบนผิว ซึ่งสามารถใช้ในการดัดแปรผิวอื่นๆที่สามารถปรับปรุงสมบัติและการใช้งานที่หลากหลายยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมการดัดแปรยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยาเคมี โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กรดอะคริลิค ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และพรีพอลิยูรีเทน
2. เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติที่ดัดแปรที่เตรียมได้จากข้อที่ 1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมการผสมของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในสภาวะน้ำยางกับสารละลายพอลิไวนิลแอกอฮอล์ โดยใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ทำการควบคุมปริมาณสารเชื่อมโยง อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา
2. เตรียมการกราฟต์กรดอะคริลิคบนโมเลกุลยางธรรมชาติในสภาวะน้ำยาง โดยใช้แสงยูวีเพื่อช่วยในการกราฟต์
3. เตรียมการดัดแปรแผ่นยางธรรมชาติจากข้อ 1 และข้อ 2 ด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต โดยใช้ไดบิวทิลทิน ไดลอเรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
4. เตรียมการเคลือบแผ่นที่ได้จากข้อ 3 ด้วยพรีพอลิยูรีเทน ซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับบิวเทน ไดออล โดยมีไดบิวทิลทินไดลอเรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
5. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติที่ดัดแปร
   5.1 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติที่ได้จากการดัดแปรด้วยเทคนิค FTIR และ XRD
   5.2 ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ได้จากการดัดแปร
   5.3 ทดสอบความต้านทานต่อโอโซนของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ได้จากการดัดแปรด้วยเครื่องโอโซน
   5.4 วิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวของยางธรรมชาติที่ได้จากการดัดแปร ด้วยเทคนิค SEM และ AFM
   5.5 ทดสอบการบวมตัวของยางธรรมชาติที่ได้จากการดัดแปรในน้ำ และโทลูอีน
   5.6 ทดสอบสมบัติพลวัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ได้จากการดัดแปรด้วยเทคนิค DMTA
   5.7 ทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติที่ได้จากการดัดแปรด้วยเทคนิค TGA และ DSC

5.8 ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.การเผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสาร และการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

2.ได้รับองค์ความรู้ในการเตรียมการดัดแปรผิวยางธรรมชาติด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กรดอะคริลิค และไดไอโซไซยาเนต

3.ทราบสมบัติต่าง ๆ จากการดัดแปรผิวยางธรรมชาติที่ได้ เช่น สมบัติเชิงฟิสิกส์ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ความทนทานต่อตัวทำละลาย สัณฐานวิทยา และการย่อยสลายทางชีวภาพ ความต้านทานต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย เป็นต้น เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้เหมาะสม

4.สามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติได้กว้างขวางมากขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติ

5. เป็นองค์ความรู้พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อที่จะนำไปสู่การคิดค้นและการพัฒนาที่สำคัญ ๆต่อไป

6. เป็นการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่

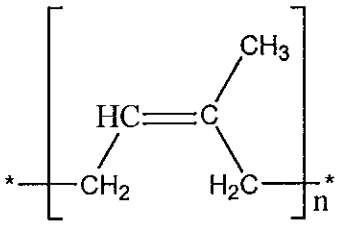
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนของเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้ โดย*ส่วนแรก* ข้อมูลโดยทั่วไปของยางธรรมชาติ จะกล่าวถึงสมบัติเด่นและสมบัติด้อยยางธรรมชาติ *ส่วนที่ 2* การดัดแปรยางธรรมชาติ จะกล่าวถึง การดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติ การดัดแปรโดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ *ส่วนที่ 3* การขึ้นรูปแผ่นพอลิเมอร์ผสม จะกล่าวถึงการเกิดฟิล์มของพอลิเมอร์คอลลอยด์ *ส่วนที่ 4* การปรับปรุงผิวพอลิเมอร์ จะกล่าวถึงวิธีการปรับปรุงผิวพอลิเมอร์ และพอลียูรีเทน *ส่วนที่ 5* จะกล่าวถึงวิธีการต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวของพอลิเมอร์ *ส่วนที่ 6* กล่าวถึงการตรวจสอบเอกสาร และ*ส่วนที่ 7* ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงความใหม่ของงานวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber)

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น กล่าวคือจะยืดออกไปตามแนวแรงที่มากระทำและจะกลับคืนสู่สภาพเดิมเมื่อเอาแรงกระทำดังกล่าวออก การกลับคืนสู่สภาพเดิมได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสมบัติของยางชนิดนั้นๆ ตามทฤษฎียางจะสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ 100 % เมื่อลดอุณหภูมิของยางธรรมชาติลงยางจะเปลี่ยนสภาพจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่นเป็นวัสดุที่มีความแข็งเปราะคล้ายแก้ว เราเรียกอุณหภูมิที่ยางเปลี่ยนไปมีสมบัติคล้ายแก้วว่า อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ณ จุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ยางไม่มีสมบัติยืดหยุ่นแต่จะมีสมบัติแข็งเปราะเหมือนแก้ว ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามแรงกระทำได้ (Brydson, 1998)

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ *cis*-1,4 polyisoprene ดังรูปที่ 2.1 โดยประกอบด้วยหน่วยซ้ำของไอโซปรีน (isoprene unit)



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติ (Brydson, 1998)

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง มีค่า $\overline{M}_n$ อยู่ในช่วง 2.5×10^5 ถึง 2.71×10^6 และมีค่า $\overline{M}_w$ อยู่ในช่วง 3.4×10^6 ถึง 1.017×10^7 โดยการกระจายตัวอยู่ในช่วงกว้างแต่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสม่ำเสมอจึงสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด ทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมาก มีความแข็งแรงของยางที่ไม่วัลคาไนซ์ (green strength) สูงและมีความเหนียวติดกันดี

สำหรับยางธรรมชาติดิบเมื่อถูกดึงให้ยืด โมเลกุลยางจะมีการไหล ดังนั้นยางธรรมชาติดิบจะไม่สามารถรักษารูปทรงได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อปล่อยแรงกระทำ ยางธรรมชาติมีการคืนรูปบางส่วน ยางธรรมชาติมีโมเลกุลขนาดใหญ่ขดตัวไปมาและสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถเคลื่อนไหวได้ ทำให้มีความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกอีกด้วย ยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง ทำให้ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและสามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน แต่สามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศและโอโซนได้ง่ายเช่นกัน การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมของยางธรรมชาติ สามารถใช้งานดีที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากมีอุณหภูมิคล้ายแก้วที่ประมาณ -72 °C (Brydson, 1998)

2.1.1 สมบัติเด่นของยางธรรมชาติ มีดังนี้

- สมบัติเชิงกลสูง เนื่องจาก เมื่อยางถูกยืดโมเลกุลยางมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบ
- มีความทนทานต่อแรงดึงสูง (มากกว่า 20 MPa)
- ค่าการยืดตัวก่อนขาดสูง (100–1000%)
- ทนทานต่อการฉีกขาดและทนทานต่อการสึกหรอได้ดี
- สามารถคืนตัวและกระเด้งตัวได้ดี
- ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ
- สามารถยึดตัวติดกับเส้นใยและโลหะได้ดี

2.1.2 สมบัติด้อยของยางธรรมชาติ มีดังนี้

- ความทนทานต่อการปมเร่งและความร้อนไม่ดี
- มีความว่องไวต่อออกซิเจนในอากาศและโอโซน สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย เนื่องจากในโครงสร้างของยางธรรมชาติประกอบด้วยพันธะคู่
- ไม่ทนทานต่อน้ำมันและสารที่มีขั้วเนื่องจากในโครงสร้างของยางธรรมชาติประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน
- มีช่วงอุณหภูมิการใช้งานแคบอยู่ระหว่าง – 40 ถึง 70 ° C เท่านั้น

- ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้แปรรูปได้ยาก เนื่องจากในขั้นตอนการแปรรูปยางธรรมชาติมีความหนืดสูงจึงจำเป็นต้องลดน้ำหนักโมเลกุลก่อนใช้งาน

2.2 การดัดแปรยางธรรมชาติ

2.2.1 การดัดแปรยางธรรมชาติโดยการดัดแปรโครงสร้าง

(ประมวล, 2545)

ก่อนปี พ.ศ. 2513 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ทางการค้าส่วนใหญ่เป็นการเปลี่ยนมอนอเมอร์ที่มีอยู่แล้ว แต่ช่วง 50 ปีที่ผ่านมามีการเปลี่ยนแปลงกล่าวคือ พอลิเมอร์หลายๆ ชนิดถูกเตรียมมาจากวิธีการดัดแปรโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วโดยทางเคมี (chemical transformation) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เนื่องมาจากการขาดแคลนพอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆที่มาจากกระบวนการกลั่นแยกน้ำมันดิบ ซึ่งยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานทางพานิชย์มานานกว่า 100 ปี จึงได้มีความพยายามที่เปลี่ยนแปลงให้ยางธรรมชาติอยู่ในรูปแบบของวัตถุดิบที่ใช้ประโยชน์ได้สูงสุด ความสำเร็จในความพยายามดังกล่าวนี้วัดได้จากการยอมรับทางพานิชย์ของยางธรรมชาติดัดแปรในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ยางคลอริเนต ยางไซไคลซ์ และยางอิพอกไซด์ อย่างไรก็ตามปัจจุบันการใช้ยางเหล่านี้น้อยลงมาก เนื่องจากมีวัตถุสังเคราะห์อื่นๆที่ได้เปรียบกว่ามาแทนที่

1. ยางคลอริเนต (chlorinated rubber) การเตรียมยางคลอริเนต ทำโดยการตัดยางชิ้นเล็กๆขนาดที่เหมาะสมผสมเข้ากับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ และ depolymerising agent หรือเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เล็กน้อย ควบคุมปริมาณเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ และเวลาการทำปฏิกิริยาเมื่อได้สารละลายยางที่มีความหนืดตามต้องการ จากนั้นจึงเติมสารที่ช่วยให้ยางมีความเสถียรและพ่นสารละลายเป็นฝอยลงใน chlorinating tower ที่ปล่อยคลอรีนเข้าทางส่วนล่าง กรดไฮโดรคลอริคจะถูกแยกออกที่เป็นส่วนบนของ chlorinating tower และยางคลอริเนตที่อยู่ในรูปของสารละลายจะถูกเก็บจากส่วนล่างของ chlorinating tower ทำการแยกคลอรีนที่เหลือโดยตู้อบสุญญากาศเพื่อให้เกิด "degassing" แล้วพ่นสารละลายไปที่ไอน้ำเพื่อให้คาร์บอนเตตระคลอไรด์ระเหยอย่างรวดเร็ว นำส่วนผสมของไอน้ำกับตัวละลายที่ระเหยได้ไปกลั่นแยกตัวทำละลายออกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ยางคลอริเนตตกลงที่ส่วนล่างของภาชนะในรูปของเส้นใยร่วมเปียก (loose, wet fibrous mass) ซึ่งจะถูกล้าง ปั่น และทำให้แห้ง จากนั้นจึงบดให้เป็นผงใน ball mill สำหรับการใช้งานยางคลอริเนต ได้แก่ การใช้เป็นกาว ตัวเชื่อมประสาน (bonding agent) และส่วนใหญ่ใช้เป็นสารเคลือบผิว (surface coating)

2. ยางไซไคลซ์ (cyclised rubber) ยางไซไคลซ์คือ ยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นวง (ring-like structure) วิธีการเตรียมยางไซไคลซ์มีหลายวิธี เช่นการให้ความร้อนกับยางในสภาวะที่มีกรดเป็นสารตัวเร่ง (catalyst) การแยกฮาโลเจนออกจาก halogenated rubber และการให้

ยางทำปฏิกิริยาร่วมกับ amphoteric metal halides ในปีพ.ศ. 2495-2499 ได้มีการผลิตยางไซไคลซ์เชิงพานิชย์ โดยการทำให้น้ำยางสดเป็นกรดและไม่จับตัวในสภาวะการเติมแคทไอออนิค จากนั้นจึงเติมกรดซัลฟูริคเพื่อให้ยางจับตัว ในอดีตใช้ยางไซไคลซ์ในการผลิตพื้นรองเท้า ยางนี้มีลักษณะและสมบัติคล้าย high styrene SBR ซึ่งความแข็งและทนทานการสึกหรอได้ดี อย่างไรก็ตามยางไซไคลซ์ได้ถูกแทนที่โดย resin rubber อื่นๆเนื่องจากการแข่งขันเรื่องราคาไม่ได้ เพราะการผลิตยางไซไคลซ์ต้องใช้กรดซัลฟูริคในปริมาณมากและต้องใช้ต้นทุนการใช้สารที่ช่วยให้ยางเสถียรสูง

3. ยางไฮโดรจิเนต (hydrogenated rubber) การดัดแปรโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยปฏิกิริยาไฮโดรจินชันที่ไม่ทำให้ยางเสื่อมคุณภาพได้มีมานานแล้ว ซึ่งวิธีการสำคัญองปฏิกิริยาคือ ใช้นิเกิลเป็นตัวเร่งที่อุณหภูมิ 170-195 °C ใช้ไฮโดรเจนที่มีความดัน 15-20 atm และยางในรูปของสารละลาย 2% ในไซโคลเฮกเซน ซึ่งยางไฮโดรจิเนตที่ได้ ไม่มีสี โปร่งแสง คล้ายขี้ผึ้ง อย่างไรก็ตามยางชนิดนี้อยู่ในความสนใจของนักวิจัยแต่ยังไม่ค่อยมีความสำคัญในเชิงพานิชย์

4. ยางอิพอกไซด์ (epoxide rubber) การดัดแปรโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยปฏิกิริยานี้ เป็นการทำให้กเดหมู่อิพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลของยาง การที่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (epoxide natural rubber, ENR) มีหมู่อิพอกไซด์ทำให้มีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปเตรียมเป็นฟิล์มจึงมีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ที่สูงขึ้น ก๊าซผ่านได้น้อยลง และทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ได้มากขึ้น โดยยังคงสมบัติอื่นๆ ของยางธรรมชาติ เช่น ความสามารถในการเกิดโครงสร้างผลึก (crystallinity) เมื่อนำไปดึงยืดเป็นต้น

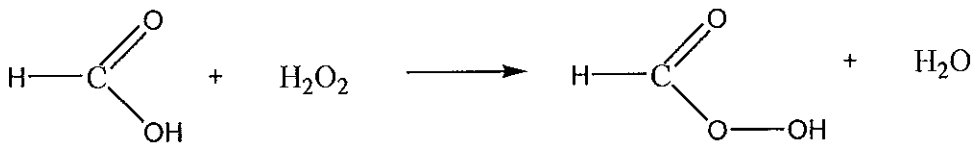
2.2.1.1 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ สังเคราะห์โดยการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันของโมเลกุลยางธรรมชาติเพื่อให้เกิดหมู่อิพอกไซด์หรือวงแหวนออกซิเรน (Oxirane group) ในตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติ ซึ่งการมีพันธะคู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติทำให้ยางธรรมชาติไม่ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี จึงเป็นที่สนใจที่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติได้

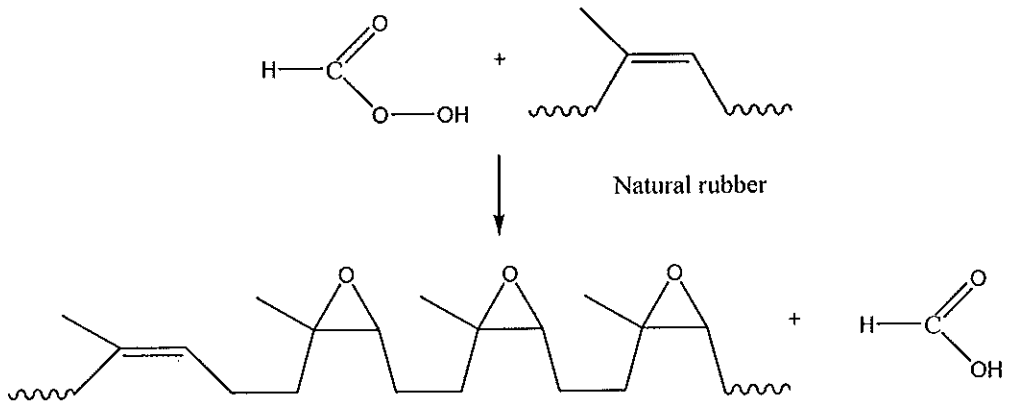
โดยทั่วไปปฏิกิริยาการเกิดอิพอกซิเดชันของยางธรรมชาติจะใช้กรดเปอร์อะซิติก (Gelling, 1983 และ Gelling, 1985) หรือกรดเปอร์ฟอร์มิค (Bradbury and Perera, 1985; Roy *et al.*, 1988; Fong, 1985; Gelling, 1983; Perera *et al.*, 1987 และ Roy *et al.*, 1993) ซึ่งอาจเตรียมเป็นกรดอะซิติกก่อน หรืออาจให้เกิดเป็นเปอร์แอซิดในขณะทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน (in-situ) ก็ได้ การเกิดปเอร์แอซิดในขณะทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยอัตราส่วนโดยมวลของเปอร์ฟอร์มิคกับไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ที่เป็นที่นิยมใช้อยู่ในช่วง 0.2-0.5 (Baker and Gelling, 1987)

ในกรณีใช้กรดอะซิติกต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่นกรดซัลฟูริค หรือกรดซัลโฟนิค เพื่อช่วยให้เกิดเป็นเปอร์แอซิด ในลักษณะเดียวกับสมการที่ (1) ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาอิพอก

ซิเดชันของกรดเปอร์ฟอร์มิค แสดงดังสมการที่ (2) ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็ว แต่ต้องมีการควบคุมสภาวะการเกิดปฏิกิริยาอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอิพอกไซด์ ซึ่งสามารถเกิดได้ 2 แบบ แสดงดังสมการที่ (3) และ (4) (รูปที่ 2.3) คือ แบบแรก (สมการที่ (3)) เป็นการแตกอย่างง่ายของหมู่อิพอกไซด์อยู่ติดกัน เมื่อเกิดการเปิดวงแหวนอิพอกไซด์จะได้ไซคลิกอีเทอร์ (cyclic ether) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก (สมการที่ (4))

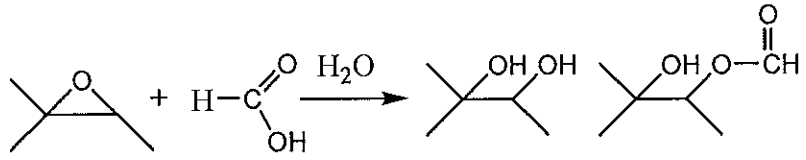


Formic acid Hydrogen peroxide Peroxy formic acid (1)

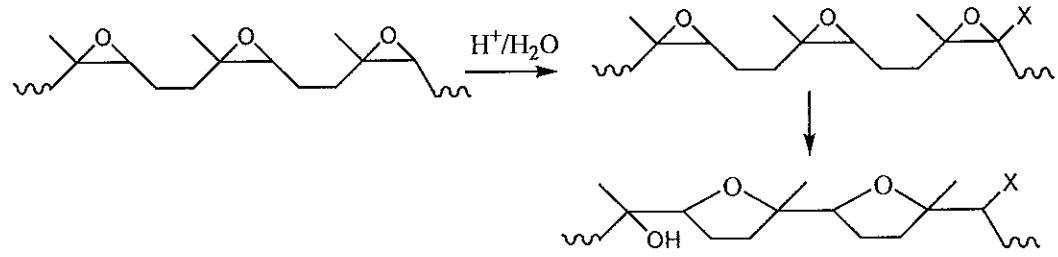


Epoxidize natural rubber, ENR Formic acid (2)

รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันโดยใช้กรดเปอร์ฟอร์มิคและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Baker and Gelling, 1987)



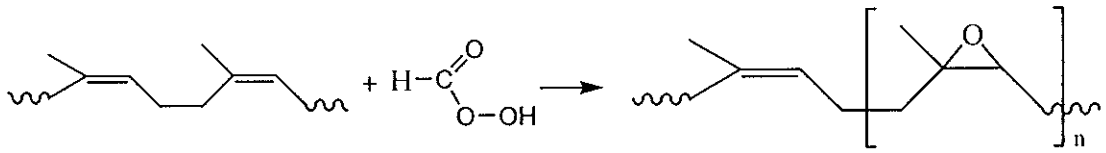
(3)



(4)

รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอิพอกไซด์ (Baker and Gelling, 1987)

ในงานวิจัยนี้เตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์โดยใช้กรดเปอร์ฟอร์มิคในขณะทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน แสดงดังรูปที่ 2.4 ขณะทำปฏิกิริยามีการควบคุมอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการเปิดวงแหวนอิพอกไซด์น้ำยางที่จะนำมาใช้ต้องทำให้มีความเสถียรต่อกรดก่อนโดยการเติมสารช่วยเพิ่มความเสถียรที่ไม่มีประจุ (non-ionic surfactant) จากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่ได้มาจับตัวด้วยเมทานอล ล้างน้ำ อบแห้งด้วยอากาศร้อน ปัจจุบันยางอิพอกไซด์ที่ผลิตทางการค้ามีสองชนิดคือ ENR-25 และ ENR-50 ซึ่งมีปริมาณหมู่อิพอกไซด์เท่ากับ 25 และ 50 ตามลำดับ ตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีจำหน่ายในทางการค้า เช่น Epoxyprene 25 และ Epoxyprene 50 ของบริษัท Kumpulam Guthrie Berhad ประเทศมาเลเซีย (IRRDB, 2000)



รูปที่ 2.4 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์โดยใช้กรดเปอร์ฟอร์มิค (IRRDB, 2000)

2.2.1.2 การวิเคราะห์สมบัติยางธรรมชาติอิพอกไซด์

I) การวิเคราะห์ปริมาณหมู่อิพอกไซด์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy)

Davey and Loadman (1984) ได้วิเคราะห์หาปริมาณหมู่อิพอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR โดยเตรียมตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลายโดยใช้คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เป็นตัวทำละลาย แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรด สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งอินฟราเรดสเปคตรัมของยางอิพอกไซด์จะแตกต่างจากสเปคตรัมของยางธรรมชาติ กล่าวคือปรากฏแถบการดูดกลืนที่ 870 และ 1240 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมา นอกจากนี้ยังปรากฏแถบการดูดกลืนอื่นๆ อันเนื่องมาจากการเปิดวงแหวนของหมู่อิพอกไซด์ เช่น แถบการดูดกลืนของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่ 3600-3200 cm^{-1} หมู่ฟิวเรน (Furane group) ที่ 1065 cm^{-1} และหมู่อีเทอร์ (Ether group) ที่ 1800-1650 cm^{-1} คำนวณค่าอัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio, Ar) ของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870/835 cm^{-1} เพื่อเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

จากความสัมพันธ์

$$Ar=a_{870}/(a_{870}+a_{835}) \quad (1)$$

โดยที่ a_{870} และ a_{835} เป็นการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} และ 835 cm^{-1} ตามลำดับ

II) สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกไซด์

A) ความหนืดมูนนี่และความสามารถในการละลาย

ENR-25 และ ENR-50 มีความหนืดมูนนี่ ML 1+4 (100 °C) อยู่ในช่วง 70-90 หน่วย ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องบด (pre-masticate) ก่อนที่จะนำไปผสมสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีความเป็นขั้วเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ ส่วนความสามารถในการละลายจะขึ้นอยู่กับระดับการเกิดอิพอกซิเดชัน และชนิดของตัวทำละลาย ซึ่งยางธรรมชาติจะสามารถละลายได้ดีขึ้นเมื่อมีการบดก่อน ตัวทำละลายที่เหมาะสม ได้แก่ โทลูอีน คลอโรฟอร์ม และเตตระไฮโดรฟูเรน

B) ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g)

การเกิดหมู่อิพอกไซด์เพิ่มขึ้นทุกๆหนึ่งเปอร์เซ็นต์โมลบนโมเลกุลยางธรรมชาติจะทำให้ค่าอุณภูมิคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นประมาณ 1 °C (Baker and Gelling, 1987) ซึ่งพบว่า ENR-25 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -47 °C และ ENR-50 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -22 °C จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิคล้ายแก้วของยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับหมู่อิพอกไซด์ (Nakason *et al.*, 2001) พบว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์มีค่า T_g สูงกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้ค่า T_g ยังเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ

III) สมบัติเชิงฟิสิกส์ (Physical properties)

A) การเกิดผลึกเมื่อยืด (Strain Induce Crystallization)

จากการศึกษายางธรรมชาติอิพอกไซด์วัลคาไนซ์ที่ไม่มีสารตัวเติมด้วย X-ray diffraction พบว่ายางชนิดนี้สามารถเกิดผลึกได้เมื่อยืด (Davie *et al.*, 1983) ซึ่งจะเห็นการเกิดผลึกได้ชัดเจน และพบว่าปริมาณการเกิดผลึกของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในขณะยืดออก 400 เปอร์เซ็นต์ จะลดลงเมื่อปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในโมเลกุลยางเพิ่มขึ้น

B) สมบัติด้านความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ที่ไม่มีสารตัวเติม (Gum Valcanizate)

ยางธรรมชาติอิพอกไซด์สามารถเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงให้ยืดออกทำให้มีความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดสูง เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่สามารถตกผลึกได้ เช่น ยางเอสบีอาร์ (Styrene-butadiene copolymer, SBR) แต่มีค่าต่ำกว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติ นอกจากนี้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์เพิ่มขึ้นจะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง

C) ความทนทานต่อน้ำมัน (Oil Resistance)

สภาพความเป็นขั้วของยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ความต้านทานต่อน้ำมัน และตัวทำละลายเปลี่ยนแปลงไป ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีระดับของการเกิดอิพอกซิเดชันสูงจะเป็นวัสดุที่ทนทานต่อสารไฮโดรคาร์บอนแต่มีความทนทานต่อตัวทำละลายที่มีขั้วลดลง

D) การซึมผ่านของก๊าซ (Air Permeability)

การเกิดอิพอกซิเดชันจะทำให้ก๊าซซึมผ่านยางได้น้อยลง ตัวอย่างของการซึมผ่านก๊าซของยางธรรมชาติอิพอกไซด์เกรดต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติและยางบิวไทล์ จะเห็นว่า ENR-50 มีการซึมผ่านก๊าซไกล้เคียงกับยางบิวไทล์ซึ่งสามารถใช้ในงานที่ต้องการให้มีการซึมผ่านของก๊าซต่ำได้ นอกจากนี้ยาง ENR-70 มีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซสูงกว่ายางบิวไทล์

E) ฮิสเทอรีซีส (Hysteresis)

ค่าความกระเด้งตัวของยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีค่าต่ำกว่าค่าความกระเด้งตัวของยางธรรมชาติ เมื่อระดับการเกิดอิพอกซิเดชันเพิ่มขึ้น ค่าความกระเด้งตัวจะลดลง กล่าวคือ ยางธรรมชาติอิพอกไซด์สามารถดูดกลืนพลังงานได้สูงกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนั้นค่าความกระเด้งตัวยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พบว่าผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความกระเด้งตัวของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีลักษณะที่เหมือนกัน กล่าวคือที่อุณหภูมิที่ไกล้เคียงกับค่าอุณภูมิคล้ายแก้วยางจะมีค่าความกระเด้งตัวสูง จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความกระเด้งตัวจะลดลงจนถึงจุดต่ำสุด หลังจากนั้นค่าความกระเด้งตัวเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง

F) การเหนียวติดกัน (Tack)

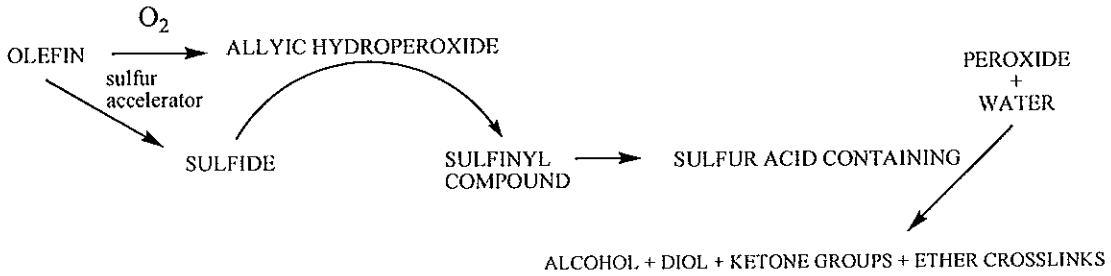
เมื่อระดับของการเกิดอิพอกซิเดชันเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการเหนียวติดกันของยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิเมอร์ที่ไม่ทีขั้ว เช่นยางธรรมชาติหรือยางเอสบีอาร์ลดลง แต่ยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะยึดติดกับพอลิเมอร์ที่มีขั้วได้ดีขึ้น

G) การบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน (Aging)

ยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีพันธะคู่น้อยกว่ายางธรรมชาติ ทำให้ความทนทานต่อการถูกออกซิไดซ์ได้มากกว่า การบ่มเร่งของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและระบบอีวี โดยใช้ระบบที่ไม่มีออกซิเจนจะให้ผลเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติจะแข็งกระด้างอันเนื่องมาจากการถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วมีผลทำให้มอดูลัสเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดจะลดลงในขณะที่บ่มเร่งยางธรรมชาติอิพอกไซด์และยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์โดยใช้ระบบอีวีจะให้ผลที่เหมือนกัน จากการวิเคราะห์ยาง ENR-50 ที่ผ่าน

การปมเร่งแล้ว พบว่าจำนวนหมู่อิพอกไซด์ลดลง แต่ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว และปริมาณการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล (Crosslink density) เพิ่มขึ้น

การปมเร่งยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เกิดการเปิดวงแหวนของหมู่อิพอกไซด์โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะอีเทอร์ (ether crosslink) ขึ้น กรดที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจากการสลายตัวด้วยความร้อนของออกซิไดซ์ซัลไฟด์ (oxidized sulphide) ดังแสดงในสมการในรูปที่ 2.5 (Gelling and Morrison, 1985)



รูปที่ 2.5 การปมเร่งด้วยอากาศร้อนของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (Gelling and Morrison, 1985)

2.2.2 การดัดแปรยางธรรมชาติโดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

การดัดแปรโดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นหรือที่เรียกว่าพอลิเมอร์ผสม คือ การนำพอลิเมอร์สองชนิดขึ้นไปมาผสมเข้าด้วยกัน ซึ่งการผสมพอลิเมอร์เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยการนำพอลิเมอร์สองชนิดที่อยู่ในสถานะของไหล ได้แก่สารละลาย (solution) หรืออยู่ในสภาวะหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้เป็นพอลิเมอร์ผสม โดยเป็นการนำสมบัติเป็นการนำสมบัติเด่นของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันโดยธรรมชาติแล้วจะมีความเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องพิจารณาความเข้ากันได้ด้านสมบัติ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ซึ่งบางชนิดผสมเข้ากันแล้วทำให้สมบัติดีขึ้น (compatible blend) ส่วนบางชนิดผสมกันแล้วอาจทำให้สมบัติที่ได้ไม่ดี (incompatible blend) โดยสามารถแบ่งประเภทของพอลิเมอร์ผสมตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. พอลิเมอร์ผสมที่ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวในระดับโมเลกุล (miscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้สามารถมองเห็นเป็นวัฏภาคเดียวกัน โดยที่โมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด จะมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดกัน สมบัติของพอลิเมอร์ผสมชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม

2. พอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวในระดับโมเลกุล (immiscible blend) พอลิเมอร์ผสมชนิดนี้จะแยกออกจากกันเป็นสองวัฏภาคได้อย่างชัดเจนในระดับจุลภาค

โดยพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยจะเป็นวัฏภาคกระจาย พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง

3. พอลิเมอร์ผสมที่ผสมเข้ากันได้บางส่วนในระดับโมเลกุล (partially miscible) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้อาจรวมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันเพียงบางส่วน พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งอาจแทรกเข้าไปอยู่ในวัฏภาคของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งทำให้วัฏภาคมีแรงยึดเหนี่ยวมากขึ้น

ก.ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมต้องพิจารณาถึงความเข้ากันได้ในด้านสมบัติ ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้ไม่ดีจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน โดยแต่ละเฟสมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ด้อยกว่าพอลิเมอร์เดิมก่อนนำมาผสม ซึ่งสมบัติของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

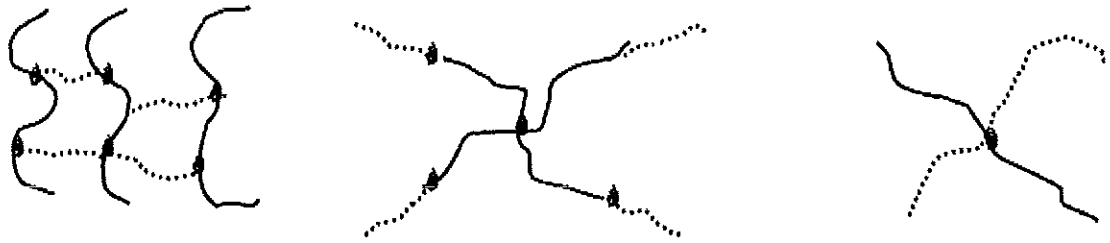
1. สภาวะการผสม เช่น ชนิดของพอลิเมอร์ อัตราการผสม และอุณหภูมิของการผสม
2. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวในสภาวะการหลอมเหลว
3. สารเพิ่มเสถียรภาพ
4. สัณฐานวิทยาของเฟส
5. สมบัติเชิงกลของสารแต่ละตัวที่นำมาผสม
6. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิว

2.2.3 ร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้

สำหรับวงการพอลิเมอร์ในปัจจุบัน พอลิเมอร์ผสมหรือการผสมพอลิเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดเข้าด้วยกันนั้นมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เพราะสามารถรวมจุดเด่นของพอลิเมอร์ 2 ชนิดมารวมไว้ด้วยกัน ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและกว้างขวางมากขึ้น เช่นการผสมยางธรรมชาติกับเมทิลเมทาคริเลท ทำให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเด่นคือยืดหยุ่นเหมือนยางแต่สามารถแปรรูปใหม่ได้เหมือนพลาสติก เป็นต้น วิธีการผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันนั้นสามารถทำได้หลายวิธี หากพอลิเมอร์อยู่ในรูปของแข็งสามารถผสมได้ในเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง เครื่องผสมแบบปิด เครื่องเอกซ์ทรูด เครื่องฉีด เป็นต้น สำหรับพอลิเมอร์หรือพรีพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของสารละลายก็สามารถผสมได้โดยตรงแล้วนำมาขึ้นรูปโดยการทำเป็นแผ่นฟิล์ม



จากซ้ายไปขวา : a, b, c, d



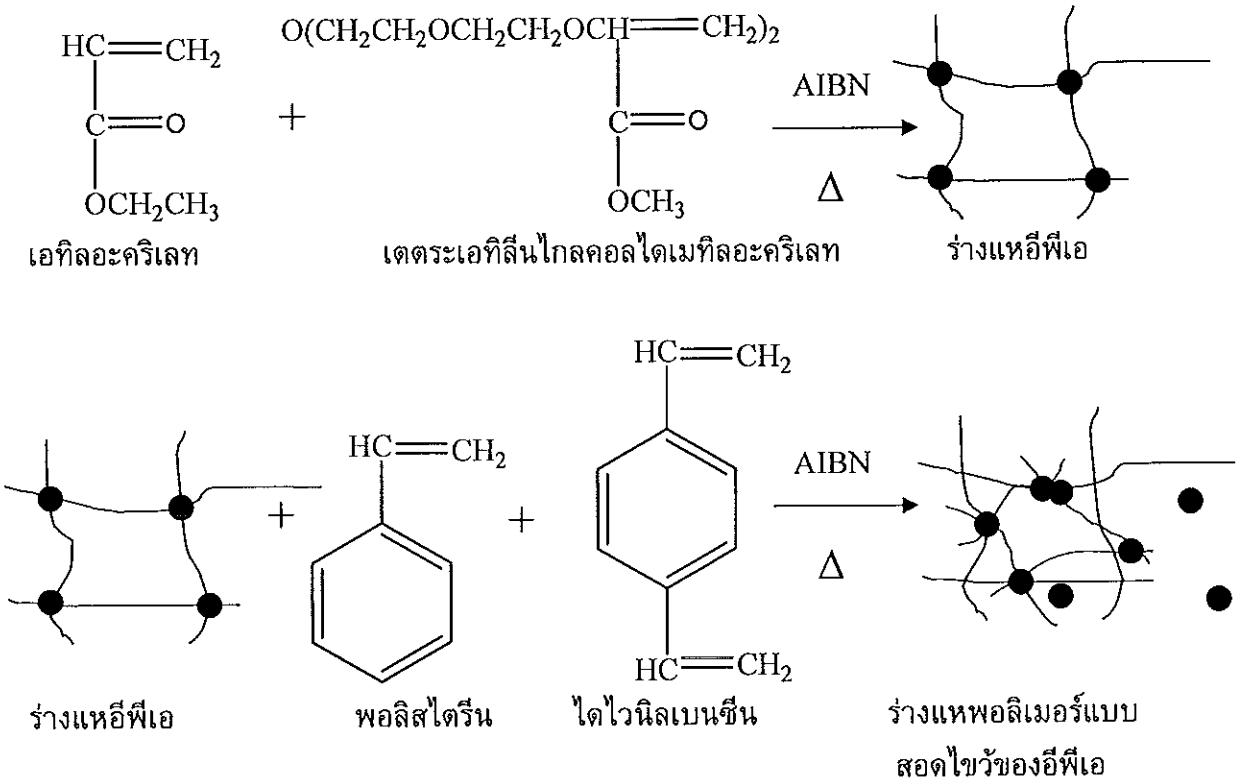
จากซ้ายไปขวา : e, f, g

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของโคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ผสมแบบต่างๆ

พอลิเมอร์ I: เส้นทึบ
พอลิเมอร์ II: เส้นประ

(a) พอลิแมอร์ผสม (b) บล็อก โคพอลิเมอร์ (c) กราฟต์ โคพอลิเมอร์ (d) ร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้ (e) โคพอลิเมอร์แบบเชื่อมโยง (f) star block copolymer และ (g) segregated star copolymer.

Interpenetrating polymer networks (IPN) ร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้ (ไอพีเอ็น) เป็นอีกชนิดหนึ่งของพอลิเมอร์ผสม คือ ร่างแหพอลิเมอร์ผสมที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิดขึ้นไปซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะร่างแห และสอดไขว้กันอย่างแนบชิดโดยไม่เกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างกัน เตรียมโดยใส่โมโนเมอร์และสารเชื่อมขวางเข้าไปในพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างร่างแหอยู่แล้ว ทำให้เกิดพอลิเมอร์ชนิดที่ 2 สอดไขว้กับพอลิเมอร์ชนิดแรก ตัวอย่างการเกิดพอลิเมอร์ร่างแหแบบสอดไขว้ของพอลิเอทิลอะคริเลทและพอลิสไตรีนสามารถแสดงได้ดังสมการ

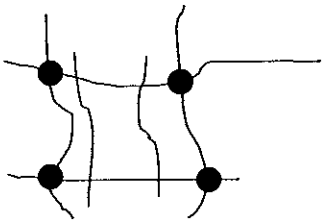


เอทิลอะคริเลท เตตระเอทิลีนไกลคอลไดเมทิลอะคริเลท ร่างแหอีพีเอ

ร่างแหอีพีเอ พอลิสไตรีน ไดไวนิลเบนซีน ร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้ของอีพีเอ

รูปที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์แบบสอดไขว้

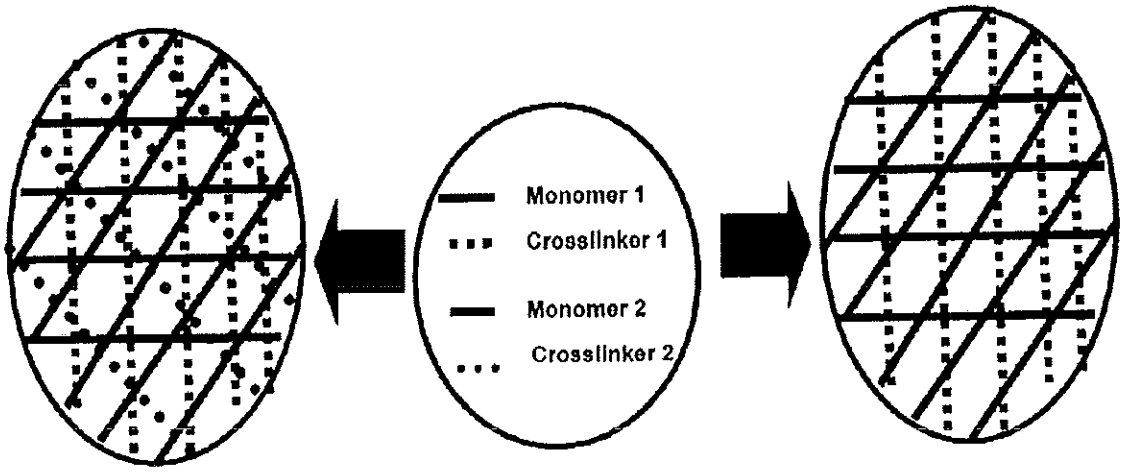
ถ้าเตรียมโดยการใส่โมโนเมอร์แต่ไม่ใส่สารเชื่อมขวางเข้าไปในพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างร่างแหอยู่แล้ว จะทำให้เกิดสายโซ่ของพอลิเมอร์ชนิดที่ 2 สอดไขว้กับพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหชนิดแรก ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหพอลิเมอร์แบบกึ่งสอดไขว้ (semi *interpenetrating polymer networks*, semi-IPN) (ดังรูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างร่างแหพอลิเมอร์แบบกึ่งสอดไขว้

2.2.3.1การแบ่งประเภทของ Interpenetrating networks

มีการแบ่งประเภทของ IPNs ไว้ 2 ประเภทคือ: (i) โดยทางเคมี และ (ii) โดยโครงสร้าง



(a) Full IPN (b) semi-IPN.

รูปที่ 2.9 แผนภาพจำลองของ (a) full IPN และ (b) semi-IPN.

(i) *โดยทางเคมี*

(a) *แบบต่อเนื่อง*: โครงสร้าง IPN ชนิดนี้ สามารถเตรียมได้โดย การพอลิเมอไรซ์ของผสมที่มี โมโนเมอร์ สารเชื่อมขวาง และตัวริเริ่มปฏิกิริยาหรือตัวเร่งปฏิกิริยา ให้อยู่ในรูปของโครงสร้างตาข่ายหลังจากนั้นจึงนำไปบวมตัวในโมโนเมอร์ตัวที่ 2 ที่มีสารเชื่อมขวาง ผลของโครงสร้างตาข่ายที่มีการบวมตัวและเกิดการพอลิเมอไรซ์ขึ้นนี้ทำให้เกิดเป็น IPN ขึ้น

(b) *โครงสร้างตาข่ายเกิดขึ้นพร้อมกัน*: โครงสร้าง IPN ชนิดนี้ สามารถเตรียมได้โดย การพอลิเมอไรซ์โมโนเมอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิดและสารเชื่อมโยงที่เป็นคู่กับโมโนเมอร์ภายในขั้นตอนเดียว ประสบความสำเร็จจากวิธีการนี้ได้นั้นทั้งสองส่วนไม่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกัน รูปที่ 2.9 (a)

(ii) *โดยโครงสร้าง*

(a) *Full IPNs*: IPN ชนิดนี้ประกอบด้วยโครงสร้างตาข่าย 2 ส่วนที่มาประกอบกันทำให้เกิดการพันกันและเกิดอันตรกิริยาระหว่างโครงสร้างขึ้น

(b) *Homo-IPNs*: IPN ชนิดนี้คือ *Full IPNs* ชนิดพิเศษโดยที่พอลิเมอร์ 2 ตัวที่ใช้มีโครงสร้างคล้ายๆกัน (c) *Semi- or pseudo-IPNs*: IPN ชนิดนี้จะมี 1 ส่วนที่เกิดโครงสร้างเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างตาข่ายดังรูปที่ 2.9 (b).

(d) *Latex IPNs*: IPN ชนิดนี้เกิดจากการพอลิเมอไรซ์แบบอิมัลชันสัณฐานวิทยาของ IPN ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสัดส่วนของ IPN ที่เกิดการพอลิเมอไรซ์

(e) *Thermoplastic IPNs*: IPNs ชนิดนี้สามารถก่อเป็นรูปร่างสามารถแอกทรูดซ์และรีไซเคิลได้ มีอย่างน้อยหนึ่งส่วนที่เป็นบล็อคโคพอลิเมอร์ IPN ที่มีลักษณะเป็นไฮโดรเจลมีสมบัติเชิงกลมากกว่าเนื่องจากมีการพันกันทางฟิสิกส์เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างเชื่อมขวางแบบ individual crosslinked networks (Padmanabh *et al.*, 2006).

2.2.3.2 คุณสมบัติและประโยชน์ของ IPN

Interpenetrating polymer networks (IPNs) เป็นพอลิเมอร์ผสมชนิดหนึ่งที่อยู่ในรูปของโครงสร้างตาข่าย โดยมีอย่างน้อยหนึ่งส่วนที่เกิดการพอลิเมอไรซ์หรือเชื่อมขวางกัน IPNs ประกอบด้วยพอลิเมอร์สองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดอยู่ในรูปของโครงสร้างตาข่าย ยึดกันโดยการพันกันอย่างถาวร โดยแรงนี้มีค่าน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด IPNs โดยมากมีสมบัติทางฟิสิกส์ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์โดยทั่วไปที่มีส่วนประกอบของพอลิเมอร์เหมือนกัน (Vilas and Sachin, 2000) ทำให้พอลิเมอร์ผสมชนิดนี้มีคุณสมบัติที่พิเศษ สามารถใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์

IPNs มีข้อแตกต่างที่เด่นชัดจากพอลิเมอร์ผสม บล็อคโคพอลิเมอร์ และกราฟต์โคพอลิเมอร์อยู่ 2 ข้อด้วยกันคือ (1) IPN สามารถบวมตัวแต่ไม่ละลายในตัวทำละลาย และ (2) ป้องกันการคืบและการไหล

2.2.4 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (DeMerlis and Schoneker, 2002)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohols, PVA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางปลายปี ค.ศ. 1930 ภายในวงการอุตสาหกรรม ทางการค้า ทางการแพทย์ และการประยุกต์ใช้งานทางด้านอาหาร ซึ่งได้แก่ การใช้งานเป็นเรซิน เลกเกอร์ ด้าย สำหรับผ้าตัด และภาชนะที่สัมผัสกับอาหาร สมบัติทางด้านเคมี และฟิสิกส์โดยทั่วไปของ PVA สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ลักษณะทางด้านฟิสิกส์ของ PVA ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมจากการไฮโดรไลซิส หรือการไฮโดรไลซิสบางส่วนของ พอลิไวนิลอะซิเตต (Polyvinyl acetate) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีการไฮโดรไลซ์บางส่วน (partially hydrolyzed) และกลุ่มที่มีการไฮดดรไลซ์ทั้งหมด (fully hydrolyzed) ความยาวที่แตกต่างกันของพอลิไวนิลอะซิเตตในตอนเริ่มต้น และระดับของการไฮโดรไลซิส ภายใต้สภาวะอัลคาไลล์หรือกรดทำให้ผลิตภัณฑ์ของ PVA ที่ได้มีความแตกต่างในเรื่องของ น้ำหนักโมเลกุล (20,000 – 400,000) ความสามารถในการละลาย (solubility) ความสามารถในการหักงอ (flexibility) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความสามารถในการยึดติด

สำนักทรัพยากรการเรียนรู้คุณหญิงหลง อรรถกระวีสุนทร

(adhesiveness) สมบัติต่างๆของ PVA อย่างเช่น pH ความหนืด จุดหลอมเหลว ดัชนีการหักเห เป็นต้น โดยสมบัติต่างๆเหล่านี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล และ %ไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในแต่ละเกรด

ตารางที่ 2.1 สมบัติโดยทั่วไปทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของ PVA

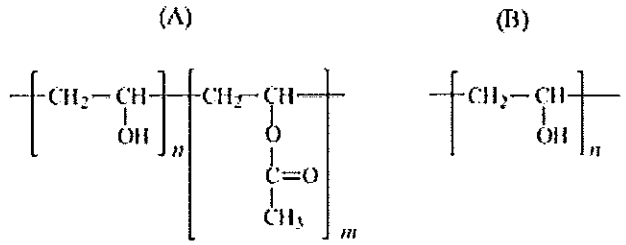
Cas No.	9002-89-5	[a]USP/NF
Molecular weight*	30,000 – 200,000	[b]Wandbook Pharm. Excip.
Structural formula*	$(-CH_2CHOH-)_n-(-CH_2CHOCOCH_3-)_m$	[c]Japan Pharm. Excip. Dir.
Empirical formula*	$(C_2H_4O)_n(C_4H_6O_2)_m$	Japan Pharm. Excip. Dir.
Physical appearance	Odorless, white to cream-colored granular powder	Handbook Pharm. Excip.
Specific gravity	1.19-1.31	Handbook Pharm. Excip.
Solubility	Insoluble in aliphatic and aromatic hydrocarbons, esters, ketones, and oils ; water soluble	Handbook Pharm. Excip.

[a] USP/NF, 2000. UnitedStates Pharmacopoeia (24) and National Formulary (19), pp. 1352–1353. U.S. Pharmacopeial Convention, Rockville, MD.

[b] Handbook of Pharmaceutical Excipients, 1994, second ed. A. Wade, P.J. Weller (Eds), pp. 383–384. American Pharmaceutical Association, Washington, DC.

[c] The Japanese Pharmaceutical Excipients Directory, 1996. Monograph on Polyvinyl Alcohol, p.355.

* Variable based on PVA grade.



รูปที่ 2.10 แสดงสูตรโครงสร้างของ PVA โดย A คือ partially hydrolyzed และ B คือ fully hydrolyzed

สำหรับในวงการอุตสาหกรรมและผลิตภัณฑ์ทางการค้า PVA มีค่าสำหรับการใช้ความสามารถในการละลาย และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของมัน (DeMerlis and Schoneker, 2002)

2.3 การเกิดฟิล์มของพอลิเมอร์คอลลอยด์

2.3.1 ลักษณะการเกิดฟิล์มของพอลิเมอร์คอลลอยด์

การนำพอลิเมอร์คอลลอยด์ไปใช้เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์จะต้องทำให้พอลิเมอร์คอลลอยด์แห้ง ซึ่งทำได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบแรก คือ การทำให้พอลิเมอร์คอลลอยด์แห้งแล้วได้เป็นวัสดุพอลิเมอร์ทั้งก้อน เช่น โดยการเติมกรด หรือสารละลายอิเล็กโทรไลท์ลงในพอลิเมอร์คอลลอยด์ ทำให้อนุภาคจับตัวกันแล้วเกิดตะกอน เมื่อกำจัดน้ำออกจากระบบก็จะได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่อาจจะมีลักษณะเป็นก้อนหรือผง ตัวอย่างเช่น ลาเทกซ์สไตรีน- บิวทาไดอีน หรือ ลาเทกซ์อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน ที่เตรียมจากกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน และแบบที่ 2 เป็นการทำให้พอลิเมอร์คอลลอยด์แห้งในลักษณะของการทำให้เกิดฟิล์มบางโดยตรงบนวัสดุรองรับ ซึ่งเป็นกลไกที่เกิดจากอนุภาคพอลิเมอร์ที่มักมีรูปร่างเป็นทรงกลมที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่ส่วนมากมักเป็นน้ำนั้นเชื่อมติดเข้าด้วยกันเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางหลังจากระเหยน้ำออก ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มจากลาเทกซ์นี้มีประโยชน์หลายด้าน เช่น สี สารเคลือบ กาว และสิ่งทอเป็นต้น ทั้งนี้ ด้วยเหตุผลทางสิ่งแวดล้อม และสุขภาพเป็นผลให้ผู้ผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ต้องการใช้พอลิเมอร์คอลลอยด์ที่มีน้ำเป็นตัวกลาง แทนการใชเพอลิเมอร์ที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์แบบที่ใช้อยู่เดิม กลไกการเกิดฟิล์มจากพอลิเมอร์ที่แขวนลอยในน้ำจึงเป็นเรื่องที่ต้องสนใจเพราะเกี่ยวข้องกับการออกแบบผลิตภัณฑ์ มีการพัฒนาสูตรใหม่ๆ ขึ้น เพื่อปรับแต่งวิธีการแห้งของฟิล์มจากพอลิเมอร์คอลลอยด์ เนื่องจากกลไกการแห้งและอัตราการแห้ง มีผลอย่างยิ่งต่อโครงสร้างสัณฐานของฟิล์ม และการกระจายของส่วนประกอบต่างๆ ที่ละลายอยู่ในลาเทกซ์ เช่น สารลดแรงตึงผิว ที่จะเคลื่อนที่ไปได้ขณะเกิด

ฟิล์มเมื่อน้ำมีการระเหย ความเข้าใจการแห้งของฟิล์มที่เตรียมจากพอลิเมอร์คอลลอยด์จึงมีผลเป็นอย่างมากต่อสมบัติสุดท้ายของฟิล์มที่ได้

2.3.2 กลไกการเกิดฟิล์มของพอลิเมอร์คอลลอยด์

กระบวนการเกิดฟิล์มพอลิเมอร์จากพอลิเมอร์คอลลอยด์ แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังรูป 2.11

ก. ขั้นตอนที่ 1

น้ำระเหยออกไปจากพอลิเมอร์คอลลอยด์ด้วยอัตราคงที่ ทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคพอลิเมอร์มากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งอนุภาคเข้ามาชิดกันเกิดเป็นทรงกลมที่แน่นขึ้น ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเท่ากัน สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่รวมตัวกันแน่นจะเท่ากับ 0.74 ซึ่งการที่อนุภาคเข้ามาชิดกันเกิดเป็นทรงกลมที่แน่นขึ้นนั้นอนุภาคต้องมีความเสถียรเพียงพอ มิฉะนั้นโครงสร้างจะเป็นระเบียบน้อยลง แล้วทำให้สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่รวมตัวกันแน่นน้อยลง

ข. ขั้นตอนที่ 2

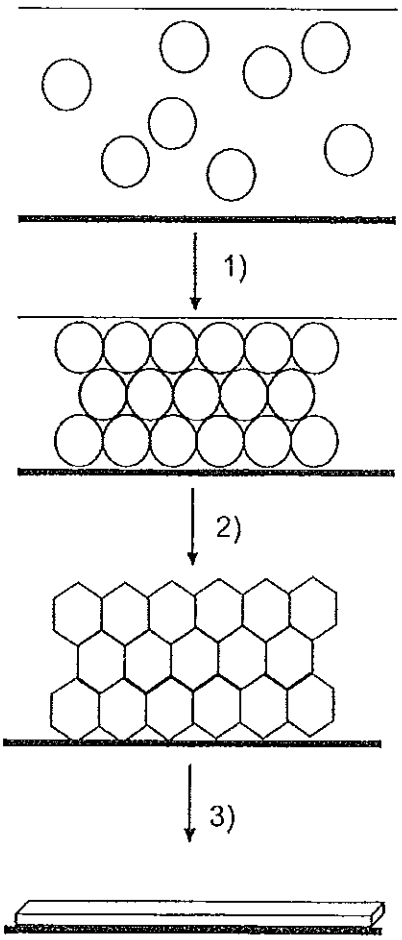
การที่อนุภาคเข้ามาชิดกันเกิดเป็นทรงกลมที่แน่นขึ้นในขั้นตอนที่ 1 ทำให้เริ่มเห็นว่ามีร่องรอยของอนุภาคปรากฏที่บริเวณผิวของลาเทกซ์ด้านที่ติดกับอากาศ ในขั้นตอนนี้ อัตราการระเหยของน้ำจะลดลง และเริ่มมีผลของแรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคในลักษณะที่ทำให้วัสดุพอลิเมอร์เข้าไปอยู่ในทุกช่องที่ว่าง ซึ่งแรงกระทำดังกล่าวนั้นต้องมีค่ามากกว่าการที่อนุภาคจะมีการต้านทานเชิงกลต่อการเปลี่ยนรูป ดังนั้น อนุภาคทรงกลมจึงเปลี่ยนไปเป็นรูปเหลี่ยมคล้ายขนมเปียกปูน หรือ หลายเหลี่ยม ในช่วงนี้บริเวณของผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคยังคงมีอยู่ ซึ่งเมื่อพิจารณาตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ แล้วการที่อนุภาคพอลิเมอร์เข้ามารวมตัวกันและเปลี่ยนรูปนั้น เป็นสิ่งที่ควรเป็นไปได้ เนื่องจากมีการลดพื้นที่รวมของบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคกับน้ำหรืออนุภาคกับอากาศ

ค.ขั้นตอนที่ 3

ในขั้นตอนนี้จะมีการแพร่ของสายโซ่พอลิเมอร์จากอนุภาคหนึ่งไปยังอนุภาคข้างเคียงผ่านขอบเขตของแต่ละอนุภาค โดยมีแนวโน้มที่ลักษณะของแต่ละอนุภาคจะหายไป และสังเกตไม่เห็นบริเวณของผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค ซึ่งการแพร่ของสายโซ่พอลิเมอร์ข้ามระหว่างอนุภาคนั้น จะทำให้เกิดการพันกันของสายโซ่ แล้วได้เป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งความแข็งแรงของฟิล์มที่แห้งจะเกี่ยวข้องกับการพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุล และลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ ในระหว่างนี้สมบัติของฟิล์ม เช่น ความแข็งแรงเชิงกล และความสามารถในการซึมผ่านจะเปลี่ยนไป

อย่างไรก็ดี ทั้ง 3 ขั้นตอนของกระบวนการเกิดฟิล์มจากพอลิเมอร์คอลลอยด์นั้นไม่อาจแยกกันได้ชัดเจน และภายในแต่ละขั้นตอนจะมีลักษณะที่ซับซ้อน แตกต่างกันไปในแต่ละระบบ เช่น ในบางกรณีอาจจะต้องพิจารณาปัจจัยจากค่าความแข็งแรงของไอออนซึ่งมีผลต่อการจัดตัว

เป็นระเบียบของอนุภาคในของเหลว และมีผลต่อการเกิดฟิล์มของพอลิเมอร์ รวมทั้งกรณีที่อนุภาคพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้ว หรือมีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุที่ผิว ซึ่งนอกจากจะส่งผลให้คอลลอยด์มีความเสถียร ส่วนที่มีขั้วอาจเป็นชั้นที่หนาเพียงพอที่จะเกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง หรือเมมเบรนขึ้นในฟิล์มที่เกิดขึ้นใหม่ การแตกออกของเมมเบรนนี้ก็จะเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการทำให้ส่วนที่เป็นแกนของอนุภาคเข้ามาใกล้กันจนเกิดการแพร่ของพอลิเมอร์ระหว่างอนุภาคในที่สุด



รูปที่ 2.11 กระบวนการที่อนุภาคพอลิเมอร์คอลลอยด์เปลี่ยนรูปเป็นแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์

แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ในขั้นตอนที่ 1 น้ำระเหยไปจากพอลิเมอร์คอลลอยด์ด้วยอัตราคงที่ทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคพอลิเมอร์มากขึ้นจนกระทั่งอนุภาคเข้ามาชิดกันเกิดเป็นทรงกลมที่แน่นขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 น้ำระเหยออกไปมากขึ้นจึงเห็นอนุภาคปรากฏที่บริเวณผิวด้านที่ติดกับอากาศและอัตราการระเหยของน้ำลดลง เริ่มมีผลของแรงที่ทำให้เปลี่ยนรูปร่างจากอนุภาคทรงกลมเปลี่ยนเป็นรูปเหลี่ยมคล้ายขนมเปียกปูน ขั้นตอนที่ 3 มีการแพร่ของสายโซ่พอลิเมอร์จาก

อนุภาคหนึ่งไปยังอนุภาคข้างเคียง ผ่านขอบเขตของแตละอนุภาค จึงสังเกตไม่เห็นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอนุภาค สายโซ่พอลิเมอร์ที่แพร่ข้ามระหว่างอนุภาคนั้น จะเกิดการพันกันแล้วได้เป็นแผ่นฟิล์ม (Dobler *et al.*,1996)

2.3.3 วิธีการที่พอลิเมอร์คอลลอยด์แห้ง

ดังที่กล่าวไว้ในตอนต้นว่าวิธีการที่ทำให้พอลิเมอร์คอลลอยด์แห้งมีความสำคัญด้วยเหตุผลที่เป็นการกำหนดอัตราการแห้งซึ่งมีความสำคัญทางเทคโนโลยี ตัวอย่างหนึ่งที่อาจสำคัญที่สุดของความต้องการสำหรับการทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว แต่บางกรณีต้องการให้เกิดการแห้งแบบช้าๆ เพื่อเพิ่มช่วงเวลาให้แห้งแล้วปกปิดไม่ให้เห็นรอยตำหนิบนสิ่งที่เคลือบ ซึ่งเมื่อแห้งแล้วจะไม่สามารถทำให้เริ่มกระบวนการแห้งได้ใหม่ หรือทำให้ผิวเรียบได้อีก พบว่าความหนืดมีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการแห้ง ในแต่ระบบจะมีค่าความหนืดวิกฤต หมายถึงความหนืดค่าหนึ่งที่มากกว่าค่านี้จะม่าสามารถทำให้ผิวของฟิล์มเรียบได้ ถ้าเป็นสารละลายพอลิเมอร์ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อตัวทำละลายระเหยออกไปและความเข้มข้นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น โดยน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลมากต่อความหนืดในสารละลาย แต่ในพอลิเมอร์คอลลอยด์นั้นความหนืดยังคงต่ำที่ความเข้มข้นปานกลาง แต่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อปริมาณเนื้อของแข็งสูงกว่า 55 หรือ 65 % โดยปริมาตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของอนุภาค

ในขณะที่น้ำระเหยออกไปจากพอลิเมอร์คอลลอยด์นั้น โมเลกุลของน้ำจะแพร่ผ่านช่องว่างระหว่างรอยต่อของอนุภาคในแผ่นฟิล์ม หรือในบริเวณที่เปียกของแผ่นฟิล์มแล้วซึมทะลุผ่านผิวที่เปียกด้านล่างไปยังด้านที่เริ่มแห้งแล้วในชั้นบน ในระหว่างที่น้ำเคลื่อนที่ก็อาจพาสารที่ละลายได้ในน้ำ เช่น สารลดแรงตึงผิว หรือ โอลิโกเมอร์ จากบริเวณที่เปียกไปยังบริเวณขอบที่ต่อกับบริเวณที่แห้งของฟิล์ม การเคลื่อนที่ของสารเหล่านี้จะมีผลต่อการเรียงแถวของอนุภาค ต่อการกระจายของสารเหล่านั้นในฟิล์ม และต่อโครงสร้างสัณฐานของฟิล์ม ซึ่งทั้งโครงสร้างสัณฐานและการกระจายของสารที่ละลายได้ในน้ำมีผลอย่างยิ่งต่อสมบัติของฟิล์มที่ได้

จากปรากฏการณ์ต่างๆ ทำให้แบ่งลักษณะของการแห้งของพอลิเมอร์คอลลอยด์บนวัสดุรองรับที่ไม่มีรูพรุนได้ 3 แบบ โดยทั้ง 3 แบบ อาจเกิดแยกกันเป็นขั้นตอน หรือเกิดร่วมกันก็ได้ดังต่อไปนี้

ก. การแห้งแบบเป็นเนื้อเดียวกัน

การแห้งแบบเป็นเนื้อเดียวกัน หมายถึง การแห้งในลักษณะที่มีน้ำในปริมาณสม่ำเสมอในระบบตลอดทั้งกระบวนการที่ทำให้แห้ง การแห้งแบบนี้เกิดเนื่องจากระบบพยายามทำให้ความเข้มข้นของน้ำเท่ากันทุกบริเวณในแผ่นฟิล์ม พบว่าพอลิเมอร์คอลลอยด์เจือจางจะแห้งเป็นเนื้อเดียวกันในช่วงแรก เมื่อน้ำระเหยไปแล้วปริมาณของแข็งสูงขึ้นถึงค่าหนึ่ง การกระจายของน้ำจะเกิดขึ้นอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากอัตราการระเหยของน้ำสูงมากในบริเวณผิวหน้า

ในขณะความหนืดของพอลิเมอร์คอลลอยด์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งไม่มีเวลาให้สมดุลของน้ำภายในระบบเกิดขึ้นได้

ข. การแห้งในแนวตั้งฉากกับผิว

การกระจายของน้ำในแผ่นฟิล์มมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน กล่าวคือ ด้านบนของพอลิเมอร์คอลลอยด์ส่วนที่ติดกับอากาศจะแห้งกว่าด้านล่าง กระบวนการแห้งเกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวที่กำลังเริ่มแห้งจากบริเวณนอกสุดที่แห้งมายังชั้นล่างที่ยังคงเปียก ดังรูป 2.12 (a) ซึ่งในชั้นที่มีการแห้งจะเกิดจากการเข้ามาหลอมรวมกันของอนุภาค เนื่องจากชั้นของพอลิเมอร์ที่แห้งนั้นจะเคลือบอยู่บริเวณผิวชั้นนอกสุดของฟิล์ม น้ำในส่วนที่เหลือจึงต้องแพร่ผ่านด้านบนสุดนี้ ถ้าการแพร่ผ่านชั้นนี้เป็นขั้นตอนที่ช้าอัตราการแห้งจะไม่คงที่ แต่จะค่อยๆ ลดลง ตัวอย่างพบได้ในกรณีการแห้งของอิมัลชันของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง 84 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเกิดการเชื่อมขวางสายโซ่ทำให้มีโครงสร้างเป็นร่างแหขณะที่กำลังแห้ง อย่างไรก็ดี ในกลไกการแห้งในแนวตั้งฉากนี้การแพร่ผ่านชั้นบนสุดมักไม่ใช่ขั้นตอนที่ช้า และอัตราการแห้งจะคงที่ในช่วงที่นาน เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะรักษาสมดุลความเข้มข้นของน้ำระหว่างด้านบนและด้านล่าง จึงทำให้น้ำจากด้านล่างไปยังด้านบนเสมอ ดังนั้น ฟิล์มทั้งแผ่นจึงแห้งได้

ผลที่ได้จากการแห้งในลักษณะนี้คือ ส่วนประกอบอื่นที่ละลายน้ำได้ เช่น สารลดแรงตึงผิว ซึ่งมักจะคงอยู่ในน้ำมากที่สุดเท่าที่จะทำได้นั้น จะเคลื่อนที่ไปยังผิวสัมผัสของฟิล์มและวัสดุรองรับ การสะสมของสารเหล่านั้นจำนวนมากที่ผิวสัมผัสดังกล่าว จะมีผลอย่างยิ่งต่อสมบัติของฟิล์ม โดยเฉพาะสมบัติการยึดติด

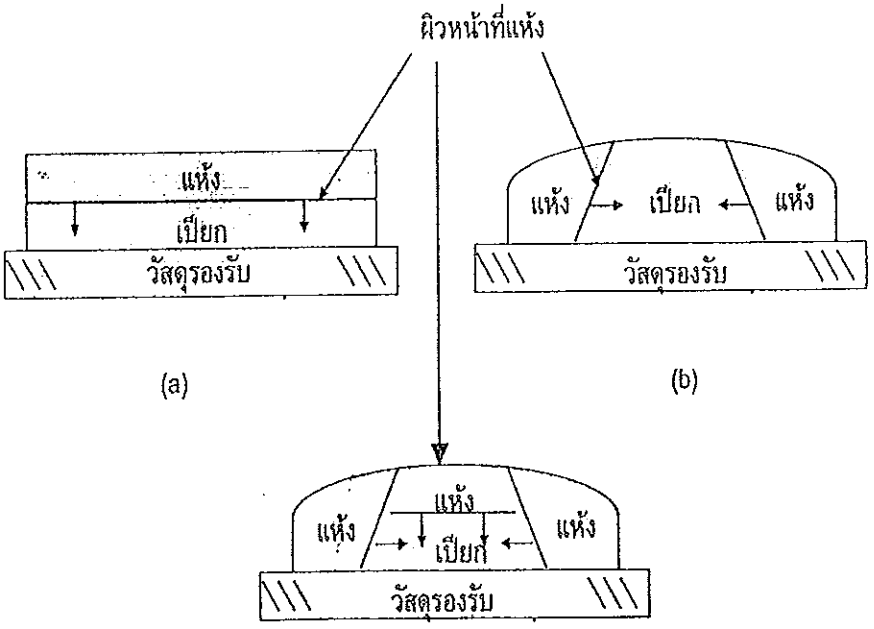
ค. การแห้งในแนวด้านข้าง

การแห้งในแนวด้านข้าง หมายถึงบริเวณด้านข้างของคอลลอยด์จะเริ่มแห้งก่อนตรงกลาง แล้วการแห้งด้านในจะเกิดต่อไปในทิศทางที่ขนานกับวัสดุรองรับ ดังรูป 2.12 (b) จึงปรากฏพื้นที่ที่แห้ง และมีบริเวณแผ่ขยายในด้านที่ขนานกับตัวรองรับ ปริมาณน้ำส่วนที่ใกล้กับบริเวณขอบจะน้อยลง การที่น้ำเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างนี้ จึงสามารถพาอนุภาคไปยังด้านข้างได้ด้วย ตัวอย่างเช่น การทำให้หยดกาแฟแห้ง ซึ่งรอยเปื้อนของกาแฟที่แห้งมีขอบดำมากกว่าบริเวณตรงกลางเนื่องจากอนุภาคเคลื่อนไปที่ขอบด้วยการพาของน้ำในแนวที่ขนานกับผิวหน้า เช่นเดียวกับที่พบในกรณีของอนุภาคพอลิสไตรีนในลาเทกซ์ที่เจือจาง

ในการศึกษาฟิล์มที่เกิดขึ้นจากลาเทกซ์อะคริลิกที่แผ่อยู่บนวัสดุรองรับ พบว่ามี 3 บริเวณที่แตกต่างกันในลาเทกซ์ที่กำลังจะแห้ง ได้แก่ บริเวณตรงกลางซึ่งเปียกซึ่งขุ่น และบริเวณรอบๆ ที่แห้งมองดูแล้วใส และบริเวณที่อยู่ระหว่าง 2 บริเวณแรกที่มีความขุ่นบ้าง ในกรณีที่ลาเทกซ์มีโครงสร้างสัณฐานแบบคอร์-เชลล์ ที่มีแกนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำและส่วนเปลือกเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ พบว่า ช่องว่างระหว่างอนุภาคค่อนข้างคงที่ขณะที่ฟิล์มเริ่มแห้ง แม้ว่าสัดส่วนปริมาตรของพอลิเมอร์โดยรวมจะเพิ่มขึ้นเพราะน้ำระเหยออกไปก็ตาม เมื่อถึง

ช่วงเวลาหนึ่งช่องว่างระหว่างอนุภาคจึงจะลดลงอย่างรวดเร็ว และพบว่า เมื่อเกิดการแห้งนั้น พื้นที่บริเวณตรงกลางที่ขุ่นจะลดลงและจะเป็นส่วนที่แห้งช้าที่สุด ดังนั้นส่วนประกอบอื่นที่ละลายน้ำได้ จึงรวมอยู่บริเวณตรงกลางของแผ่นฟิล์ม เมื่อฟิล์มแห้งบริเวณตรงกลางของฟิล์มจึงมีส่วนประกอบที่ละลายได้ในน้ำนั้นในความเข้มข้นที่สูงกว่าบริเวณอื่น

ในความเป็นจริง วิธีที่พอลิเมอร์คอลลอยด์แห้งมักแยกออกจากกันได้ไม่ชัดเจน ในลาเทกซ์เจือจางซึ่งอนุภาคมีระยะห่างโดยเฉลี่ยค่อนข้างมาก การแห้งจะเริ่มอย่างเป็นเนื้อเดียวกัน คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของน้ำยังคงเป็นเนื้อเดียวกันขณะหนึ่ง จากนั้นบริเวณขอบจะเริ่มแห้งแล้วจึงแห้งถัดเข้ามาในบริเวณด้านในในแนวขนานกับผิว สันนิษฐานว่าความเข้มข้นของพอลิเมอร์ในช่วงเวลานี้ยังคงที่ อย่างไรก็ดี การแห้งจากบริเวณผิวหน้าด้านบนกับผิวลงมาในแนวตั้งฉากกับผิว และจากบริเวณริมซ้ายขวาด้านข้างเข้ามาในแนวที่ขนานกับผิว จะเกิดขึ้นพร้อมกันในระบบ ดังรูป 2.12 (c)



รูปที่ 2.12 ลักษณะการแห้งของพอลิเมอร์คอลลอยด์บนวัสดุรองรับที่ไม่มีรูพรุน

กระบวนการแห้งเกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวที่กำลังเริ่มแห้ง จากบริเวณนอกสุดที่แห้งมายังชั้นล่างที่ยังคงเปียก (b) การแห้งเริ่มจากด้านข้าง 2 ด้านแล้วค่อยๆ แห้งต่อมาในทิศทางด้านขนานกับวัสดุรองรับ (c) ในทางปฏิบัติ การแห้งจากด้านบนที่ตั้งฉากกับผิว และจากด้านข้างที่ขนานกับผิวเกิดขึ้นพร้อมกันในระบบ (F.Dobler and Y. Holl, 1996)

2.3.4 อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์ม

ขั้นตอนการเปลี่ยนรูปของอนุภาคมักได้จากการแปรผลจากการวัดอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์ม หรือค่าเอ็มเอฟที (Minimum film formation, MFT) ซึ่งหมายถึง อุณหภูมิต่ำสุดที่ลาเทกซ์เริ่มเกิดเป็นแผ่นฟิล์ม เนื่องจากมีการระเหยของน้ำแล้วทำให้อนุภาครวมตัวติดกันเป็นแผ่นบาง อุณหภูมินี้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนจากฟิล์มขุ่นหรือแตกร้าว ไปเป็นฟิล์มที่แห้งและยึดติดกันได้ดี

ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์มเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ในคอลลอยด์แต่ละระบบโดยขึ้นกับปัจจัย อาทิ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ส่วนประกอบและหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ แรงตึงผิวของอนุภาค ชนิดและปริมาณของสารลดแรงตึงผิว และโครงสร้างสัณฐานของอนุภาคพอลิเมอร์ เป็นต้น ดังนั้น จึงสามารถนำค่าของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์มไปใช้ประโยชน์ในการอธิบายกลไกการแห้งของฟิล์ม ตรวจสอบการโตของอนุภาค และศึกษาโครงสร้างสัณฐานของอนุภาคพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น เมื่อเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์คอลลอยด์ที่มีโครงสร้างสัณฐานแบบคอร์-เชลล์ ที่มีอนุภาคยางเป็นส่วนแกนและมีพลาสติกเป็นส่วนของเปลือกนอก พบว่าจะมีค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์มที่มีค่าสูง และให้ฟิล์มที่แข็งเปราะที่มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มพลาสติก ในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์มในกรณีที่อนุภาคมีพลาสติกเป็นอนุภาคแกนและมียางเป็นส่วนของเปลือกนอกจะมีค่าต่ำกว่า และฟิล์มจะแสดงลักษณะใกล้เคียงกับฟิล์มที่เป็นยาง

วิธีการวัดอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์มทำได้โดยแผ่ลาเทกซ์เป็นชั้นบางๆ ลงบนแผ่นโลหะผิวเรียบ ที่ด้านข้างของแผ่นโลหะนั้นเจาะช่องเล็กๆ ไว้ข้างใน(ขนานกับผิวโลหะ) เป็นระยะๆ (เช่นทุกๆ 5 มิลลิเมตร) เพื่อใส่ลวดยาวของเครื่องมือสำหรับวัดอุณหภูมิ (thermocouple) แล้วผ่านน้ำร้อน หรือผ่านน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง เข้าที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นโลหะ ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะผ่านน้ำเย็น หรือ อากาศที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อทำให้แผ่นโลหะมีความแตกต่างของอุณหภูมิลดหลั่นไป (temperature gradient) เช่น ประมาณ 10 – 130 $^{\circ}$C เมื่อทิ้งให้น้ำระเหยไปจากลาเทกซ์ ในภาวะที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ และอากาศที่ไหลผ่าน จะอ่านค่าของอุณหภูมิต่ำสุดที่เกิดฟิล์มได้จากการวัดอุณหภูมิบริเวณที่ได้ฟิล์มใสลักษณะเป็นเนื้อเดียว ซึ่งถ้าปรับความแตกต่างของอุณหภูมิให้เหมาะสมและลดหลั่นไปอย่างละเอียด จะสามารถวัดอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์มได้โดยมีความคาดเคลื่อนน้อย ($\pm$2 $^{\circ}$C)

2.3.5 ทฤษฎีการเกิดฟิล์มจากพอลิเมอร์คอลลอยด์

ในทั้ง 3 ขั้นตอนของกระบวนการเกิดฟิล์มพอลิเมอร์จากพอลิเมอร์คอลลอยด์นั้น พบว่าขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ โดยมีทฤษฎีต่างๆ อธิบายไว้อย่างกว้างขวาง แม้ว่าทุกๆ ทฤษฎียังมีความซับซ้อน โดยแต่ละทฤษฎีนั้นล้วนได้มาจากการพยายามอธิบายผลการทดลอง ซึ่งขึ้นกับธรรมชาติของลาเทกซ์ และภาวะการเกิดฟิล์มก็ตาม แต่โดยหลักการแล้วทุก

ทฤษฎีมาจากการพิจารณาการเปลี่ยนรูปของอนุภาคในขณะที่มี หรือไม่มีน้ำ ตัวอย่างของทฤษฎีการเกิดฟิล์มจากพอลิเมอร์คอลลอยด์ที่สำคัญ ได้แก่ การบีบอัดแบบแห้ง (dry sintering) ทฤษฎีคะปิลลารี การบีบอัดแบบเปียก และชั้นของผิว เป็นต้น

ก. ทฤษฎีการบีบอัดแบบแห้ง

หลักการของทฤษฎีนี้เป็นการศึกษาบทบาทของน้ำในขั้นตอนของการเปลี่ยนรูปของอนุภาค โดยอธิบายผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์มจากคอลลอยด์ที่ประกอบด้วยอนุภาคของพอลิเมอร์หลายชนิด ทั้งพอลิเมอร์ประเภทที่ไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิเมอร์ร่วมของเอทิล อะซีเตท-สไตรีน และบิวทิล อะคริเลต-สไตรีน หรือโฮโมพอลิเมอร์ของบิวทิล เมทาคริเลท และพอลิเมอร์ประเภทที่ชอบน้ำมากขึ้น เช่น เอทิล อะคริเลต หรือพอลิเมอร์ร่วมของบิวทิล อะคริเลท-เมทิล เมทาคริเลต ซึ่งในทุกระบบของพอลิเมอร์คอลลอยด์ที่กล่าวมาข้างต้น ภายในอนุภาคจะมีกรดอะคริลิก 1 % โดยน้ำหนักเป็นส่วนประกอบ และมีสารลดแรงตึงผิวปะปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ในการทดลองได้เตรียมฟิล์ม 2 แบบ คือ แบบที่ 1 แผ่ลาเทกซ์ลงบนภาชนะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ T_g ของพอลิเมอร์อย่างมากเพื่อไม่ให้อนุภาคพอลิเมอร์เปลี่ยนรูป จากนั้น จึงให้ความร้อนแก่แผ่นดังกล่าว แล้วทิ้งให้ลาเทกซ์ที่เปียกมากนั้นแห้งในลักษณะฟิล์ม ขณะทำการทดลองสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบๆ จะแห้งโดยมีการไหลของอากาศแห้งในปริมาณมากเหนือแผ่นฟิล์ม หรือมีความชื้นโดยเปิดสู่ภาวะปกติที่อาจมีความชื้นสัมพัทธ์ 65 % ที่ 25 ^{o}C ส่วนแบบที่ 2 เป็นการวัดค่าอุณหภูมิที่ใช้เพื่อให้เกิดฟิล์มโดยแผ่ลาเทกซ์ลงไปและทำให้แห้งบนแผ่นรองรับที่จัดให้มีความแตกต่างกันของอุณหภูมิลดหลั่นกันไป ผลของการวัดค่าอุณหภูมิที่ใช้เพื่อให้เกิดฟิล์ม (ขึ้นกับธรรมชาติของพอลิเมอร์ เวลา ขนาดอนุภาค และปริมาณน้ำทั้งในฟิล์มที่เกิดและในสิ่งแวดล้อมของการทำให้แห้ง) พบว่า ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์มเปียกของพอลิเมอร์ประเภทที่ไม่ชอบน้ำที่วัดได้ภายใต้ภาวะที่เปียกมากมีค่าเท่ากับค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟิล์มแห้งที่วัดภายใต้ภาวะที่แห้งมาก กล่าวคือ น้ำไม่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการนี้ การเกิดฟิล์มสามารถแยกได้ใน 2 ส่วนที่เป็นอิสระต่อกัน ได้แก่ การระเหยของน้ำและการเปลี่ยนรูปของอนุภาคเมื่อแห้ง ซึ่งการเปลี่ยนรูปของอนุภาคตรวจสอบได้จากแรงตึงผิวระหว่างอนุภาคกับอากาศ และแรงดึงดูดชนิดวันเดอร์วาลล์ระหว่างอนุภาค

จากทฤษฎีนี้ สรุปว่า ปัจจัยหลักที่มีความสำคัญ ก็คือ ตำแหน่งของอุณหภูมิ T_g เทียบกับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดฟิล์ม เมื่อเกิดฟิล์มขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ T_g มาก การระเหยของน้ำและการเปลี่ยนรูปของอนุภาคจะเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยที่การระเหยของน้ำเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตรา แต่เมื่ออุณหภูมิ T_g ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดฟิล์ม การระเหยของน้ำจะไม่เป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราอีกต่อไป แต่จะเป็นขั้นตอนการเปลี่ยนรูปของอนุภาคแทน อีกนัยหนึ่งคือน้ำจะระเหยไปก่อนแล้วอนุภาคจึงจะเปลี่ยนรูปไปเนื่องจากความตึงผิวของพอลิเมอร์

ข. ทฤษฎีคะปิลลารี

ทฤษฎีนี้เป็นผลมาจากการวัดรัศมีของรอยต่อระหว่างอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณโดยใช้แรงคะปิลลารี และแรงตึงผิว พบว่า ค่าที่คำนวณโดยคิดเฉพาะแรงจากคะปิลลารีอย่างเดียวนั้นมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการทดลองมาก กล่าวคือ การพิจารณาเฉพาะผลจากแรงคะปิลลารีอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันเป็นฟิล์มเรียบ จะต้องพิจารณาผลจากแรงตึงผิวระหว่างอนุภาคกับน้ำประกอบด้วย อย่างไรก็ดี แรงคะปิลลารีเป็นปัจจัยที่สำคัญกว่า เนื่องจากพบว่าการเปลี่ยนรูปของอนุภาคขณะเปียกเกิดขึ้นเร็วเป็น 10 เท่า ของอนุภาคแห้งซึ่งความแตกต่างนี้ก็มาจากผลของแรงดันคะปิลลารีที่เกิดจาการมีน้ำผ่านช่องเล็กๆ ระหว่างอนุภาค เมื่อคำนวณแรงดันคาปิลลารีและแรงในกรณีที่มีน้ำปริมาณต่างๆ และค่ามุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพอลิเมอร์ พบว่าแรงดันคะปิลลารี และแรงต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณน้ำ และเข้าสู่ค่าที่สูงมาก จนกระทั่งน้ำไม่มีผลในบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคทรงกลม

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์คอลลอยด์ที่ประกอบด้วยอนุภาคพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิ T_g สูง หรืออนุภาคแข็ง กับพอลิเมอร์คอลลอยด์ที่ประกอบด้วยอนุภาคพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิ T_g ต่ำหรืออนุภาคนิ่ม พบว่า ถ้าอนุภาคใน 2 ระบบนี้มีขนาดเท่าๆ กัน ลาเทกซ์ที่มีอนุภาคแข็งจะแห้งเร็วกว่าลาเทกซ์ที่มีอนุภาคนิ่ม อธิบายได้ว่าเกี่ยวข้องกับขนาดของการขนส่งคะปิลลารีของน้ำที่ผิวสัมผัสระหว่างส่วนที่เปียกและแห้ง กล่าวคือ ในระหว่างการทำให้แห้งนั้นอนุภาคพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิ T_g สูง จะไม่เปลี่ยนรูปไปที่อุณหภูมิห้อง เมื่อน้ำระเหยออกไปจะทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคเล็กลง โครงสร้างของช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ยังคงเหลือจึงชักนำให้น้ำจากบริเวณที่เปียกเข้าไปในบริเวณที่มีพื้นที่ผิวสูงมากของฟิล์ม ในขณะที่การเปลี่ยนรูปของอนุภาคที่นิ่มนั้นจะนำไปสู่คะปิลลารีขนาดเล็กกว่าการลดการไหลของน้ำ ถ้าระบบมีสารลดแรงตึงผิวซึ่งจะเกิดเป็นวัฏภาคต่อเนื่องที่ชอบน้ำก็จะยิ่งมีผลอย่างมากต่อคะปิลลารีของอนุภาคนิ่มมากกว่ากับอนุภาคแข็งที่มีช่องระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่กว่า ในกรณีของลาเทกซ์ผสมระหว่างอนุภาคพอลิเมอร์ที่แข็งกับนิ่ม พบว่า อนุภาคของพอลิเมอร์นิ่มสามารถเปลี่ยนรูปเพื่อเข้าไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคที่แข็ง โดยที่สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคแข็งต่ำๆ นั้นอนุภาคแข็งจะขัดขวางการแพร่ของน้ผ่านคะปิลลารีของอนุภาคนิ่ม ซึ่งการขัดขวางดังกล่าวจะลดการแพร่หรือการไหลแบบคะปิลลารีโดยการเพิ่มความคดเคี้ยวของทางเดิน แต่ถ้าสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคแข็งสูงขึ้น อนุภาคของพอลิเมอร์ที่นิ่มจะไปอุดรูระหว่างอนุภาคแข็งทำให้เป็นอุปสรรคต่อการไหลของน้ำและทำให้อัตราการแห้งช้าลงกว่าเมื่อมีแต่อนุภาคที่แข็งเท่านั้น

ค. ทฤษฎีการบีบอัดแบบเปียก

ทฤษฎีนี้ได้จากการทดลองโดยเพิ่มความเข้มข้นเพื่อให้อนุภาคลาเทกซ์เกาะกันเป็นกลุ่มในถุงไดอะไลซีส (dialysis) เริ่มจากปริมาณเนื้อของแข็งของกลุ่มอนุภาคที่เกาะรวมกันมีค่า 62.3 % แล้วเอากลุ่มอนุภาคที่เกาะรวมกันนั้นออกจากถุงไปใส่ในน้ำที่ปราศจากไอออนเป็นเวลา 2

ชั่วโมง ที่ 36 °C ก่อนจะนำมาหาปริมาณเนื้อของแข็งโดยการชั่งน้ำหนัก ซึ่งพบว่าได้ 84.8 % และเมื่อให้ความร้อนที่ 50 °C ต่อไปอีก 2 ชั่วโมง ปริมาณเนื้อของแข็งจะเพิ่มเป็น 87.2 % แต่ถ้าใส่กลุ่มอนุภาคที่เกาะรวมนั้นลงไปในสารละลาย 1 % ของสารลดแรงตึงผิว แทนที่จะเป็นน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่ 36 °C ปริมาณเนื้อของแข็งเพิ่มได้เพียง 66.2 %

ผลจากข้อมูลดังกล่าว อธิบายได้ว่าแรงตึงผิวระหว่างพอลิเมอร์กับน้ำทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของอนุภาคได้ แม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ T_g โดยจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนรูปสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับแรงตึงผิว กล่าวคือ อัตราจะลดลงเมื่อแรงตึงผิวลดลง ผลดังกล่าวพิสูจน์ได้โดยใช้อนุภาคที่มีลักษณะคอร์-เชลล์ที่มีขนาดเท่ากัน มีสมบัติเหมือนกัน ต่างกันเฉพาะที่ลักษณะที่ผิว เช่น ให้มีกรดเมทาคริลิกในส่วนเปลือกของอนุภาคเพิ่มขึ้น หรือให้มีสารลดแรงตึงผิวบนอนุภาคแตกต่างกัน

ง. ทฤษฎีชั้นของผิว

ทฤษฎีนี้มาจากการศึกษากระบวนการเกิดฟิล์มภายใต้ภาวะมาตรฐานที่มีการระเหยของน้ำ เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ของการเกิดฟิล์มในน้ำเมื่อน้ำระเหยไปพร้อมกัน แล้วหาภาวะจำกัดของการเกิดฟิล์มในเทอมของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ พบว่า ภายใต้ภาวะจำกัดที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดนั้น แรงตึงผิวระหว่างอนุภาคกับน้ำเกือบจะไม่มีผลต่อกลไกการเกิดฟิล์มจากลาเทกซ์ โดยเมื่อการเกิดฟิล์มและการระเหยของน้ำเกิดพร้อมกัน การระเหยของน้ำจะเป็นแหล่งกำเนิดแรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของอนุภาคซึ่งอาจไม่ใช่แรงคะปิลลารี เมื่อน้ำระเหยไปอนุภาคพอลิเมอร์จะเข้ามาสัมผัสกันในลักษณะที่ผันกลับไม่ได้ และอนุภาคทรงกลมที่สัมผัสกันเหล่านั้นก็จะเปลี่ยนรูปไป เกิดเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผิวชั้นนอกก่อน โดยการทำให้ฟิล์มทั้งหมดแห้งจะเกิดได้โดยการแพร่ของน้ำผ่านชั้นของผิวดังกล่าว เพื่อรักษาสมดุลของปริมาณน้ำ และเมื่อสัดส่วนปริมาตรของของแข็งมีค่าถึง 0.74 ก็จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปของอนุภาคทั้งระบบ

2.4 การปรับปรุงผิวพอลิเมอร์

การปรับปรุงผิวของพอลิเมอร์ เช่น ยางธรรมชาติเพื่อเป็นการหาวิธีแก้ไขโปรตีนตกค้างอยู่ในยางธรรมชาติซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดอาการแพ้ต่อผู้ใช้ แก้ไขเรื่องความลื่น การยึดติดกันระหว่างผิวยาง และความไม่สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ (biocompability) ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาเพื่อดัดแปรผิวยางธรรมชาติจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อแก้ข้อด้อยของยางธรรมชาติดังกล่าว การดัดแปรยางธรรมชาติที่มีข้อด้อยให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยในส่วนของการดัดแปรผิวยางธรรมชาติจะกล่าวเป็นภาพรวมของการปรับปรุงผิวพอลิเมอร์ โดยในหัวข้อนี้จะแบ่งรายละเอียดเป็น 1) วิธีในการปรับปรุงผิวพอลิเมอร์ และ 2) พอลิยูรีเทน

2.4.1 วิธีในการปรับปรุงผิวพอลิเมอร์

วิธีการต่างๆในการปรับปรุงผิวพอลิเมอร์มีหลายวิธีดังนี้

1. การใช้เปลวไฟ (Flame treatment)
2. การใช้โลหะเคลือบ (Metal deposition)
3. การใช้สารเคมี (Chemical treatment)
4. การใช้โคโรน่า (Corona discharge)
5. การใช้รังสี (Irradiation)
6. การกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน (Graft copolymerization)

2.4.1.1 Flame treatment

เป็นวิธีการเก่าที่สุดของพลาสมา (plasma) เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ปรับปรุงผิวของพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มความเป็นขั้ว (hydrophilic) ให้กับพื้นผิวของพอลิเมอร์ แม้จะเป็นวิธีการที่ง่ายแต่ก็ต้องมีความชำนาญจึงจะได้ผลดี การออกซิเดชั่นที่ผิวของพอลิเมอร์จากการทำ flame treatment ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชั่นต่างๆมากมาย เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอนิล (=C=O) และคาร์บอกซิล (-COOH, -COOR) การเกิดออกซิเดชั่นที่ผิวเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์อื่น จากการกระตุ้นโดยไฟ ประสิทธิภาพของ flame treatment ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอากาศกับก๊าซ อัตราการให้อากาศกับก๊าซ ระยะห่างระหว่างไฟกับวัตถุ ระยะเวลาในการทำ flame treatment และชนิดของก๊าซ ข้อด้อยของเทคนิคนี้คือมีข้อจำกัดใช้ได้กับวัตถุขนาดเล็กและผู้ใช้ต้องมีทักษะและความชำนาญในการทดลอง (Sutherland *et al.*, 1991)

2.4.1.2 Metal deposition

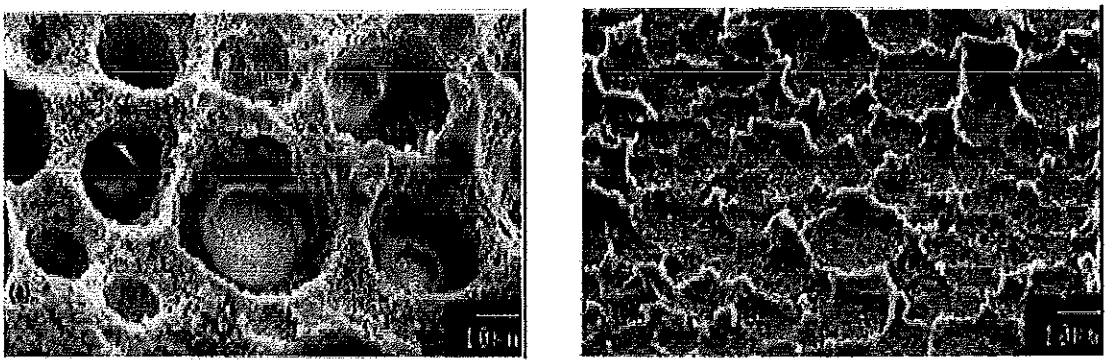
การใช้โลหะเคลือบสามารถช่วยในการปรับปรุงผิว เช่น การนำไฟฟ้า วิธีการนี้เริ่มต้นพัฒนาต้นทศวรรตที่ 70 และยังคงใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม โดยทั่วไปมี 2 วิธีการใหญ่ๆ (Mittal and Susko, 1991) คือ electroless plating และ vacuum deposition การเคลือบโลหะโดย electroless plating แตกต่างจาก electro plating การให้อีเล็คตรอนโดยวิธี electroless plating ใช้ chemical reducing agent ในรูปของสารละลาย ขณะที่ electroplating ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานจากภายนอก เช่น แบทเตอรี่ นอกจากนี้ electroless plating สามารถประยุกต์ใช้กับสารที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น พอลิเมอร์และเซรามิคซ์

เทคนิค Vacuum deposition ที่ใช้กันมากที่สุดคือ การทำให้ระเหยเป็นไอ (evaporation) และการพ่น (sputtering) วิธีการทำให้ระเหยเป็นไอ ให้ความร้อนแก่โลหะโดย electron beam ไปเคลือบบนผิว ระบบนี้กระทำภายใต้สภาวะสุญญากาศ (ระหว่าง 10^{-5} – 10^{-6}

ทอร์) และอัตราการให้โลหะตั้งแต่ 100 – 250000 อังสตรอมต่อนาที แม้ว่าวิธีการนี้จะเยี่ยมยอด แต่ทำในสภาวะสุญญากาศทำให้มีราคาแพง จึงประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่านั้น

2.4.1.3 Chemical treatment

เป็นวิธีการที่ใช้กันมากโดยทั่วไปในการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์ วิธีการนี้ทำได้ตั้งแต่ทำให้ผิวเรียบเป็นพอลิเมอร์ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic polymer) จนไปถึงการทำให้ผิวมีลักษณะขรุขระเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic polymer) โดยการออกซิเดชั่นที่ผิวและสลายตัวในส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ดังรูปที่ 2.13 การปรับปรุงผิวโดยวิธีนี้นิยมใช้กับวัตถุในปริมาณมากที่ไม่สามารถปรับปรุงผิวโดยวิธีการอื่นได้ในอุตสาหกรรม วิธีการขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปใช้กรดแก่ เช่น กรดโครมิค (Lee and McCarthy, 1988)

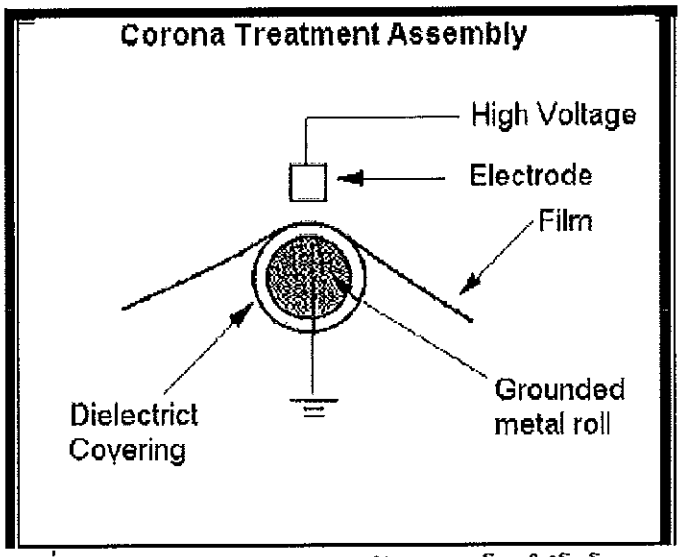


a b

รูปที่ 2.13 การปรับปรุงผิวด้วยกรดซัลฟูริค a) poly(sulfone) b)poly(ether ketone) (Franchina and McCarthy, 1991)

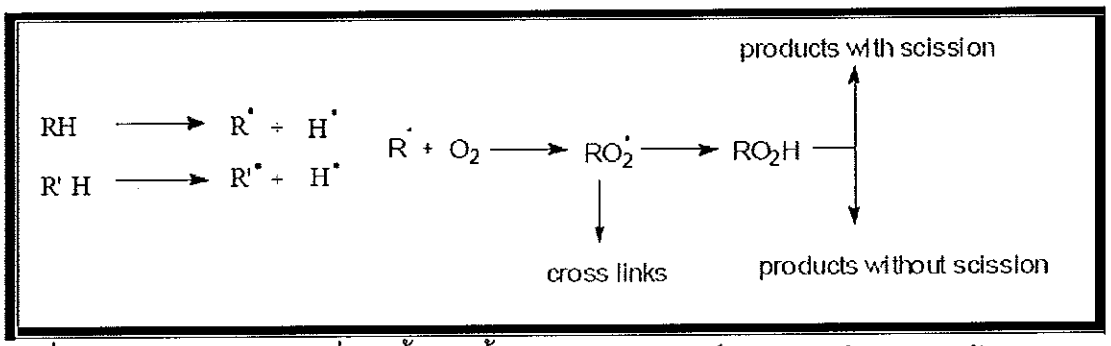
2.4.1.4 Corona discharge

เป็นวิธีการที่เป็นที่ยอมรับเป็นอย่างดีในการปรับปรุง แผ่นฟิล์มพอลีโอลีฟิน (Lanauze and Myers, 1990) ในโรงงานอุตสาหกรรม เทคนิคนี้ใช้เป็นหลักในอุตสาหกรรมพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความสามารถในการเกิดติดสี (Briggs and D. M. Brewis, 1981) และความสามารถในการเกาะติด (Briggs and Kendall, 1982) ของ แผ่นฟิล์มพอลีโอลีฟิน และวัสดุอุปกรณ์ในการทำ corona treatment ง่ายและคุ้มค่า ประกอบด้วย แหล่งให้ความต่างศักย์และความถี่สูง ขั้วไฟฟ้า และลูกกลิ้งโลหะที่เคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงการปรับปรุงผิวโดยใช้โคโรน่า (Owens, 1975)

การปรับปรุงผิวด้วย corona discharge ทำให้สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของพื้นผิวของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะกับวัสดุอื่นๆง่ายขึ้น จำนวนของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของพอลิเมอร์จากการปรับปรุงผิวด้วย corona discharge ขึ้นกับ อีเล็คตรอน ไอออน excited neutrals และโฟตอน ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ โดยอนุมูลอิสระนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (Strobel *et al.*, 1989) แสดงได้ใน รูปที่ 2.15 การสลายตัวของหมู่ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิด >C-OH >C=O -COOH ที่ผิวจากการปรับปรุงด้วย corona discharge (Briggs and Kendall, 1982) อย่างไรก็ตามการตัดสายโซ่ทำให้พอลิเมอร์ที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำเกิดการออกซิไดซ์ (Gerenser *et al.*, 1983)



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของพอลิเมอร์จากการปรับปรุงผิวด้วย corona discharge (Briggs and Kendall, 1982)

2.4.1.5 Irradiation

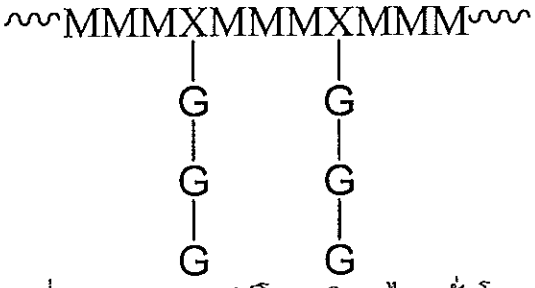
การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiations) เป็นวิธีการที่ง่ายโดยมีวิธีการ 3 วิธีของการให้พลังงานคือ การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง (High-energy radiation) ได้จากรังสีเอ็กซ์ (X-rays) รังสีแกมมา (γ-rays) และ แหล่งให้อีเล็คตรอน (electron beam) จากโคบอลต์ (^{60}Co) และแมกนีเซียม (^{58}Mg) การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานระดับกลาง (Mid-energy radiation) โดยปกติได้จากรังสียูวี (UV rays) (Ranby and Rabek, 1975) แหล่งพลาสมา (plasma sources) (Klemberg-Sapieha *et al.*, 1992) (โดยการใช้ไมโครเวฟ/ความถี่คลื่นวิทยุ) และการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานระดับต่ำ (low-energy radiation) จากอินฟาเรด (infra-red) อุลตราโซนิค (ultrasonic) ไมโครเวฟ (microwave) และรังสียูวี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแกนหลักของพอลิเมอร์ ซึ่งขึ้นกับระยะเวลาในการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (irradiation time) และพลังงานของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อันดับแรกของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนพอลิเมอร์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันอื่นเพื่อทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของพอลิเมอร์

Toth และคณะ (1999) ศึกษาการดัดแปรพื้นผิวของพอลิเอทิลีนโดยใช้แหล่งกำเนิดไอออน(keV ion beams) โดยใช้พอลีเอทิลีนชนิด ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) และ linear polyethylene (LPE) ทำการปรับปรุงโดยใช้แหล่งกำเนิดไอออนต่ำของ H_2^+, He^+ และ N_2^+ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพื้นผิวของพอลิเมอร์ตรวจสอบโดยใช้ FTIR และ XPS การปรับปรุงผิวโดยใช้ไอออน N_2^+ ทำให้ไนโตรเจนไปติดบนพื้นผิว ปริมาณไนโตรเจนบนพื้นผิว ~11 atm % ที่ปริมาณการใช้ไอออน ~1017 ไอออน/ตารางเซนติเมตร

Ranby (1994) ทำการการดัดแปรผิวของพอลีเอทิลีนที่ผ่านมา โดยประสบความสำเร็จในการดัดแปลงผิวของพอลิเอทิลีนโดยใช้แสง (photochemical) เหนี่ยวนำหมู่ซัลโฟนิค (sulfonic acid) พอลิเอทิลีนจากการใช้แสงยูวีในบรรยากาศที่มี SO_2 และอากาศเพื่อให้เกิด photosulfonation บนพื้นผิว พบว่าความเสถียรต่อการเปียกเป็นผลจาก hydrophobic recovery ซึ่งเป็นเพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของพื้นผิว ขณะที่การเกิด hydrophobic recovery อย่างถาวรเนื่องจากพื้นผิวเกิดการเชื่อมโยง และเกิด oligomers

2.4.1.6 Graft copolymerization

วิธีการนี้เป็นที่นิยมในการดัดแปรพื้นผิวของพอลิเมอร์เมื่อไม่นานมานี้ (Razzak *et al.*, 1993) การกราฟต์โคพอลิเมอร์คือ การรวมกันของโมเลกุลของพอลิเมอร์กับหมู่ฟังก์ชันอื่นที่เป็นบล็อกมาเชื่อมเป็นโซ่กิ่ง (side chains) บนสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่นโดยทั่วไป

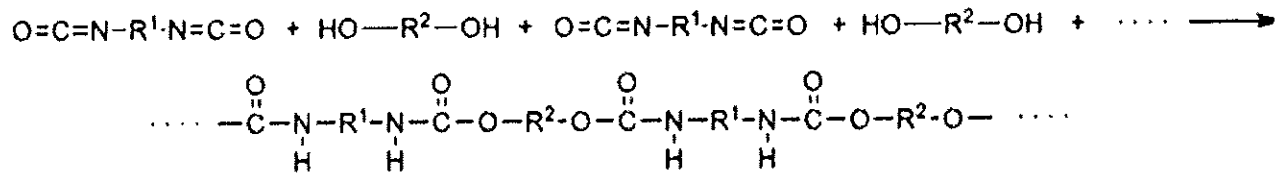
โดย M หน่วยของโมโนเมอร์ในแกนหลักของพอลิเมอร์ และ G สายโซ่ที่มากราฟต์ และ X หน่วยในแกนหลักของพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการกราฟต์ การกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่นโดยปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free-radical mechanism) (Lutfor *et al.*, 2000) และการเกิดปฏิกิริยาแบบไอออนิก (ionic mechanism) (Tsubokawa and Naitoh, 1999) กลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบต่างๆ ประกอบด้วยการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการกราฟต์ การกราฟต์โดยใช้แสง การกราฟต์โดยใช้พลาสมา ขณะที่ต่อมามีพัฒนาการกราฟต์โดยใช้ระบบรีดือก

2.4.2 พอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทน (polyurethane, PU) เป็นสารพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยหน่วยชีวเคมีของการเชื่อมต่อของยูรีเทน พอลิเมอร์ของพอลียูรีเทนประกอบขึ้นจากโมโนเมอร์อย่างน้อยสองชนิด วัสดุที่พอลียูรีเทนเป็นส่วนประกอบขึ้นอยู่กับลักษณะของคุณสมบัติ ทั้งทางด้านความเหนียว ความแข็ง และความหนาแน่น เช่น

- โฟมอ่อนความหนาแน่นต่ำ ใช้ในส่วนประกอบของเตียง
- โฟมแข็งความหนาแน่นต่ำ ใช้สำหรับทำฉนวนใช้ในรถยนต์
- อีลาสโตเมอร์อ่อน ใช้สำหรับในพวกแผ่นยาง
- พลาสติกแข็ง ใช้สำหรับทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

โครงสร้างทางเคมีของพอลียูรีเทน สามารถเขียนได้ดังนี้

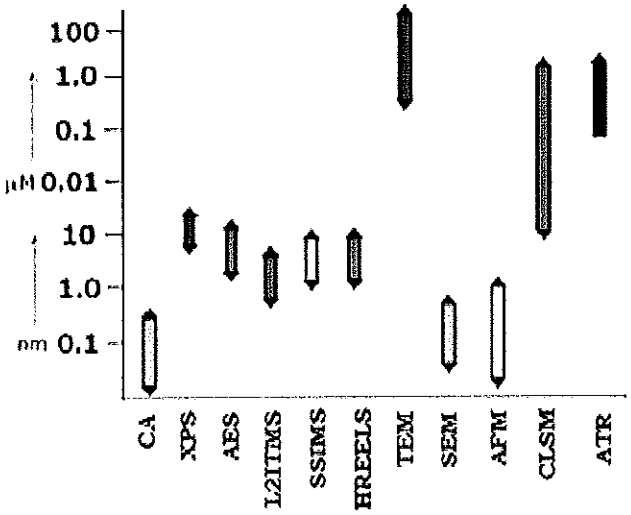


รูปที่ 2.17 โครงสร้างทางเคมีของพอลียูรีเทน

ในการเคลือบสีเฟอร์นิเจอร์ไม้ สีโพลียูรีเทนนิยมถูกนำมาใช้ เนื่องจากทนต่อการขูดขีดและทนต่อสารเคมีได้ดี เนื้อฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความแข็งและเหนียวทำให้ทนต่อการขัดสี เหมาะสำหรับเฟอร์นิเจอร์ที่มีการสัมผัสบ่อยครั้ง นอกจากนี้โพลียูรีเทนยังทนต่อสภาพภูมิอากาศได้ดีอีกด้วย (http://www.qcparawood.com)

2.5 การวิเคราะห์พื้นผิวของพอลิเมอร์ (SURFACE ANALYSIS)

ความเข้าใจในสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติทางเคมีของพื้นผิวของพอลิเมอร์จากการดัดแปรพื้นผิวของพอลิเมอร์ มีความจำเป็นต้องศึกษาลักษณะของพื้นผิวพอลิเมอร์ที่มีการดัดแปรผิวในระดับโมเลกุล ขึ้นอยู่กับความต้องการของข้อมูล ความหลากหลายของความซับซ้อนของวิธีที่ใช้วิเคราะห์ ซึ่งทำให้ได้ผลที่มีความถูกต้อง (Leung and Goh, 1992) ดังรูปที่ 2.18 เปรียบเทียบระดับความลึกของวิธีการต่างๆในการปรับปรุงผิวของพอลิเมอร์ วิธีการที่จะใช้วิเคราะห์พื้นผิวต้องสามารถทำได้ มีความเข้าใจหลักการทำงาน ความเหมาะสมของตัวอย่าง ระดับความลึกของการวิเคราะห์ สภาวะแวดล้อมของการวิเคราะห์ และลักษณะของการปรับปรุงผิว วิธีการต่างๆที่ใช้วิเคราะห์ ที่ใช้ทั่วไป scanning electron microscopy (SEM) atomic force microscopy (AFM) tunneling electron microscopy (TEM) และ confocal laser scanning microscopy (CLSM) ใช้เมื่อต้องการความละเอียดสูง



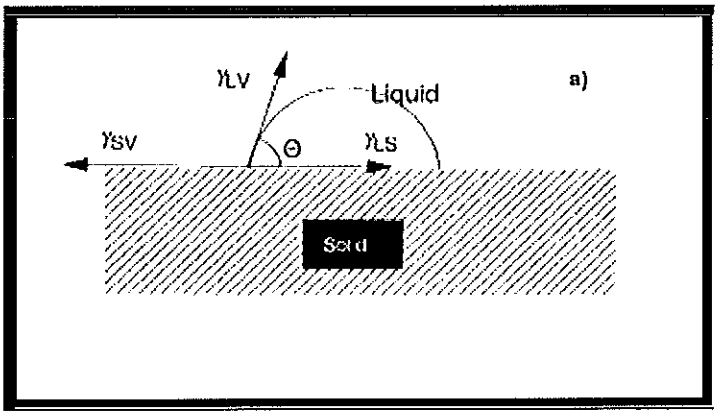
รูปที่ 2.18 ระดับความลึกของการวิเคราะห์จากเทคนิคต่างๆ (Pireaux *et al.*, 1989)

Contact angle measurement และ static/dynamic secondary ion mass spectroscopy (SSIMS) เป็นวิธีการที่ดีที่สุดเมื่อต้องการวิเคราะห์พื้นผิวที่มีความว่องไว. X-ray photo -electron microscopy (XPS), Auger electron spectroscopy (AES), Rutherford back scattering (RBS) and the most recent Two-laser ion trap mass spectrometry (L2ITMS)

เทคนิคนี้เป็นประโยชน์เมื่อต้องการวิเคราะห์ปริมาณ และโครงสร้างทางเคมี L21TMS โดยปกติจะใช้ร่วมกับ XPS หนึ่งในวิธีการใหม่สำหรับวิเคราะห์พื้นผิวระดับนาโน Angle-resolved surface sensitive soft X-ray absorption spectroscopy (NEXAFS) ใช้ในการสังเกตการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของพื้นผิวของพอลิเมอร์โดยการแปรมุมระหว่าง linearly polarized synchrotron light beam และพื้นผิวของตัวอย่าง

2.5.1 Contact Angle Measurement

วิธีการนี้เป็นการวัดมุมของของเหลวกับมุมของผิวตัวอย่าง เป็นวิธีการที่ง่าย และเป็นวิธีการที่เร็วเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงพลังงานของพื้นผิว และความชอบน้ำ (hydrophilicity) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) พื้นฐานของเทคนิค contact angle คือความสมดุลใน 3 ระนาบ ซึ่งคงที่ ที่จุดสัมผัส (contact point) ที่เฟส ของแข็ง/ของเหลว/ก๊าซ ดังรูปที่ 2.19 เป็นจุดสมมูล คือพิจารณาในส่วนของพื้นผิวและแรงที่เกิดขึ้นหรือพื้นผิวและพลังงานอิสระที่เกิดขึ้นในระบบ



รูปที่ 2.19 การรวมกันระหว่าง ของแข็ง/ของเหลว/ก๊าซ ของหยดน้ำบนแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสต่างๆเป็นไปตามสมการของยัง (Young's equation) (Neumann and Good, 1979)

$$\gamma^{LV} \cos\theta = \gamma^{SV} - \gamma^{SL}$$

γ^{LV} = แรงตึงผิวของของเหลวในสมมูลในไอน้ำอิ่มตัว

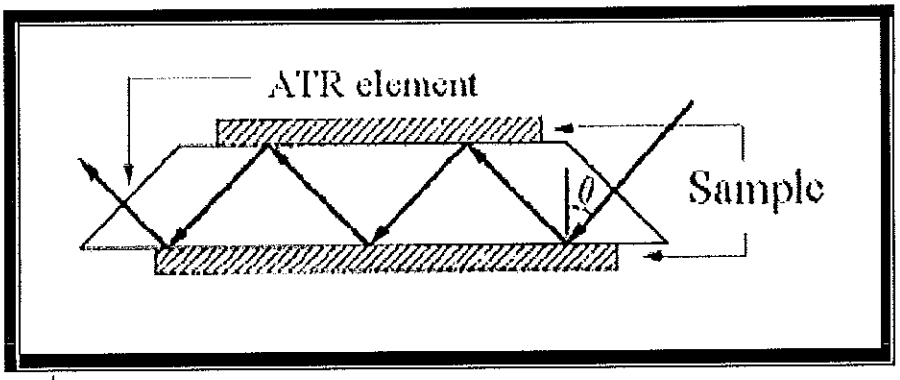
γ^{SV} = แรงตึงผิวของของแข็งกับไนน้ำอิ่มตัวของของเหลว

γ^{SL} = แรงตึงผิวระหว่างเฟสของของแข็งกับของเหลว

2.5.2 Attenuated Total Reflectance Infrared Spectroscopy (ATR-IR)

Infra-red (IR) spectroscopy เป็นเทคนิคที่ดีและมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในการยืนยันหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่ง IR spectra ของแผ่นฟิล์มบางได้จากบริเวณผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม

โดย ATR-IR, แสงอินฟาเรดเข้าไปใน ผลึกใสและสะท้อนที่พื้นผิวของตัวอย่างดังใน รูปที่ 2.20 (Liu *et al.*, 1999) ตามทฤษฎีของแมกซ์เวล "เมื่อแสงผ่านแผ่นฟิล์มใส โดยไม่มีการดูดซับของตัวกลาง ตำแหน่งของคลื่นที่ตั้งฉากจะเกิดการสะท้อนที่ผิว ถ้าตัวอย่างมีการดูดซับบางส่วนของรังสี ทำให้คลื่นเกิดปฏิกิริยากับตัวอย่างแคบลง ทำให้สเปคตรัมสะท้อนสูงขึ้น คล้ายกับการดูดซับของสเปคตรัม"



รูปที่ 2.20 ลักษณะการทำงานของ ATR-FTIR

ความลึกของเข็ม (d_p) ของ ATR-FTIR สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$d_p = \frac{\lambda_0}{2\pi n (\sin^2\theta - n_{21}^2)^{1/2}}$$

โดยที่ θ = รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและพื้นผิวของตัวอย่าง

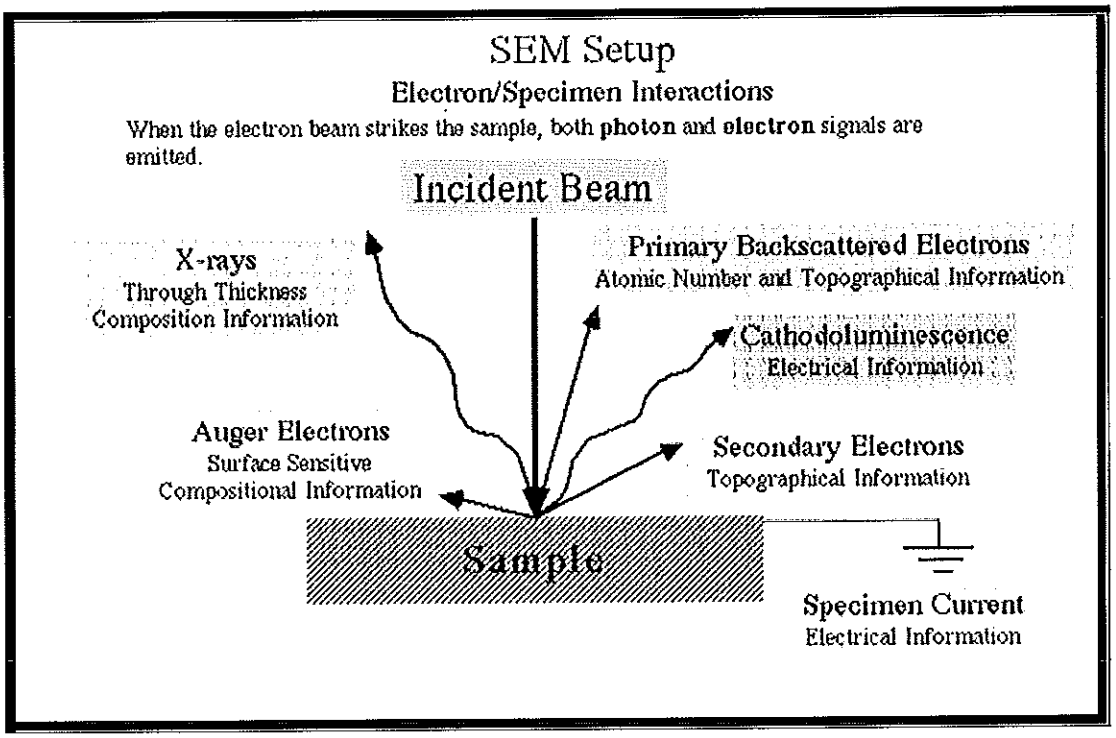
λ = ความยาวคลื่นของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$n_{21} = n_2/n_1$ = ดัชนีการสะท้อนของตัวอย่าง/ดัชนีการสะท้อนของวัตถุใส

จากสมการเห็นว่าความลึกของเข็ม (Depth of penetration) แปรผันตรงกับความยาวคลื่นของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม, dp ยังขึ้นกับมุมของรังสี, ดัชนีการสะท้อนของผลึก ATR crystal และดัชนีการสะท้อนของตัวอย่าง การสะท้อนภายในโดยรวมที่ได้ แสงอินฟาเรดที่สะท้อนบนผลึกเป็นมุม θ ควรจะใหญ่กว่ามุมวิกฤต θc โดยที่ $\theta c = \arcsin(n_2/n_1)$

2.5.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

เทคนิคนี้มีความจำเป็นเมื่อต้องการความละเอียดสูงดูลักษณะของพื้นผิวใน 3 มิติ (Rabelo *et al.*, 1995) เมื่ออีเล็คตรอนไปกระทบกับตัวอย่าง อีเล็คตรอนกระจายหลังการสะท้อน secondary electrons และ x-rays แสดงดังรูปที่ 2.21

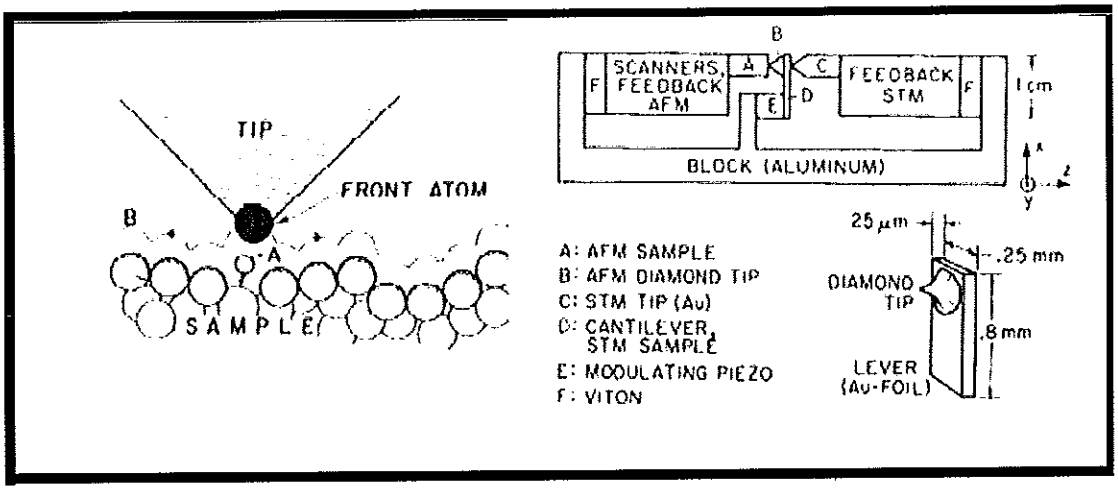


รูปที่ 2.21 เค้าโครงและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราด

ถ้าระบบมีการจับสัญญาณ X-ray ซึ่งจะวัดทั้งความยาวคลื่นและพลังงานของ X-rays ในการวิเคราะห์ธาตุ (Zang *et al.*, 1998) สามารถให้ภาพในระดับนาโน อีเล็คตรอนพลังงานสูง (High-energy electrons) ใช้เมื่อต้องการความละเอียดสูง ขณะที่อีเล็คตรอนพลังงานต่ำ (low-energy electrons) ใช้เมื่อต้องการรายละเอียดของพื้นผิวเพิ่มขึ้น โดยปกติตัวอย่างจะต้องมีการเคลือบด้วยโลหะ เช่น ทอง

2.5.4 Atomic Force Microscopy

AFM มาจากแนวคิดของ scanning tunneling microscope (STM) และรวมกับหลักการของ STM และ stylus profilometer306 (SP) การทดสอบ AFM ไม่มีการทำลายพื้นผิวของตัวอย่าง และบอกความละเอียดด้านข้าง 30 A° และความละเอียดในแนวตั้ง 1 A° เทคนิค SEM และ SP เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์มากสำหรับวิเคราะห์พื้นผิวในระดับอะตอมคล้ายๆกับ AFM การใช้เทคนิคนี้ เป็นการวัดแรงทั้งหมดจากอะตอมและแม่เหล็กไฟฟ้า ภาพที่ได้จาก AFM จากการวัดแรง ของเครื่องสแกน (โดยปกติเป็นเพซร) ซึ่งทำโดยให้ชิดกับผิวตัวอย่าง เมื่อเอาทิปออกตามแนวนอน ดังรอย B ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ลักษณะการทดสอบโดย AFM (Michel *et al.*, 1997)

2.5.5 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

XPS อาจเป็นวิธีการแรกที่เป็นที่ยอมรับในการวิเคราะห์พื้นผิวของพอลิเมอร์สามารถวิเคราะห์ธาตุและหมู่ฟังก์ชันของพื้นผิวได้ (McIntyre *et al.*, 1996) เมื่อวัสดุได้รับรังสีจากการฉายรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เพียงพอ แกนอีเล็คตรอนจากอะตอมหลุดออก การหลุดออกไปของอีเล็คตรอนเรียกว่า *photoelectron* และผลที่ได้นี้เรียกว่า *photoelectric effect* พลังงานที่มากเกินพอจากการฉายรังสี คือพลังงานจลน์ของการหลุดออกไปของอีเล็คตรอน (ejected photoelectron) พลังงานสัมพันธ์ (E_b) ของอีเล็คตรอนของอะตอมภายในวัดจากความแตกต่างระหว่าง X-ray photon energy และ kinetic energy, (E_k) ของอีเล็คตรอนที่หลุดออกไป

$E_b = hv - E_k$

2.6 การตรวจสอบเอกสาร

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับยางธรรมชาติ

Sruanganurak และคณะ (2006) ประสบความสำเร็จในการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลทบนฟิล์มของน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้เทคนิค layer-by-layer (LBL) อาศัยการเกิดอันตรกิริยาของไฟฟ้าสถิตย์ ประจุบนฟิล์มยางธรรมชาติซึ่งเกิดขึ้นโดยการใช้แสง UV กราฟต์ polyacrylamide (PAAm) บนผิวยางที่มีการปรับปรุงผิวในสภาวะ อาร์กอนพลาสมา เทคนิค ATR-FTIR spectroscopy สามารถแสดงปริมาณการกราฟต์เป็นสัดส่วนโดยตรงของความเข้มข้นของโมโนเมอร์และเวลาในการให้แสง UV การวัด contact angle ยังเป็นการยืนยันการเพิ่มความเป็นขั้วจากการกราฟต์พอลิอะคริลาไมด์ บนพื้นผิวของฟิล์มยางธรรมชาติ เปอร์เซ็นต์

การติดของ PMMA (Cs) ขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำยาง เวลาในการแช่ และ pH การเพิ่มขึ้นของความขรุขระของผิวยางเกิดจากการดูดซับของอนุภาคน้ำยาง ยืนยันโดย AFM

Deborah และคณะ (1999) น้ำยางจากต้นยาง *Hevea braziliensis* อธิบายถึงวิธีการหาปริมาณโปรตีนในน้ำยาง วิธีการละลายโปรตีนในน้ำยางและการสกัดออกจากยาง และยังแสดงให้เห็นหมู่แทนที่ในน้ำยางสามารถเอาออกโดยการตกตะกอนของโปรตีนในน้ำยางกับ โซเดียมดีโอไซโคเลต กับ กรดไตรคลอโรอะซิติค และโปรตีนในน้ำยางสามารถหาปริมาณโดยใช้ 2,2'-bicinochoninic acid

Wang และคณะ (2000) การปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มยางธรรมชาติโดย argon plasma รวมทั้งการใช้แสง UV ทำให้เกิดการกราฟต์ของฟิล์มยางที่ปรับปรุงผิวด้วยพลาสมากับ acrylamide (AAm) และ 2,2,3,3,4,4,4-heptafluorobutylacrylate (HFA) ทำให้เกิดผิวใหม่ขึ้น เช่นการมีขั้วและไม่มีขั้วของฟิล์มยางธรรมชาติ หมู่ฟังก์ชันของเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาบนผิวกับอากาศหลังจากทำการปรับปรุงผิวด้วยอากอนพลาสมาทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชั่นมากมาย การแทนที่โดยใช้ UV ทำให้เกิดกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชัน โดยทั่วไปที่ความเข้มข้นของโมโนเมอร์สูงๆ ระยะเวลาการใช้ UV กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่นนานๆ และระยะเวลาในการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมานานๆจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ที่สูง การวัดมุมสัมผัส (contact angle) ทำให้รู้ความเป็นขั้วของผิวของฟิล์มยางธรรมชาติซึ่งดีขึ้นจากการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาและการกราฟต์พอลิเมอไรเซชั่นกับ AAm ในทางตรงกันข้าม มุมสัมผัส กว้างเท่ากับ 109 องศา ได้จากการกราฟต์บนผิวยางกับ HFA ภาพที่ได้จาก AFM แสดงพื้นผิวที่ได้จากการดัดแปรโดยการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่นผลที่ได้คือเกิดความขรุขระบนผิวยางจากหมู่แทนที่

Sruanganurak และ Tangboriboomrat (2006) พอลิเมททิลเมทาคริเลท (PMMA) ใช้เคลือบบนยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์โดยกำมะถัน (SPNR) ในรูปแผ่นฟิล์ม โดยใช้เทคนิค layer-by-layer เพื่อเพิ่มความขรุขระและลดการเสียดทานบนผิวยางธรรมชาติ ก่อนทำการเคลือบ PMMA ทำการปรับปรุงผิวยาง SPNR ด้วย argon plasma และใช้แสงยูวีในการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันของพอลิอะคริลาไมด์ เปอร์เซ็นต์การเกาะติดของ PMMA บนพื้นผิวของยางธรรมชาติที่ถูกแทนที่ ตรวจสอบโดยใช้ SEM ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของน้ำยางและระยะเวลาในการจุ่ม SEM แสดงให้เห็นการลดลงของเปอร์เซ็นต์การเกาะติดของ PMMA บนพื้นผิวของยางธรรมชาติที่ถูกแทนที่จาก 23 ถึง 19 เปอร์เซ็นต์ สมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ ระยะยืด ณ.จุดขาด ของแผ่นยางธรรมชาติที่มีการปรับปรุงผิวไม่เพียงแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญยังมีค่าอยู่ในช่วงที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานของการทดสอบถุงมือ (ASTM D 3577)

Chen และคณะ (2000) พื้นผิวของยางธรรมชาติในรูปแผ่นเมื่อทำการปรับปรุงผิวด้วย Ar-plasma แล้วกราฟต์ด้วย methoxy PEGMA โดยใช้แสง UV โดยประสิทธิภาพของการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของ macromonomer รวมไป

ถึงเวลาของการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่น ซึ่งประสิทธิภาพของการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของ macromonomer สูง และระยะเวลาในการกราฟต์นานขึ้น การวัด contact angle พบว่า hydrophylicity ของผิวยางธรรมชาติสูงขึ้น เมื่อกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันด้วย PEGMA และกราฟต์ PEGMA บนผิวยางธรรมชาติเป็นผลให้ลดการดูดซับของโปรตีนและการติดกันของพื้นผิว และยังพบว่า PEGMA300 (PEG 5 หน่วยซ้ำ) ที่กราฟต์บนผิวยางธรรมชาติสามารถลดโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (BSA) ได้มากกว่าโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (r-globin) ตรงกันข้ามกับการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่นด้วย PEGMA200 (PEG 45 หน่วยซ้ำ) แต่ผิวยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและสามารถลดการดูดซับของโปรตีนและการติดกันของพื้นผิวได้มากกว่าที่กราฟต์ด้วย PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราการกราฟต์ต่ำๆ

Sanguansap และคณะ (2006) พอลิเมอไรเซชันของเมทิล เมทาคริเลท (MMA) บนผิวของยางธรรมชาติ (NR) ศึกษาการเพิ่มขึ้นของความแข็งของผิว (surface hardness) และการลดลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยาง โดยใช้ 2 ขั้นตอนคือ 1) การบวมตัว (swelling) ของ MMA และ tert-butyl hydroperoxide ที่เป็นอิมัลชันในสารละลายโซเดียม โดเดซิลซัลเฟต บนผิวของฟิล์มยางธรรมชาติ และ 2) การบวมตัวหลังจากการจุ่มแผ่นยางในสารละลายอัลคาไลของเฟอร์รัส ไอออน/ฟรุคโตส ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ของ PMMA บนผิวยางธรรมชาติซึ่งสามารถตรวจสอบโดย ATR-FTIR ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของเฟอร์รัส ไอออนมาจากการเพิ่มขึ้นของ MMA ลักษณะพื้นผิวตรวจสอบโดย SEM และ AFM ความแข็งของพื้นผิวและความขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PMMA

Sruanganurak และ Tangboriboomrat (2007) เคลือบอนุภาคพอลีเมทิลเมทาคริเลทบนแผ่นฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ โดยใช้วิธีชั้นต่อชั้น เพื่อช่วยให้มีความขรุขระเพิ่มขึ้น และลดความเสียดสีบนพื้นผิวยาง โดยก่อนการดูดซับของอนุภาคเมทิลเมทาคริเลทนำแผ่นฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์มาทำการปรับปรุงผิวด้วยอาร์กอนพลาสมา ตามด้วยการใช้ยูวีเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดการกราฟต์ของพอลีอะคริลาไมด์ เปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของอนุภาคเมทิลเมทาคริเลทบนผิวของแผ่นฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์จากการตรวจสอบโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่งกราด ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของน้ำยางและระยะเวลาในการจุ่ม เมื่อประยุกต์ใช้แรงในการยืดหดที่ระยะการยืด 300 % ตั้งแต่ 0-7 รอบบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ที่ผ่านการดัดแปลงผิว และนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีการลดลงของเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของอนุภาคเมทิลเมทาคริเลทบนผิวของแผ่นฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์จาก 23 เป็น 19 % สมบัติอื่นๆของแผ่นฟิล์ม เช่นค่าความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นระยะยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มจากน้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ที่ผ่านการดัดแปลงผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก และยังทำการทดสอบยืนยันค่าเฉลี่ยตามมาตรฐานการทดสอบถุงมือ ASTM D3577

C. Nakason และคณะ (2004) กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับมาลีอิค แอนไฮไดรด์ (NR-*g*-MA) หรือเรียกว่ายางธรรมชาติมาลีเอท (MNR) สังเคราะห์ในสารละลายโทลูอีน เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) ใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ ศึกษาอิทธิพลของโมโนเมอร์และความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของมาลีอิคแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์ตรวจสอบโดยการไทเตรทของอนุพันธ์ของคาร์บอกซิลิค การประมาณระดับการกราฟต์ของมาลีอิคแอนไฮไดรด์โดยใช้อัตราส่วนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด 1780–1784 cm^{-1} + 1854 cm^{-1} ต่อ 835 cm^{-1} พบว่าปริมาณของมาลีอิคแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโมโนเมอร์และความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยายังเพิ่มระดับการกราฟต์ได้เช่นเดียวกัน พบว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของยางธรรมชาติมาลีเอทยังสูงกว่ายางธรรมชาติและค่าอุณภูมิคล้ายแก้วยังเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโมโนเมอร์

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

Makaiwang และคณะ (2003) การวิเคราะห์ปริมาณ –OH บนผิวของ PVA-1799 ที่เป็นของแข็งโดยวิธีการไทเทรตที่แตกต่างกัน 2 วิธี จากผลการทดลองแม้ว่าผลอาจมีความคลาดเคลื่อนบ้าง แต่ก็สามารถทำให้ปริมาณหมู่ –OH บนผิวของ PVA และเป็นแนวโน้มที่ดีของการดัดแปรผิว สามารถใช้เตรียมตัวอย่างที่มีปริมาณที่แน่นอนของ –OH บนผิวของ PVA ยังเป็นประโยชน์ในงาน การดัดแปรผิว อื่นๆ ต่อไป

J. M. Gohil และคณะ (2006) ศึกษาเกี่ยวกับปริมาณพันธะเชื่อมขวางของพอลีไวนิลเอลกอฮอล์ โดยใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวาง ปริมาณกรดมาลีอิคที่ใช้แปรตั้งแต่ 2.5-60 % โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้สุกแปรตั้งแต่ 120-160 ^{o}C และระยะเวลา 30-120 นาที ศึกษาการบวมตัวทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น (เปอร์เซ็นต์การบวมตัว ปริมาณการเจล เป็นต้น) พบว่าน้ำหนักโมเลกุลระหว่างสายโซ่แสดงเมื่อใช้กรดมาลีอิค 20% โดยน้ำหนักขึ้นไป ทำการเปรียบเทียบค่าของแผ่นฟิล์มของพอลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางกับพอลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวโดยการใช้ความร้อน การเสถียรทางความร้อนที่ดีกว่าของแผ่นฟิล์มพอลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางสังเกตได้จากการวิเคราะห์ การเสถียรทางความร้อนโดยการใช้ TGA เนื่องจากมีการเลื่อนตำแหน่งของอุณหภูมิคล้ายแก้วของแผ่นฟิล์มพอลีไวนิล แอลกอฮอล์ทั้งที่ใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางและแผ่นฟิล์มพอลีไวนิล แอลกอฮอล์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวโดยความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มพอลีไวนิล แอลกอฮอล์ที่บริสุทธิ์ อินฟราเรด สเป็คโตรสโคปีเพื่อยืนยันการเกิดขึ้นของหมู่เอสเทอร์ และพันธะคู่ของโอลีฟินส์ ในแผ่นฟิล์มพอลีไวนิล แอลกอฮอล์ทั้งที่ใช้กรดมาลีอิค

เป็นสารเชื่อมขวางและแผ่นฟิล์มพอลีไวนิล แอลกอฮอล์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวโดยความร้อนตามลำดับ แผ่นฟิล์มพอลีไวนิล แอลกอฮอล์ที่ใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางจะเสถียรทั้งในตัวทำละลายที่มีขั้วและไม่มีขั้ว รูปแบบโครงสร้างที่แน่นอนของแผ่นฟิล์มพอลีไวนิล แอลกอฮอล์ที่ใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางสังเกตจาก SEM

Rebeca และคณะ (2005) รายงานการเตรียมและสมบัติของ interpenetrating polymer networks (IPNs) ที่ประกอบด้วยพอลีไวนิล แอลกอฮอล์และพอลิอะคริลิคที่เตรียมโดย sequential method พบว่าความสามารถในการเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหของ PVA และ PAAc เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่ำ และเกิดการแยกเฟสเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สูง

P. Martens และคณะ (2005) ดัดแปรพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยหมู่อะคริเลทให้อยู่ในรูปของมาโครเมอร์ทำการเชื่อมโยงโดยการใช้แสงในการพอลิเมอไรเซชัน ภายใต้สภาวะแสงเข้มข้นต่ำ (0.05 %โดยน้ำหนักของตัวริเริ่ม และใช้แสงน้อยกว่า 20 mW/cm^2 ที่ความยาวคลื่น 365 nm) เพื่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจลให้ได้ 100 % conversion ภายในเวลาน้อยกว่า 5 นาที ศึกษาโครงสร้างตาข่ายพอลิเมอร์ ไฮโดรเจลจาก acrylated poly(vinyl alcohol) macromer เปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมขวางทางเคมีด้วย glutaraldehyde และไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางฟิสิกส์โดยการทำให้เกิดเป็นกึ่งผลึกโดยการทำให้เย็น

2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกรดอะคริลิค

D. Binh และคณะ (2006) ทำการกราฟต์กรดอะคริลิคลงบนแผ่นฟิล์มของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ โดยให้รังสีแกมมาจากแหล่งโคบอล 60 แก่เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ขนาด 75kGy ความเข้มข้นของ อะคริลิค สารละลาย เอเควียส สำหรับการกราฟต์ใช้ 22 % โดยปริมาตร อัตราของการให้รังสี 3.4 kGy/h พบว่าอุณหภูมิของการกราฟต์ 90 $^{\circ}C$ เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ระดับการกราฟต์ที่สูง สังเกตอัตราการกราฟต์ของอะคริลิคบนเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ จากสัดส่วนอัตราการกราฟต์เท่ากับ 0.48 และความเข้มข้นของอะคริลิคเท่ากับ 1.9 จากสมการ $R_g = k.I^{0.48}.M^{1.9}$ พลังงานกระตุ้นทั้งหมดของการกกราฟต์ประมาณ 72 Kcal/mol

E. Takacs และคณะ (2006) อะคริลาไมด์ (AAm) กรดอะคริลิค (Aac) 2-ไฮดร็อกซิลโพรพิล อะคริเลท (HPA) 2-ไฮดร็อกซิลโพรพิล เมทาคริเลท (HPMA) และ N,N'-เมทิลลีน บิสอะคริลาไมด์ (BAAm) ถูกกราฟต์บนเส้นใย เซลลูโลสโดยวิธีการใช้รังสี พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการกราฟต์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของโมโนเมอร์ ปริมาณการกราฟต์สูงเมื่อใช้ HPMA และปริมาณการกราฟต์อยู่ในระดับกลางเมื่อใช้ HPA ขณะที่โมโนเมอร์ตัวอื่นๆมีปริมาณการกราฟต์เกิดขึ้นอยู่ในระดับที่ต่ำ การกราฟต์สามารถปรับปรุงการบวมตัวของตัวอย่าง การเพิ่มขึ้นสูงที่สุดในการบวม

ตัวจากการสังเกตบนตัวอย่างที่กราฟต์ด้วย Aac และ BAAm แสดงความอิ่มตัวที่ 270 % ที่ pH ธรรมชาติ สำหรับ AAm HPA และ HPMA ที่ปริมาณการกราฟต์ต่ำจะมีการบวมตัวสูงและเมื่อปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้นจะมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวลดลง และยังพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับปริมาณการกราฟต์กับสมบัติด้านการบวมตัว

N. Hinchiranan และคณะ (2006) สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มอะคริลิคที่ผ่านการดัดแปรเตรียมได้โดย บัลค์โคพอลิเมอไรเซชันของเมทิล เมทาคริเลทและสไตรีนปรับปรุงได้โดยการเติม graft natural rubber (GNR) การกราฟต์ของเมทิล เมทาคริเลทบนน้ำยางธรรมชาติเตรียมได้โดยใช้เทคนิคอิมัลชัน พอลิเมอไรเซชันโดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา สมบัติของแผ่นฟิล์มอะคริลิคจากการดัดแปรที่ประกอบด้วย GNR กับกราฟต์โคพอลิเมอร์ 22.5 wt.% จากการศึกษาปริมาณ GNR ผลที่ได้ ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อแรงแดง และระยะยืด ณ. จุดขาดของแผ่นฟิล์มอะคริลิคจากการดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ GNR ตั้งแต่ 0.5-4 ส่วน จากพฤติกรรมของการดึงยืดลักษณะของแผ่นฟิล์มอะคริลิคจากการดัดแปรมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแข็งคล้ายแก้ว (brittle) ไปเป็นลักษณะที่เหนียว (ductile) เมื่อปริมาณ GNR เพิ่มขึ้น ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของแผ่นฟิล์มอะคริลิคจากการดัดแปร แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวที่เรียบและมีลักษณะรอยแตกเล็กๆ แสดงให้เห็นว่าการใช้ GNR สามารถใช้เป็นสารช่วยลดการกระแทกให้กับพลาสติกอะคริลิค

N.C. Dafadera และคณะ (2006) การศึกษาเปรียบเทียบโดยการแปรโมโนเมอร์อะคริลิคที่ต่างกันเพื่อใช้กราฟต์บนยางธรรมชาติ โดย NRL ไม่เสถียรในโมโนเมอร์คือ methylacrylate (MA) ethylacrylate (EA) และ n-butylacrylate (n-BA) แต่เสถียรใน methyl methacrylate (MMA) n-butyl methacrylate (BMA) และ cyclohexyl methacrylate (CHMA) สมบัติเชิงกลและระดับการกราฟต์สูงสุดเมื่อให้รังสีเท่ากับ 4 kGy สมบัติด้านเทนไซล์ของ MMA และ CHMA ที่กราฟต์มีแนวโน้มที่คล้ายกันและสูงกว่า BMA ที่กราฟต์ ในทางตรงกันข้ามปริมาณ CHMA ที่กราฟต์สูงกว่า MMA และ BMA ยืนยันการกราฟต์โดย FTIR

Safaa G และคณะ (2006)โครงสร้างตาข่ายโคพอลิเมอร์ไฮโดรเจลเตรียมโดยใช้รังสีแกมมาในสารละลายเอเควียสของ poly(vinyl pyrrolidone) (PVP) และ acrylic acid monomer (AAc) ศึกษาสมบัติการปลดปล่อยยาของไฮโดรเจล PVP/AAc copolymer ใช้เมทิล ออเรนจ์เป็นอินดิเคเตอร์ใช้เป็นโมเดลแทนยา จากการศึกษา TGA พบว่าไฮโดรเจล PVP/AAc มีความเสถียรทางความร้อนที่สูงกว่า PAAc ที่บริสุทธิ์ และน้อยกว่าไฮโดรเจล PVP การบวมตัวในน้ำแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลมีความสมดุลหลังจาก 24 ชั่วโมงผ่านไป และระดับการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ AAc ในสารละลายตอนเริ่มต้น พบว่าระดับการบวมตัวของไฮโดรเจล PVP/AAc ในช่วงระหว่าง pH 4–7 ขึ้นอยู่กับการรวมกัน

2.6.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงผิวพอลิเมอร์

Abdelmauleh และคณะ (2006) วัสดุคอมโพสิททำจากเส้นใยเซลลูโลส (วัตถุดิบหรือมีการดัดแปลงทางเคมี) ใช้เป็นสารเสริมแรงและเป็นเมทริกในเทอร์โมพลาสติก ใช้เส้นใยเซลลูโลสต่างกัน 4 ชนิด ที่ความยาวเฉลี่ยต่างๆกัน คือ avicel technical alpha pulps และ pine fibres ใช้พอลิเมอร์ เทอร์โมพลาสติก 2 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE) และยางธรรมชาติ ใช้เป็นเมทริก และเส้นใยเซลลูโลสอยู่ในเมทริกมีการดัดแปรผิวรวมถึง silane coupling agents 3 ชนิด คือ γ-methacryloxypropyltrimethoxy (MPS) γ-mercaptoproyltrimethoxy (MRPS) และ hexadecyltrimethoxy-silane (HDS) พบว่าว่าสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทเพิ่มขึ้นตามความยาวเฉลี่ยของเส้นใยที่เพิ่มขึ้น และวัสดุคอมโพสิทเตรียมโดยใช้ทั้งเมทริกและเส้นใยเซลลูโลสที่ปรับปรุงด้วย MPS และ MRPS แสดงสมบัติเชิงกลที่ดี

Predeep และคณะ (2005) วิธีการใช้ไอออน (ion implantation) เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และเป็นที่รู้จักกันดีเพื่อใช้ในการดัดแปลงพื้นผิวของพอลิเมอร์ แผ่นฟิล์มของยางธรรมชาติถูกดัดแปรโดย การปลูกฝังของไอออน 60 KeV N^+ ในการให้ไอออน 10^{11}-10^{15} cm^{-2} การวัดการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ฉายรังสี การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 10 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับของเดิม ตามการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเป็นที่น่าสังเกตการณ์เปลี่ยนสีเป็น dense shiny black สำหรับแผ่นฟิล์มที่มีการนำไฟฟ้ามากที่สุด การวิเคราะห์อุณหภูมิขึ้นกับการนำไฟฟ้า แสดงข้อมูล 3 ขนาดที่แตกต่างกันระยะเวลาของกลไกอย่างเร็ว การพัฒนาโครงสร้างเริ่มต้นและตัวอย่างที่ผ่านการดัดแปลงโดยแหล่งให้อีเล็คตรอนตรวจสอบโดย electroscopic analysis เช่น UV/vis และ FTIR สเปคตรัมที่ได้ยืนยันได้ว่าเกิดจาก conjugated double bond ซึ่งเป็นผลที่สำคัญ

Romero-Sanchez และคณะ (2006) ยาง styrene-butadiene-styrene 2 ตัว ตัวหนึ่งใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (S6C) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อีกตัวหนึ่งไม่ใส่สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตแต่ปรับปรุงผิวโดยใช้รังสียูวี ศึกษาผลจากการดัดแปลงพื้นผิวและสมบัติด้านการยึดติดกับกาวพอลิยูรีเทน พบว่าการปรับปรุงผิวโดยการใช้รังสียูวีช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการเปียก รวมทั้งทนทานสารเคมี (จากการออกซิเดชั่นที่ผิว) และสมบัติด้านmorphology (ความขรุขระและการสึกหรอ) ของผิวยาง

Romero-Sanchez และคณะ (2006) การปรับปรุงผิวโดยเทคนิค low-pressure plasma เพื่อให้ได้ความเหมาะสมของการเพิ่มขึ้นของ surface energy และการยึดติดของยางสังเคราะห์ SBR ที่วัลคาไนซ์โดยกำมะถัน การปรับปรุงผิวโดยใช้ความดันบรรยากาศมีความยากที่จะทำลายพันธะของยางวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันจึงใช้ plasma torch ระยะระหว่างยางกับหัวของ plasma torch (0.5 และ1ซม.) และแปรระยะเวลาในการปรับปรุงผิว พบว่าการปรับปรุง

ความสามารถในการเปียกทำได้โดยการลดระยะห่างระหว่างยางกับหัวของ plasma torch เพราะว่า paraffin wax ที่ผิวยางจะระเหยออกไป ในทางตรงกันข้ามผิวของยางสังเคราะห์ SBR ที่วัลคาไนซ์โดยกำมะถันที่ถูกออกซิไดซ์โดยการทำ plasma torch ใช้ระยะเวลาในการปรับปรุงผิวนานจึงทำให้เกิดการออกซิไดซ์สูง (เกิด C-O บนสายโซ่หลัก) แม้ว่าการปรับปรุงผิวโดยการทำ plasma torch จะได้ผลดี ทว่าการยึดติดกับกาวพอลียูรีเทนไม่เพิ่มขึ้นมากนักเนื่องจากการระเหยออกของ paraffin wax ทำให้การยึดติดระหว่างยางสังเคราะห์ SBR ที่วัลคาไนซ์โดยกำมะถันกับกาวพอลิยูรีเทนเกิดในส่วนนี้เพียงอย่างเดียว ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มระยะเวลาในการทำ plasma torch ทำให้เกิดการระเหยออกของ ซิงค์สเตียเรต การยึดติดกันของยางสังเคราะห์ SBR ที่วัลคาไนซ์โดยกำมะถันกับกาวพอลิยูรีเทนจึงเพิ่มขึ้น

Shanmugharaj และคณะ (2005) ผิวของยางที่ให้รังสียูวีเพื่อกราฟต์ allylamine และใช้เบนโซควิโนนเพื่อให้เกิดความว่องไวของรังสี พบว่าการเคลือบผิวด้วย allylamine ช่วยให้อัตราการสลายตัวจากความร้อนลดลง มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับผิวของยางลดลงสำหรับยางที่มีการดัดแปลงผิวโดยการใช้แสงยูวีในการกราฟต์

Landete-Ruiz และ Martin-Martinez (2006) ความสามารถในการยึดติดระหว่างกาวพอลีไอโซปรีนและเอทิลีนไวนิลอะซิเตต โคพอลิเมอร์ ที่มีไวนิลอะซิเตตอยู่ 12 % โดยน้ำหนัก (EVA 12) พบว่าการปรับปรุงผิวของ EVA 12 โดยการใช้รังสียูวีจะเพิ่มความสามารถในการเปียกผิว ได้ คาร์บอน/ออกซิเจน ที่เป็นขั้ว และเกิดความขรุขระของพื้นผิว ผลที่ได้นี้เกิดจากการปรับปรุงผิวเป็นเวลา 5 นาที

Krump (2005) งานนี้ทำการศึกษาความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นใย Poly(ethyle theraphthalate) (PET) และยาง SBR ซึ่งการปรับปรุงผิวโดยการใช้พลาสมา จะช่วยความสามารถในการยึดติดระหว่างเส้นใย PET และยางที่เป็นเมทริกซ์ให้ดีขึ้น โดยจะทำการทดสอบและเปรียบเทียบ เป็นที่ยืนยันแล้วว่าความลื่นของเส้นใยเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการยึดติดลดลง เราสามารถกำจัดสารหล่อลื่นออกได้โดยใช้อะซิโตน เมื่อล้างสารหล่อลื่นออกแล้วทำการปรับปรุงผิวด้วยพลาสมาจะสามารถปรับปรุงความแข็งแรงในการยึดติดได้ดีขึ้น มีการยืนยันแล้วว่าการใช้พลาสมาทำให้เกิดปรากฏการณ์ใหม่ มีความสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาที่เสถียรบนพื้นผิว จึงควรปรับปรุงผิวของเส้นใย PET โดยการใช้พลาสมาในสภาวะบรรยากาศที่มีความดันก๊าซที่เหมาะสม ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะสามารถปรับปรุงความแข็งแรงในการยึดติดวัสดุเสริมแรงกลุ่มพอลีเอสเทอร์กับยางได้

Romero-Sanchez และคณะ (2005) การใช้ corona discharge และ ultraviolet (UV) เป็นวิธีการปรับปรุงผิวโดยไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นทางเลือกที่นำมาใช้ในการทำฮาโลจิเนชันบนยาง styrene-butadiene-styrene (S6) โดยทำการศึกษา corona energy และระยะเวลาในการปรับปรุงผิวโดยการใช้แสงยูวีบน S6 การปรับปรุงผิวโดยการใช้รังสียูวีของผิวยาง S6 ทำให้เกิดโครงสร้าง C–O, C=O และ COO^- บนผิว ซึ่งหมู่ดังกล่าวจะช่วยเพิ่ม

ความสามารถในการเปียกผิว ลักษณะพื้นผิวของยาง S6 ที่ได้รับการปรับปรุงผิวที่แตกต่างกันโดยวิธีการใช้รังสียูวี หรือการใช้ corona discharge การใช้ corona discharge พลังงานสูงหรือการใช้รังสียูวีที่มีความยาวคลื่นสูงจะปรับปรุงผิวของยาง S6 ได้ดีขึ้น ในทางกลับกัน corona discharge และการใช้รังสียูวีจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน วิธีการ corona discharge ทำให้เกิดการยึดติดที่แย่กว่าการใช้แสงยูวี เนื่องจากพื้นผิวที่ได้เรียบกว่า (ความขรุขระน้อยกว่า) และให้ชั้นยึดติดที่อ่อนแอ ส่วนการใช้แสงยูวี จะทำให้เกิดรอยแตกบนผิวยาง S6 ทำให้สมบัติเชิงกลดี การปรับปรุงผิวทั้ง 2 วิธี เตรียมได้โดยการทำ solvent-based halogenation treatment

Williams และคณะ (2004) Polydimethylsiloxane เกรดที่ใช้เกี่ยวกับทางการแพทย์ ถูกควบคุมให้ใช้การปรับปรุงแบบพลาสมาที่ใช้พลังงานต่ำ ในสภาวะก๊าซที่แตกต่างกัน 4 แบบ O_2 Ar N_2 และ NH_3 หลังการแปรรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวทันที และผลจากการปรับปรุงผิวทำให้มีความเสถียรหลังการผ่านการบ่มเร่งใน phosphate buffered saline หรืออากาศ 1 เดือน พบว่าการปรับปรุงผิวทุกวิธีมีผลให้ค่าความสามารถในการเปียกผิวเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของการปรับปรุงผิวโดยการใช้พลาสมาขึ้นอยู่กับการให้ก๊าซ (feed gas) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลักๆที่สำคัญมี 2 ประการ ที่สังเกตได้หลังจากการบ่มเร่ง คือการเกิดปฏิกิริยาเคมีเมื่อเก็บ และกระบวนการ relaxation เป็นผลที่ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเปียกผิว การปรับปรุงผิวของวัสดุที่มีความเข้ากันได้กับเลือด โดยการวัดมุมสัมผัส ซึ่งการใช้ O_2 และ A_2 พลาสมา ทำให้สมบัติลดลง แต่การใช้ N_2 และ NH_3 พลาสมา ให้สมบัติดีขึ้น

Mao และคณะ (2003) งานนี้เป็นการปรับปรุงความเข้ากันได้กับเลือดของแผ่นฟิล์มยางซิลิโคน (SR) โดยการกราฟต์ O-butyrylchitosan (OBCS) โดย OBCS ทำให้เกิดพันธะโควาเลนซ์ที่เคลื่อนที่ไม่ได้บนผิวแผ่นฟิล์มยางซิลิโคน ซึ่งจะใช้สารเชื่อมโยง แบบ photosensitive heterobifunctional คือ 4-azidobenzoic acid ซึ่งสารนี้จะทำให้เกิดพันธะ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่าง หมู่กรดของสารเชื่อมโยง กับหมู่อะมิโนอิสระบน OBCS ความเข้ากันได้ของเลือดของ SR film วัดโดย platelet rich plasma (PRP) และจากการสังเกตโดย SEM ผลที่ได้คือเลือดสามารถเข้ากันได้ดีกับแผ่นฟิล์มยางซิลิโคนที่กราฟต์ด้วย OBCS ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

Wu และคณะ (2003) ใช้แร่ต่างๆคือ quartz talc และ wollastonite เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางซิลิโคน ซึ่งเตรียมโดย ultra-fine crushing และการดัดแปลงพื้นผิวทางเคมีกับ coupling agent คือ A-151 และ B-5 เพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซิลิโคน (ใช้เป็นส่วนของเมทตริกซ์) กับสารตัวเติม โดยความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางสัมพันธ์กับการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของส่วนที่เชื่อมโยง ปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงมีความสัมพันธ์กันกับปริมาณ bound rubber ในโทลูอีน

Kaynak และคณะ (2003) เศษยางรถยนต์สามารถใช้เป็นสารตัวเติมหรือสารเพิ่มความเหนียวในอิพอกซี่ของแข็ง (rigid epoxy) ถ้าใช้ในปริมาณที่เหมาะสม วัตถุประสงค์ของงานนี้เพื่อศึกษาชนิดของ silane coupling agent (SCAs) เพื่อปรับปรุงผิวของอิพอกซี่ เรซิน (epoxy resin) และยางที่นำกลับมาใช้ใหม่ (recycled rubber) การทดลองนี้ใช้ SCA 7 ตัว ผลการทดสอบพบว่า SCA บางตัวสามารถปรับปรุงความเข้ากันของ epoxy resin และ recycled rubber ทำให้ค่า tensile strength เพิ่มขึ้นแต่มีผลให้ค่า toungness ลดลงเล็กน้อย

Aziz และคณะ (2003) เป้าหมายของงานนี้คือปรับปรุงความสามารถในการเปียกผิวของยางซิลิโคน ชิ้นตัวอย่างยางซิลิโคนจะถูกปรับสภาพผิวโดยใช้การปรับปรุงผิวแบบพลาสมาโดยใช้ก๊าซอาร์กอน ซึ่งจะมีวิธีการเพิ่มหมู่ ethyleneoxy functional silanes เปรียบเทียบกับยางซิลิโคน ซึ่งมี ethyleneoxy functional surfactants อยู่ในพอลิเมอร์เมตริกซ์ พบว่าผิวของยางซิลิโคนที่มีการดัดแปลงโครงสร้างให้ค่ามุมสัมผัส ต่ำกว่าสูตรที่ไม่มีการดัดแปรโครงสร้าง สูตรที่มีการดัดแปรโครงสร้างให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่า และให้ค่าการดูดซับน้ำที่ต่ำกว่า ซึ่งการปรับปรุงผิวโดย argon plasma โดยการดูดซับทางเคมีของ ethyleneoxy functional silanes สามารถปรับปรุงความสามารถในการดูดซับน้ำของยางให้ดีขึ้น

2.7 ความใหม่ของงานวิจัยในครั้งนี้

2.7.1 เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA โดยพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีลักษณะเป็นแบบ semi-IPN ซึ่งมีกรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวาง

2.7.2 เป็นกราฟต์ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC โดยใช้แสงยูวี

2.7.3 เป็นแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต รวมทั้งแผ่นจากการกราฟต์ด้วยแสงยูวีของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

2.7.4 เป็นการทำให้แผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA และแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีพอลิยูรีเทนอยู่ที่ผิว

2.7.5 สามารถเตรียมแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่มียางธรรมชาติให้สามารถย่อยสลายได้เองทางชีวภาพ

2.7.6 สามารถดัดแปรยางธรรมชาติในการใช้งานเป็นแผ่นต้านทานการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆคือ *A. baumanii E. coli* และ *S. aureus*

บทที่ 3
วิธีการวิจัย

ในส่วนของบทนี้ซึ่งเป็นวิธีการวิจัย จะกล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัยที่ทำทั้งหมด ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ เพื่อให้สามารถเข้าใจรายละเอียดได้ง่ายมากขึ้นดังนี้ *ส่วนที่ 1* กล่าวถึงสารเคมี *ส่วนที่ 2* อุปกรณ์ *ส่วนที่ 3* เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย *ส่วนที่ 4* วิธีดำเนินการทดลอง และ*ส่วนที่ 5* ซึ่งเป็นส่วนสุดท้าย จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย โดยมีรายละเอียดสำหรับหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

3.1.1 น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Latex, HA)

ใช้สำหรับเตรียมแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ แผ่นฟิล์มยางธรรมชาติผสม รวมทั้งใช้สำหรับการเตรียมเป็นยางธรรมชาติอิพอกไซด์ มีเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber content, DRC) ประมาณ 60 % ผลิตโดยบริษัท ฉลองอุตสาหกรรมน้ำยางข้นจำกัด (Chalong Latex Industry Co., Ltd.) อ. จะนะ จ.สงขลา

3.1.2 ไดบิวทิลทิน ไดลอเรต (Dibuthyltin dilaurate, DBTDL)

เป็นสารตัวเร่ง สำหรับการเตรียมการดัดแปรยางธรรมชาติด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และใช้เป็นสารตัวเร่งในการเตรียมพอลิยูรีเทน มีสูตรทางเคมีคือ $C_{32}H_{64}O_4Sn$ มีน้ำหนักโมเลกุล 631.55816 g/mol ผลิตโดย บริษัท Sigma-Aldrich

3.1.3 เทอริค 16 เอ (Teric 16 A)

เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทนอนไอออนิค (non-ionic surfactant) มีสูตรทางเคมีคือ $C_{20}H_{42}O_2$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 314.55 g/mol จัดอยู่ในกลุ่ม Ceto-Stearyl Alcohol Ethoxylates ผลิตโดยบริษัท Lucky four มีสมบัติทั่วไปดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเทอริค 16 เอ

Properties	Value
Water content (%)	0.5
Hydroxyl Value (mg KOH/g)	33
Cloud point 1 % solution (°C)	>100
pH	6-8
Viscosity cP @ 20 °C	1.50
Specific gravity @ 20 °C	1.066

3.1.4 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

ใช้สำหรับเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ มีสูตรทางเคมีคือ H_2O_2 ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.1.5 กรดฟอร์มิค (Formic acid) เข้มข้น 94 %

ใช้สำหรับเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ มีสูตรทางเคมีคือ HCOOH มีน้ำหนักโมเลกุล 46.03 กรัม/โมล ผลิตโดยบริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.1.6 เมทานอล (Methanol)

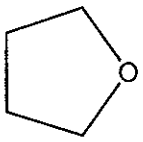
ใช้สำหรับจับตัวน้ำยางหลังจากทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีสูตรทางเคมี CH_3OH มีน้ำหนักโมเลกุล 32.04 กรัม/โมล ช่วงจุดเดือด 64-65 °C ผลิตโดยบริษัท J.T Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.7 คลอโรฟอร์ม (Chloroform)

ใช้สำหรับทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย มีสูตรทางเคมี $CHCl_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 119.38 กรัม/โมล เกรดวิเคราะห์ (Ar-grade) มีจุดเดือดเท่ากับ 145 °C ผลิตโดยบริษัท J.T Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.8 เตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF)

ใช้สำหรับทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย มีสูตรทางเคมี C_4H_8O มีน้ำหนักโมเลกุล 72.11 กรัม/โมล เกรดวิเคราะห์ (Ar-grade) มีจุดเดือดเท่ากับ 66 °C ผลิตโดยบริษัท J.T Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.1 โครงสร้างโมเลกุลของเตตระไฮโดรฟูราน

3.1.9 โทลูอีน (Toluene)

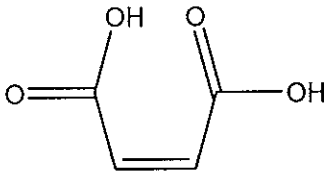
ใช้สำหรับทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย โทลูอีนเกรดนี้มีความบริสุทธิ์ 99.90% มีค่า Acidity/Alkalinity 0.000033 meq/g มีสูตรทางเคมี $C_6H_5CH_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 92.14 g/mol มีความหนาแน่น 0.867 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Fisher Sciencetific ประเทศอังกฤษ

3.1.10 ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane)

ใช้สำหรับทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย มีสูตรทางเคมี C_6H_{12} มีน้ำหนักโมเลกุล 84.160 g/mol เกรดวิเคราะห์ (Ar-grade) มีจุดเดือดเท่ากับ 80.74 °C ผลิตโดยบริษัท J.T Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.11 กรดมาลีอิค (Maleic acid, MA)

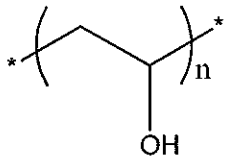
ใช้เป็นตัวเชื่อมขวางสำหรับแผ่นพอลิเมอร์ผสม มีสูตรทางเคมี $C_4H_4O_4$ มีน้ำหนักโมเลกุล 116.1 g/mol มีความหนาแน่น 1.59 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Lexas ประเทศสิงคโปร์ มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างโมเลกุลของกรดมาลีอิค

3.1.12 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly (vinyl alcohol), PVA)

ใช้สำหรับเตรียมแผ่นพอลิเมอร์ผสม มีน้ำหนักโมเลกุล 17,000 g/mol มีความหนาแน่น 1.19-1.31 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Nagoya ประเทศสิงคโปร์ มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.3 และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2



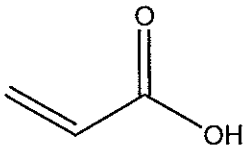
รูปที่ 3.3 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

Properties	Value
Grade	GH-17R
Viscosity (mPa.s)	≈ 30.0
Hydrolysis (mol.%)	≈ 87
Volatiles (%)	≈ 3.2
Ash contents (%)	≈ 0.22
pH	≈ 5.8

3.1.13 กรดอะคริลิค (Acrylic acid)

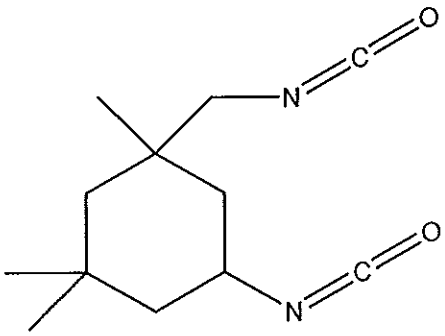
ใช้สำหรับกราฟต์แผ่นยางธรรมชาติ มีสูตรทางเคมี $C_3H_4O_2$ มีน้ำหนักโมเลกุล 72.06 g/mol มีความหนาแน่น 1.051 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท J.T Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างโมเลกุลของกรดอะคริลิค

3.1.14 ไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต (Isophorone diisocyanate, IPDI)

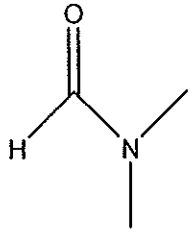
ใช้สำหรับดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม มีสูตรทางเคมี $C_{12}H_{18}N_2O_2$ มีน้ำหนักโมเลกุล 222.3 g/mol มีความหนาแน่น 1.062 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท J.T Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างโมเลกุลของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

3.1.15 ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (Dimethylformamide, DMF)

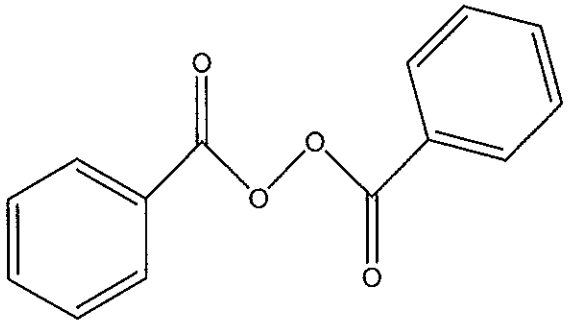
ใช้สำหรับเจือจางไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต มีสูตรทางเคมี C_3H_7NO มีน้ำหนักโมเลกุล 73.09 g/mol มีความหนาแน่น 0.944 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท J.T Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โครงสร้างโมเลกุลของไดเมทิลฟอร์มาไมด์

3.1.16 เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide)

ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยางธรรมชาติ มีสูตรทางเคมี $C_{14}H_{10}O_4$ มีน้ำหนักโมเลกุล 242.23 g/mol มีความหนาแน่น 1.334 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท J.T Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.7

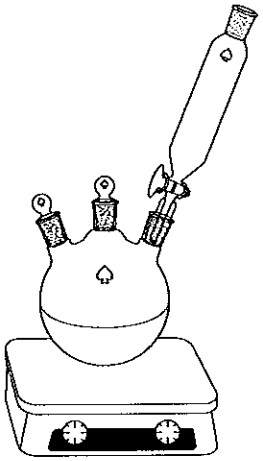


รูปที่ 3.7 โครงสร้างโมเลกุลของเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

3.2 อุปกรณ์

3.2.1 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์แสดงดังรูปที่ 3.8 ประกอบด้วย ภาชนะอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 51.30 cm สูง 28.50 cm ใช้สำหรับใส่น้ำเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ขวดทำปฏิกิริยา 3 คอ ขนาด 500 mL อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาจะควบคุมโดยเครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน ผลิตโดยบริษัท Velp Scientifica ที่ 50 °C โดยมี Magnetic bar ช่วยในการผสม มีความเร็วในการหมุนประมาณ 150 รอบต่อนาที

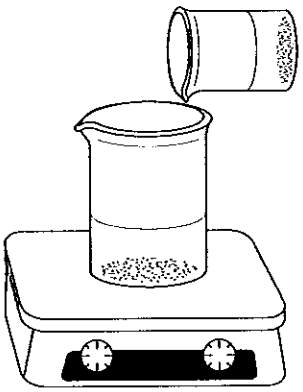


รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์

3.2.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม (ดังรูปที่ 3.9) ประกอบด้วย

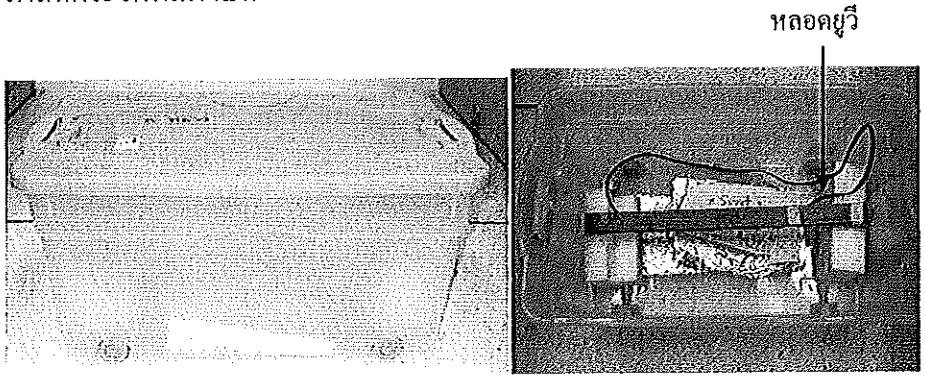
1. เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน ผลิตโดยบริษัท Velp Scientifica
2. เบซิน (basin) ขนาด 1000 mL
3. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) ขนาด 100°C
4. เครื่องชั่ง ความละเอียด 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง ผลิตโดย Mettler Co., Ltd.
5. เพลตกระจกขนาด 13 × 13 × 0.5 cm



รูปที่ 3.9 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

3.2.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยางธรรมชาติ

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยางธรรมชาติ(ดังรูปที่ 3.10) ประกอบด้วยกล่องพลาสติกขนาด ใช้สำหรับใส่แผ่นฟิล์ม ภายในประกอบด้วยหลอดยูวี เพลตกระจกที่มีฝาปิด



ก. ลักษณะภายนอก ข. ลักษณะภายใน

รูปที่ 3.10 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ก. ลักษณะภายนอก ข. ลักษณะภายใน

3.2.4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยเพลตกระจกที่มีฝาปิด ราวสำหรับแขวนแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรแล้ว รูปของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแสดงในหัวข้อที่ 3.4.4 การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

3.2.4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการเคลือบด้วยพรีพอลิยูรีเทน

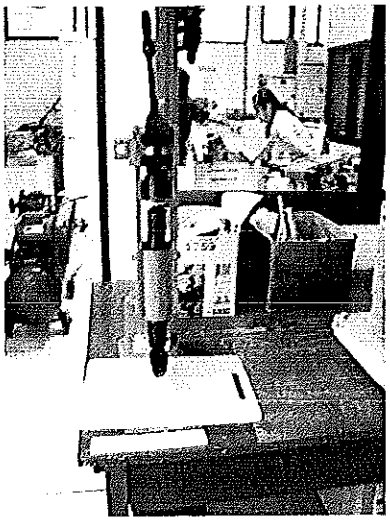
ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเหมือนกันชุดอุปกรณ์สำหรับการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต รูปของ

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนแสดงในหัวข้อที่ 3.4.5 การเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วยพรีพอลิยูรีเทน

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 เครื่องตัดชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์

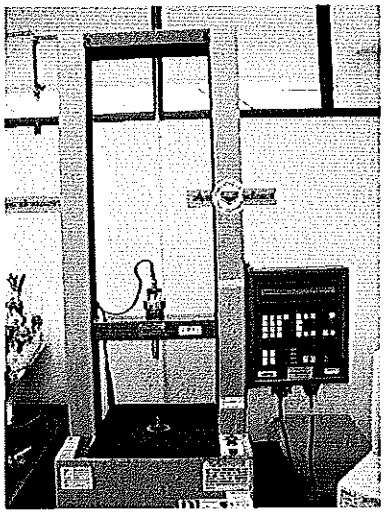
ตามมาตรฐาน ASTM D412 die C (ดังรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 เครื่องตัดชิ้นทดสอบความทนทานต่อแรงดึง

3.3.2 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง

ผลิตโดยบริษัท LLOYD instrument รุ่น LR10K (ดังรูปที่ 3.12)



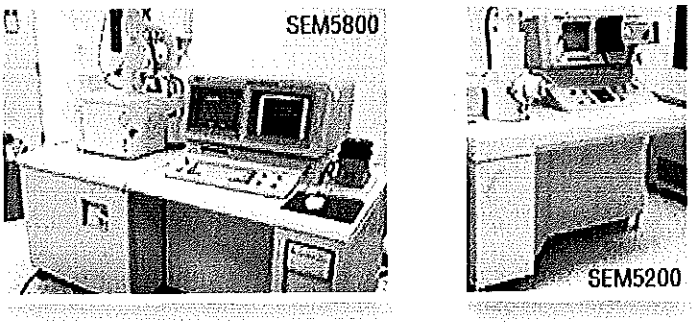
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความทนทานต่อแรงดึง

3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น SEM-5200 และ SEM-5800

SEM5200 เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนขนาดเล็ก (ดังรูปที่ 3.13) ใช้งานง่าย เคลื่อนย้ายสะดวก ควบคุมการทำงานด้วยระบบไมโครโปรเซสเซอร์ มีกำลังการขยายตั้งแต่ 15-200,000 เท่า

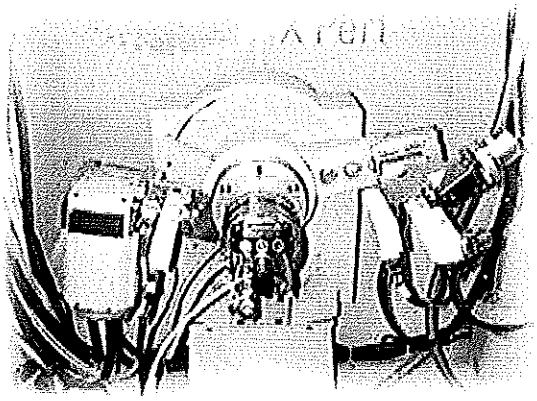
SEM5800 ใช้ถ่ายภาพโครงสร้างพื้นผิวภายนอกของวัสดุต่างๆ สามารถขยายสูงสุดถึง 300,000 เท่า สามารถตรวจหาสิ่งผิดปกติบนชิ้นงาน วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในวัสดุ และแสดงแผนภาพการกระจายของธาตุชนิดต่างๆในวัสดุ วิเคราะห์ตัวอย่างประเภทวัสดุต่างๆทางโลหะ เซรามิกส์ พอลิเมอร์ เซลล์พืช เซลล์สัตว์ และสามารถดูตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำๆ ได้



รูปที่ 3.13 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.3.4 เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

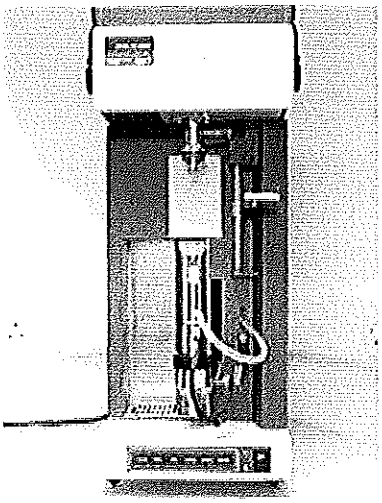
ผลิต โดยบริษัท Philips รุ่น X'Pert MPD เป็นเครื่องวิเคราะห์หาสารประกอบในตัวอย่าง Unit Cell Size นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูง (ไม่เกิน 1200 °C) โดยสามารถวิเคราะห์ได้หลายประเภท เช่น หิน ดินทราย ดินเหนียว โลหะ แร่ประกอบหิน วัตถุดิบอุตสาหกรรม เช่น ผง TiO_2 และ $CaCO_3$ วัสดุสังเคราะห์ เซรามิกส์ เป็นต้น (ดังรูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.14 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

3.3.5 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริกแอนนาไลเซอร์ (thermo gravimetric analyzer, TGA)

ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer รุ่น TGA7 ใช้วิเคราะห์หาปริมาณน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบในสารตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 1300 °C (ดังรูปที่ 3.15)

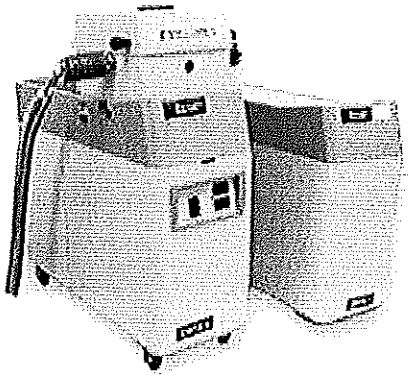


รูปที่ 3.15 Thermo gravimetric Analyzer (TGA)

3.3.6 เครื่องวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ (dynamic mechanical thermal analyzer, DMTA)

ผลิตโดยบริษัท Rheometric Scientific รุ่น DMTA V(ดังรูปที่ 3.16) ใช้วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลา เช่น Glass Transition, Temperature, Storage Modulus, Loss Modulus และ Tan Delta เป็นการวิเคราะห์แบบ Dynamic และ

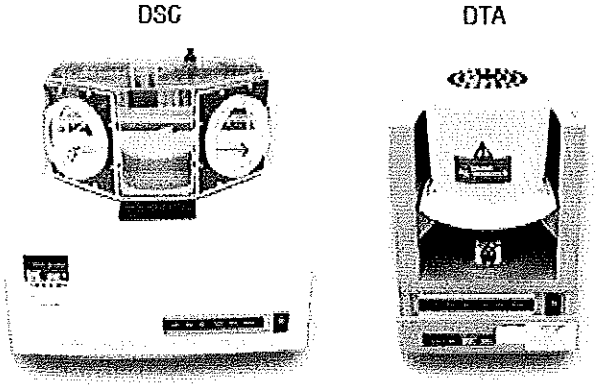
สามารถวิเคราะห์แบบ Tension, Bending, Compression และ Shear ในช่วงอุณหภูมิ -150 ถึง 500 °C สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างประเภทวัสดุพลาสติก พอลิเมอร์ ยาง เป็นต้น



รูปที่ 3.16 Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMTA)

3.3.7 เครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) และเครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลเมอมอลแอนนาไลเซอร์ (Differential thermal analyzer, DTA)

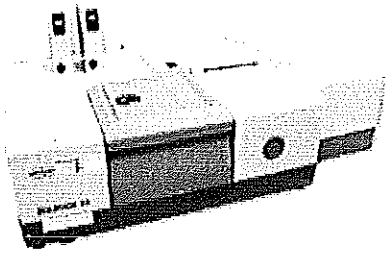
ผลิตโดย บริษัท Perkin Elmer รุ่น DSC7 และ DTA7 เป็นเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น จุดเดือด จุดหลอมเหลว สามารถวิเคราะห์พลาสติก พอลิเมอร์ ยา โปรตีนจากเนื้อสัตว์ ดินเหนียวและเคลย์ เป็นต้น ที่มีจุดเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -170 ถึง 500 °C สำหรับ DSC และในช่วง 50 ถึง 1300 °C สำหรับ DTA โดยใช้ปริมาณเพียง 2-10 mg(ดังรูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.17 Differential Scanning Calorimeter (DSC) และ Differential Thermal Analyzer (DTA)

3.3.8 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, FTIR)

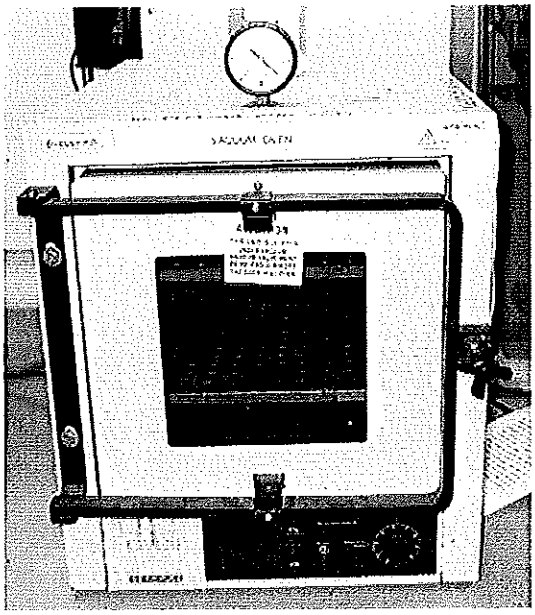
ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น EQUINOK 55 ใช้บันทึก IR Spectrum (ดังรูปที่ 3.18) เพื่อใช้ในการหาหมู่ฟังก์ชั่นของสารเคมี เช่น สารสังเคราะห์ สารสกัดจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ (พืช สมุนไพร สัตว์) ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ พลาสติก พอลิเมอร์ เป็นต้น ซึ่งเทคนิคในการวิเคราะห์มีดังนี้



รูปที่ 3.18 Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)

3.3.9 ตู้อบสุญญากาศ

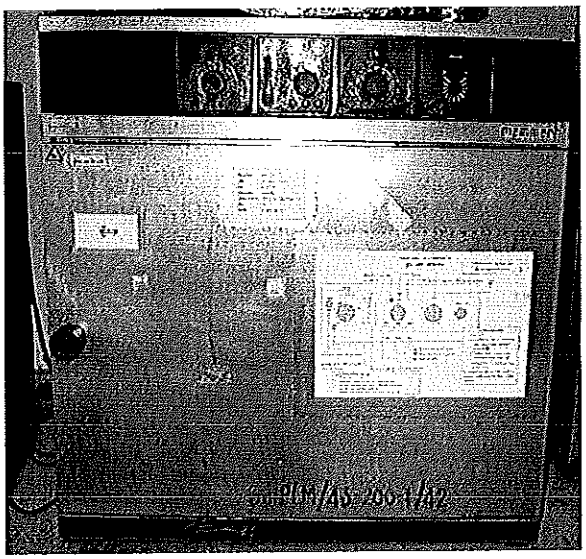
เป็นเครื่องมือที่ใช้อบไล่ความชื้น สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ผลิตโดย Precision Co., Ltd. รุ่น Model 29(ดังรูปที่ 3.19)



รูปที่ 3.19 ตู้อบสุญญากาศ

3.3.10 ตู้อบความร้อน

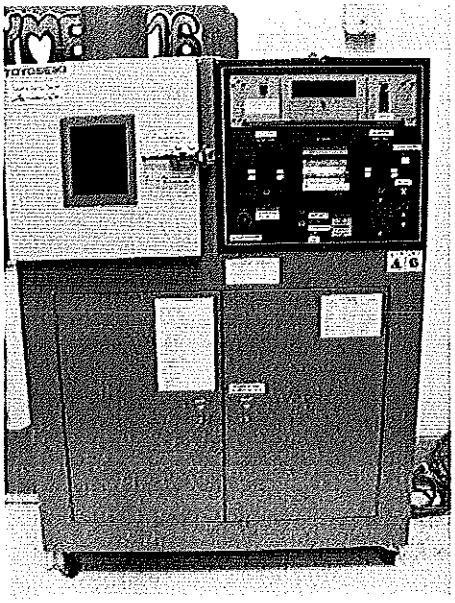
ใช้สำหรับอบแห้งและไล่ความชื้น ผลิตโดย MEMMERT Co., Ltd. รุ่น UFB 400(ดังรูปที่ 3.20)



รูปที่ 3.20 ตู้อบความร้อน

3.3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozonometer)

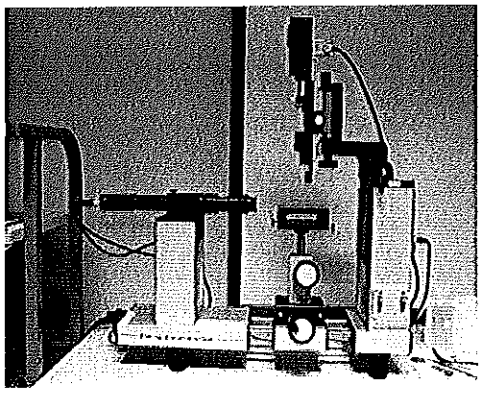
เป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน ผลิตโดย Toyoseiki ชนิด PPHM-S ประเทศญี่ปุ่น โอโซนทำให้ยางแตกในทิศตั้งฉากกับแรงดึง ความเข้มข้นของโอโซน ระยะการยืดและชนิดของยาง มีผลต่อปริมาณและความลึกของรอยแตก ปริมาณความเข้มของโอโซน อาจจะเป็นหน่วยร้อยล้านส่วน (pphm) เช่น 50 100 หรือ 200 pphm เป็นต้น เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซนแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน

3.3.12 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle)

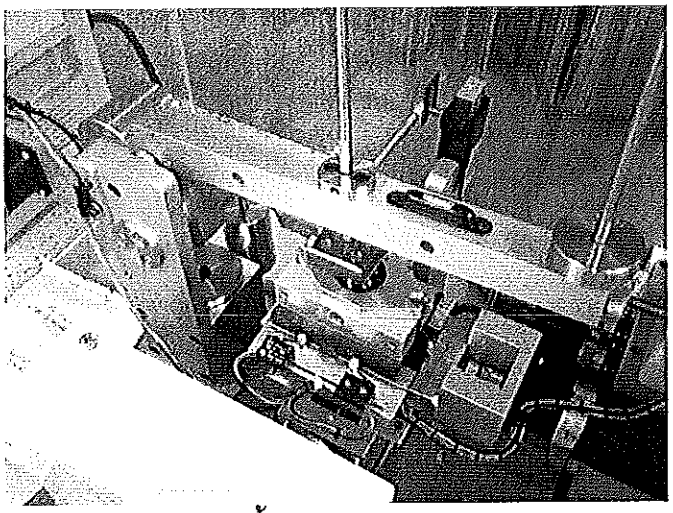
เครื่องวัดมุมสัมผัส Data Physic Contact Angle ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ภาพแสดงเครื่องมือการวัดมุมสัมผัสเชิงฟิสิกส์

3.3.13 เครื่องวัดความเสียดทานของพื้นผิว (Surface friction)

เครื่องวัดแรงเสียดทาน TE 75R Research rubber friction test machine จากบริษัท PLINT (ดังรูปที่ 3.23)



รูปที่ 3.23 เครื่องวัดความเสียดทานของพื้นผิว

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์

นำน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง มาเจือจางให้มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) เท่ากับ 20% เติมสบู่เทอริค 16 A เพื่อให้อนุภาคของยางเสถียร กวนของผสมเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 50 °C หลังจากนั้นเติมกรดฟอร์มิคอย่างช้าๆ แล้วเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นลำดับสุดท้าย สูตรที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์แสดงดังตารางที่ 3.3 ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 20 นาที จึงหยุดปฏิกิริยา เก็บตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป และวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อิพอกไซด์ โดยนำตัวอย่างที่บางส่วนมาจับตัวด้วยเมทานอล หลังจากนั้นนำไปรีดเป็นแผ่นบางๆ ด้วยเครื่องบีบยาง นำไปล้างน้ำให้สะอาดเพื่อกำจัดสารเคมีที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกไป นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C จึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อิพอกไซด์และคำนวณหาปริมาณหมู่อิพอกไซด์โดยใช้กราฟมาตรฐาน (Davey and Loadman, 1984)

ตารางที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์

Chemical	Content (g/l)
High Ammonia Concentrated Latex	192.6
Water	385.4
Hydrogen peroxide	176.9
Formic acid	44.0
10 % Teric 16 A	13.0

3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

3.4.2.1 สูตรที่ใช้ในการเตรียม

ก. อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสม

เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนที่ลงตัวกล่าวคือมีสมบัติต่างๆที่ดีที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาอัตราส่วนต่างๆ ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตามสูตรต่างๆ ดังตาราง 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนต่างๆที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

No.	NR	PVA	MA (% of PVA)
1	100	-	-
2	80	20	20
3	60	40	20
4	50	50	20
5	-	100	20

เพื่อให้การผสมเป็นไปด้วยดีจึงทำการเจือจางให้ส่วนผสมมีความเข้มข้นเท่าๆกันก่อนจะนำมาผสม โดย

- เตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยการนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาละลายน้ำกวนให้ละลายให้มีความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนักโดยคนด้วยแท่งคนแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 70 °C
- เตรียมกรดมาลีอิค โดยการนำกรดมาลีอิคมาละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องให้มีความเข้มข้น 20 % โดยน้ำหนัก
- เตรียมน้ำยางธรรมชาติ โดยการนำน้ำยางธรรมชาติ มาเจือจางโดยการเติมน้ำกลั่น ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 % DRC

ข. ปริมาณกรดมาลีอิค

เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณกรดมาลีอิคที่ลงตัวกล่าวคือมีสมบัติต่างๆที่ดีที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาการใช้ปริมาณกรดมาลีอิคที่อัตราส่วนต่างๆ ดังตาราง 3.5

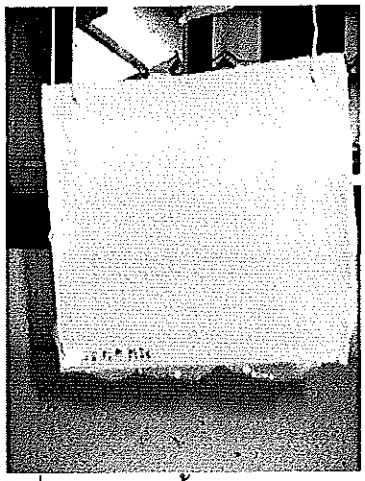
ตารางที่ 3.5 ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

No.	NR	PVA	MA (% of PVA)
1	60	40	-
2	60	40	10
3	60	40	20
4	60	40	30
5	60	40	40
6	60	40	50
7	60	40	60

3.4.3.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม

ทำการผสมยางธรรมชาติกับพอลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิห้อง โดยการนำสารละลายพอลีไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมไว้ ค่อยๆเทลงในน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้แท่งคนแม่เหล็กคนให้เข้ากัน ต่อจากนั้นเติมกรดมาลีอิคลงไป ทำการผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดความเข้ากันได้ หลังจากนั้นนำเทลงบนเพลตตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เพื่อไล่ความชื้นที่เหลืออยู่ให้ออกไป

สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สามารถเตรียมได้เช่นเดียวกันโดยนำน้ำยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 แทนที่น้ำยางธรรมชาติในขั้นตอนนี้

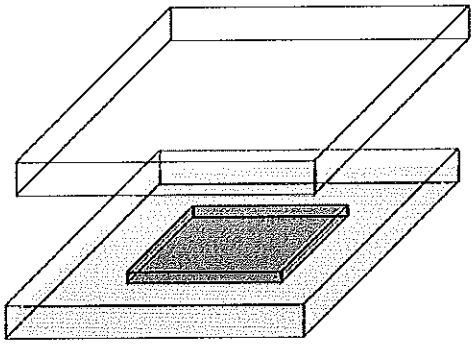


รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติผสมพอลีไวนิลแอลกอฮอล์

3.4.3 การกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยางธรรมชาติ

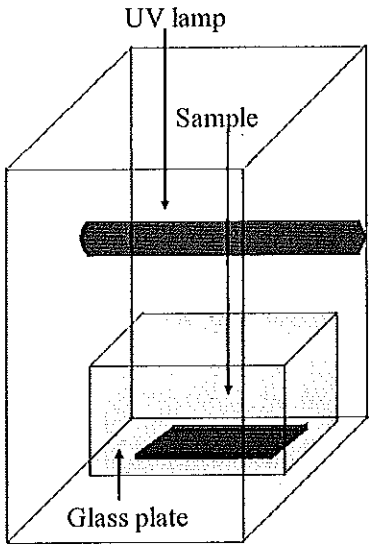
การกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยางธรรมชาติสามารถทำได้โดยการนำแผ่นยางธรรมชาติหรือแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์มาแช่ในกรดอะคริลิค โมโนเมอร์ หลังจากนั้นจึงนำไปให้รังสียูวีเพื่อให้เกิดการกราฟต์ต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดในการเตรียมดังต่อไปนี้

- เตรียมแผ่นยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติอิพอกไซด์ โดยการนำน้ำยางธรรมชาติหรือน้ำยางธรรมชาติอิพอกไซด์เทลงในเพลตกระจก ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปอบในตู้อบสุญญากาศเพื่อไล่ความชื้นที่ยังเหลืออยู่ที่ 40 °C เป็นเวลา 3 วัน จนน้ำหนักคงที่
- นำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มาแช่ในกรดอะคริลิคโมโนเมอร์ 40 mL ตัวริเริ่มปฏิกิริยาคือเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.4 g (ละลายด้วย THF) ผสมในเพลตกระจกที่มีฝาปิด ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 อุปกรณ์สำหรับแช่แผ่นฟิล์มในกรดอะคริลิคโมโนเมอร์

- หลังจากเวลาผ่านไป 10 นาที นำแผ่นฟิล์มใส่ในชุดอุปกรณ์สำหรับให้รังสียูวี ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ชุดอุปกรณ์สำหรับให้รังสียูวี

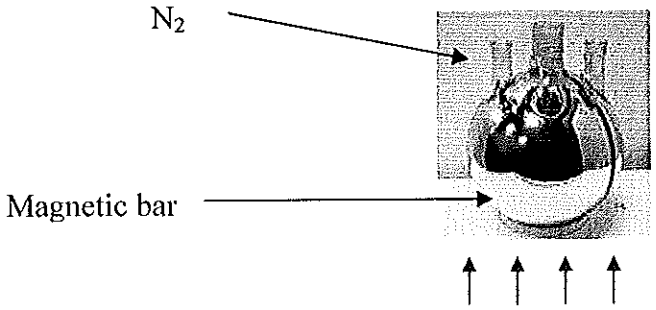
- ทำการให้รังสียูวีเป็นเวลา 10-60 นาที
- นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ 50 °C เป็นเวลา 1 วัน

3.4.4 การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต มี 2 วิธีการ ดังนี้

<u>วิธีที่ 1</u>

สามารถเตรียมการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมด้วยไดไอโซไซยาเนตวิธีที่ 1 ดังนี้

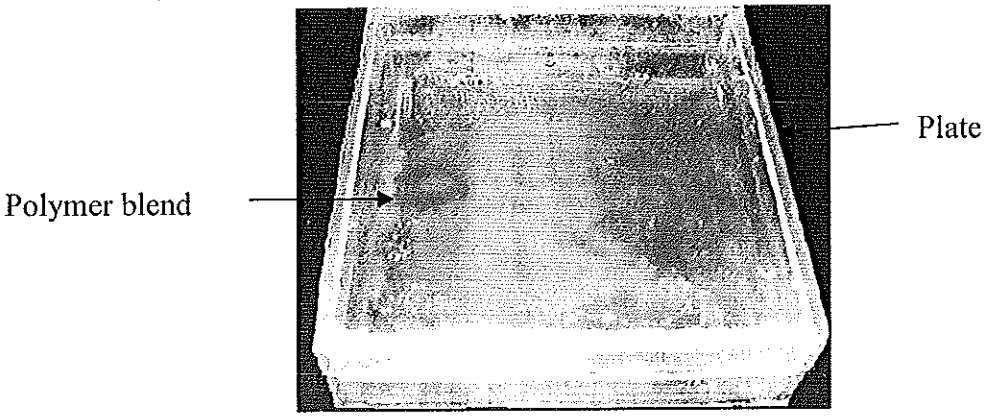


รูปที่ 3.27 การดัดแปรพอลิเมอร์ผสมด้วยไดไอโซไซยาเนตวิธีที่ 1

1. เติมไดไอโซไซยาเนต 50 mL ลงไปในขวดทำปฏิกิริยา โดยเจือจางด้วยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (50/50 % V) กวนด้วยเมกนีติก บาร์ด้วยความเร็วคงที่ ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที
2. ใส่ไดบิวทิลทิน ไดรอเรตเพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยา กวนเป็นเวลา 30 นาที
3. ใส่แผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมขนาด 1 x 1 cm และ 2 x 2 cm กวนต่อเป็นเวลา 30 นาที นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกมาเก็บในเดสซิเคเตอร์ จากนั้นจึงนำแผ่นพอลิเมอร์ชิ้นต่อไปใส่ลงไป ทำแบบนี้ไปเรื่อยๆจนสามารถเคลือบพอลิเมอร์ผสมได้ครบทุกสูตร
4. นำพอลิเมอร์ผสมหลังจากการดัดแปรไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 วัน
5. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ออกมาล้างด้วยเมทานอลเพื่อขจัดส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไป
6. นำไปอบในตู้อบสุญญากาศอีกครั้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 วัน
7. เก็บตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ได้จากการดัดแปรไว้เพื่อใช้ในการทดสอบ

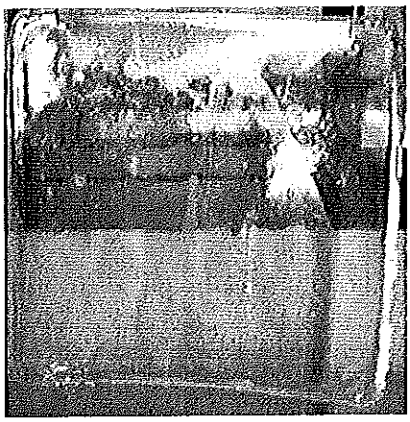
<u>วิธีที่ 2</u>

สำหรับวิธีการที่ 2 ในการเตรียมการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมด้วยไดไอโซไซยาเนต แตกต่างวิธีการแรกคือ วิธีการที่ 2 สามารถเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ได้ทั้งแผ่น ส่วนเงื่อนไขการทดสอบต่างๆมีลักษณะคล้ายกันดังนี้



รูปที่ 3.28 การดัดแปรพอลิเมอร์ผสมด้วยไดไอโซไซยาเนตวิธีที่ 2

1. เติมไดไอโซไซยาเนต 50 mL ลงไปบีกเกอร์ขนาด 250 mL โดยเจือจางด้วยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (50/50 % V) กวนด้วยแท่งคนแม่เหล็กด้วยความเร็วคงที่ ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที
2. ใส่ไดบิวทิลทิน ไดรอเรตเพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยา กวนเป็นเวลา 30 นาที
3. นำไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตที่เตรียมได้เทในเพลตกระจกที่มีฝาปิดดังรูป 3.29
4. ใส่แผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมขนาด 13 x 13 cm แช่ไว้เป็นเวลา 10 นาที นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกมาผึ่งให้แห้งดังรูปที่ 3.30 จากนั้นจึงนำแผ่นพอลิเมอร์ชิ้นต่อไปใส่ลงไป ทำแบบนี้ไปเรื่อยๆจนสามารถเคลือบพอลิเมอร์ผสมได้ครบทุกสูตร
5. นำพอลิเมอร์ผสมหลังจากการดัดแปรไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 วัน
6. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ออกมาล้างด้วยเมทานอลเพื่อขจัดส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไป
7. นำไปอบในตู้อบสุญญากาศอีกครั้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 วัน
8. เก็บตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ได้จากการดัดแปรไว้เพื่อใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.29 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มจากการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมด้วยไดไอโซไซยาเนตวิธีที่ 2

3.4.5 การเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วยพรีพอลิยูรีเทน

การเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรแล้วด้วยพอลิยูรีเทนสามารถทำได้ดังนี้

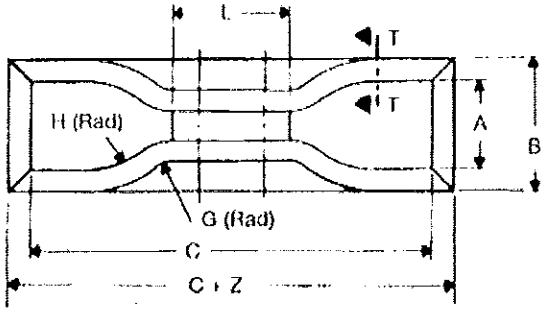
1. ผสมไดเอทิลีนไกลคอลกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนักในบีกเกอร์ขนาด 100 mL
2. หยดไดบิวทิน ไดลอเรตลงไป 2-3 หยด
3. ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาของพอลิยูรีเทนประมาณ 2 นาที (สังเกตความหนืดที่เพิ่มขึ้น)
4. นำพรีพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้เทในเพลตกระจกที่มีฝาปิดดังรูป 3.29
5. ใส่แผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมขนาด 13 x 13 cm แช่ไว้เป็นเวลา 10 นาที นำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ได้ออกมาผึ่งให้แห้งดังรูปที่ 3.30 จากนั้นจึงนำแผ่นพอลิเมอร์ชิ้นต่อไปใส่ลงไป ทำแบบนี้ไปเรื่อยๆจนสามารถเคลือบพอลิเมอร์ผสมได้ครบทุกสูตร
6. นำพอลิเมอร์ผสมหลังจากเคลือบไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 วัน
7. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ออกมาล้างด้วยเมทานอลเพื่อขจัดส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไป
8. นำไปอบในตู้อบความร้อนอีกที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 วัน
9. เก็บตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ได้จากการเคลือบไว้เพื่อใช้ในการทดสอบ

3.4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

3.4.6.1 สมบัติด้านการดึงและยืด (Tensile properties)

ตามมาตรฐาน ASTM D412 (2000) โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปดรัมเบล (drump-bell) ดังรูปที่ 3.30 ขนาดความยาว 115 mm กว้าง 6 ± 4 ใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ die C แสดงในรูปที่ 3.14 ระยะที่ใช้วัด (gauge length) มีระยะห่าง 230 mm วัดความหนา 3 จุด

นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensometer ที่อัตราการดึง 500 ± 50 mm/min รายงานผลเป็น N/mm^2 หรือ MPa



รูปที่ 3.30 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (Die C) สำหรับการทดสอบความทนต่อแรงดึง

$$\text{stress at break, } \sigma_b = \frac{F}{A} \qquad (3.1)$$

โดยที่

F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (mm^2)

3.4.6.2 ความสามารถในการยืด (Elongation at break)

ทำการทดสอบเหมือนกับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ตามหัวข้อ 3.4.6.1 ค่าที่ได้จะวัด โดยการอ่านระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการยืดตัว

$$\text{elongation at break, } \varepsilon_b = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \qquad (3.2)$$

โดยที่

L = ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้สูงสุดจนขาด

L_0 = ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ

3.4.6.3 โมดูลัสที่ระยะยืด 100 % และ 300 %

โดยการวัดความเครียด (strain) ของยางที่ยืดออก 100 % และ 300 % จากระยะเดิม การทดสอบจะทำการทดสอบเหมือนการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ตามหัวข้อ 3.4.6.1 รายงานผลเป็น N/mm^2 หรือ MPa

การคำนวณ

$$300\ \%\ \text{Modulus (MPa)} = f/A \qquad (3.3)$$

โดยที่

f = แรงยืดของยางที่ระยะยืด 300 % (N)

A= พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของยาง (ตารางมิลิเมตร)

3.4.7 สมบัติด้านการบ่มเร่ง (Aging properties)

ตามมาตรฐาน ASTM โดยนำชิ้นทดสอบดรัมเบล ไปบ่มเร่งเป็นเวลา 72 hours ที่อุณหภูมิ 100 °C แล้วนำชิ้นทดสอบไปวางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 16 hours แต่ไม่เกิน 96 hours แล้วนำไปทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืด

3.4.8 การทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance)

ทำการทดสอบความต้านทานต่อตัวทำละลาย คือ น้ำ โทลูอีน เตตระไฮโดรฟูราน คลอโรฟอร์ม และไซโคลเฮกเซน โดยทดสอบการบวมตัว (Swelling test) ซึ่งจะทำตามมาตรฐาน ASTM D417 (2000) โดยนำชิ้นทดสอบมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีความกว้าง 1 cm ความยาว 1 cm มีความหนาประมาณ 1 mm ชั่งนำหนักชิ้นทดสอบละเอียด 0.0001 g แช่ในตัวทำละลาย 50 mm ซึ่งบรรจุอยู่ในขวดสีชาปิดภาชนะให้มิดชิด เป็นเวลา 166 hours จึงนำชิ้นทดสอบมาชั่งนำหนักอีกครั้ง คำนวณดังสมการ 3.4 จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาอบแห้งอีกครั้ง คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การละลาย ดังสมการ 3.5

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัว ดังสมการ

$$\%\ \text{swelling} = ((W_1\text{-}W)/W) \times 100 \qquad (3.4)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่ชั่งได้หลังจากแช่ในตัวทำละลายเป็นเวลา 5 วัน

W คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่ชั่งได้หลังอบ

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การละลาย ดังสมการ

$$\%\ \text{การละลาย} = ((W\text{-}W_1)/W) \times 100 \qquad (3.5)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างที่ชั่งได้ก่อนแช่ในตัวทำละลาย

W_1 คือ น้ำหนักหลังอบแห้งของชิ้นตัวอย่างที่แช่ในตัวทำละลายเป็นเวลา 5 วัน



รูปที่ 3.31 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบดูการละลายของพอลิเมอร์ผสม

3.4.8.1 การทดสอบการดูดซับ (sorbtion) และการคายออก (desorbtion) ในน้ำและโทลูอีนที่อุณหภูมิห้อง

การทดสอบการดูดซับและการคายออกในน้ำและโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 % ก่อนและหลังวัลคาไนซ์ โดยมีผลการทดลองและวิธีการคำนวณค่าการทดสอบการดูดซับและการคายออกดังนี้

การทดสอบการดูดซับ

นำชิ้นตัวอย่างขนาด 2 ×2 × 0.2 cm สูตรละ 3 ชิ้น บันทึกน้ำหนัก จึงนำชิ้นตัวอย่างมาแช่ในสารละลาย ปริมาตร 15 mL ตั้งทิ้งไว้รอให้พอลิเมอร์ผสมบวมตัว บันทึกน้ำหนักที่เวลาต่างๆ

การทดสอบการคายออก

นำยางจากการทดสอบการดูดซับจนมีน้ำหนักคงที่ มาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สารระเหยออกจากเนื้อพอลิเมอร์ผสมไปสู่บรรยากาศ บันทึกน้ำหนักที่เวลาต่างๆ จนคงที่

การคำนวณการดูดซับและการคายออก

ปริมาณการดูดซับที่ช่วงเวลาต่างๆ (Q_t , % โมล) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณการดูดซับที่ช่วงเวลาต่างๆ} = \frac{\text{โมลของตัวทำละลาย}}{\text{มวลของชิ้นตัวอย่าง (g)}} \times 100 \text{ (g)}$$

3.4.9 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริก

เตรียมชิ้นตัวอย่าง โดยเลือกช่วงอุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 30-800°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะทดสอบ 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน รายงานผลการทดสอบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและอุณหภูมิการเสื่อมสลายของสสาร (thermal degradation temperature, T_d) เช่น T_5 คืออุณหภูมิเมื่อน้ำหนักหายไป 5%

3.4.10 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์

เตรียมชิ้นตัวอย่าง โดยทำการทดสอบแบบดึง และชนิดของการทดสอบ dynamic temperature ramp ความถี่ของการทดสอบ 1.0 Hz. โดยควบคุมอัตราการดึงให้คงที่ไว้เป็น 0.1 0.2 0.5 0.8 1.2 1.5 1.6 และ 2.0% ทดสอบที่อุณหภูมิ 70 $^{\circ}C$

3.4.11 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยรังสีอินฟราเรดโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

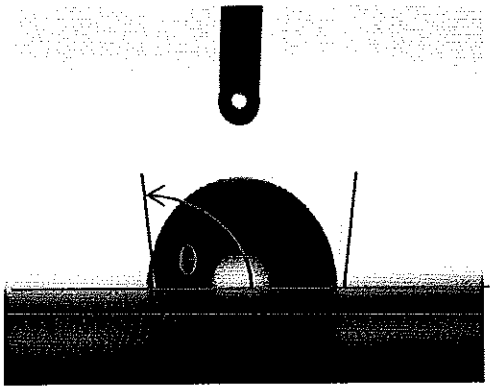
วิธีการทดสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร-มิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, FTIR) ทดสอบโดยการหยดสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบลงบนเซลล์โซเดียมคลอไรด์ ประมาณ 1-2 หยด หรือในปริมาณที่น้อยที่สุด แล้วจึงนำเซลล์ดังกล่าววางลงบนแท่นวางตัวอย่าง ในกรณีตัวอย่างเป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 2-3 mm ให้วางลงบนแท่นวางตัวอย่างแทนการใช้เซลล์โซเดียมคลอไรด์ นำแท่นวางตัวอย่างเข้าสู่เครื่องทดสอบ ทำการทดสอบแบบแอทเทนนูเอดเตตโทโทลรีเฟลคชันอินฟราเรด (attenuated total reflection infrared, ATR) โดยใช้ช่วงเลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm^{-1} ใช้จำนวนที่สแกน 256 ครั้ง รายงานผลในรูปสเปกตรัมของชิ้นตัวอย่าง

3.4.12 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์ผสม โดยการนำชิ้นตัวอย่างตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในถาดอะลูมิเนียม (Aluminum pan) วิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 25-400$^{\circ}C$ อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 5$^{\circ}C$/min ใช้น้ำแข็งเป็นสารทำความเย็น ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

3.4.13 การวัดมุมสัมผัส

การวัดมุมสัมผัส (contact angle) เป็นการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์กับพลังงานพื้นผิวของเทปกาวที่เตรียมได้จากวัสดุที่แตกต่างกัน วิธีการใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส Data Physics Contact Angle ดังรูปที่ 3.32 โดยเริ่มจากการเตรียมชิ้นตัวอย่าง ขนาด 2x5 cm ติดลงบนแผ่นสไลด์ วางตัวอย่างบนแท่นทดสอบ ปรับให้ได้ตำแหน่งระยะโฟกัสของกล้อง CCD ปรับโฟกัสภาพให้ชัดก่อนถ่าย แล้วทำการวัดมุมสัมผัสโดยหยดน้ำกลั่นลงบนพื้นผิวตัวอย่าง โดยกล้องจะทำการบันทึกภาพและคำนวณมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำบนพื้น ผิวของเทปกาว บันทึกผลและทดลองซ้ำในตำแหน่งถัดไปของตัวอย่าง ประมาณ 3-5 จุด

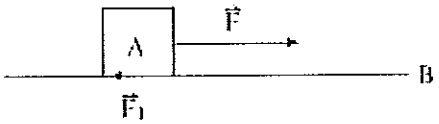


รูปที่ 3.32 ภาพแสดงลักษณะตัวอย่างขณะทำการวิเคราะห์มุมสัมผัส

3.4.14 การวัดความเสียดทานของพื้นผิว

แรงเสียดทาน (friction) เป็นแรงที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุหนึ่งพยายามเคลื่อนที่ หรือกำลังเคลื่อนที่ไปบนผิวของอีกวัตถุ เนื่องจากมีแรงมากระทำ มีลักษณะที่สำคัญ ดังนี้

1. เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุ
2. มีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางที่วัตถุเคลื่อนที่หรือตรงข้ามทิศทางของแรงที่พยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่ดังรูปที่ 3.33



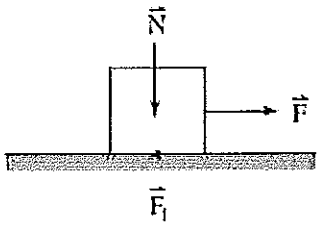
รูปที่ 3.33 ภาพแสดงลักษณะของแรงเสียดทาน

ถ้าวาง A อยู่บนวัตถุ B ออกแรง $\vec{F}$ลากวัตถุ วัตถุ A จะเคลื่อนที่หรือไม่ก็ตาม จะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นระหว่างผิวของ A และ B แรงเสียดทานมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรง $\vec{F}$ที่พยายามต่อต้านการเคลื่อนที่ของ A รูปที่ 3.33 แสดงลักษณะของแรงเสียดทาน

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสคู่หนึ่งๆ คือ อัตราส่วนระหว่างแรงเสียดทานต่อ

แรงกดตั้งฉากกับผิวสัมผัส



กำหนดให้ $\vec{F}$ = แรงลากวัตถุ

$\vec{F}_f$ = แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส

$\vec{N}$ = แรงกดตั้งฉากกับผิวสัมผัส

μ = สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

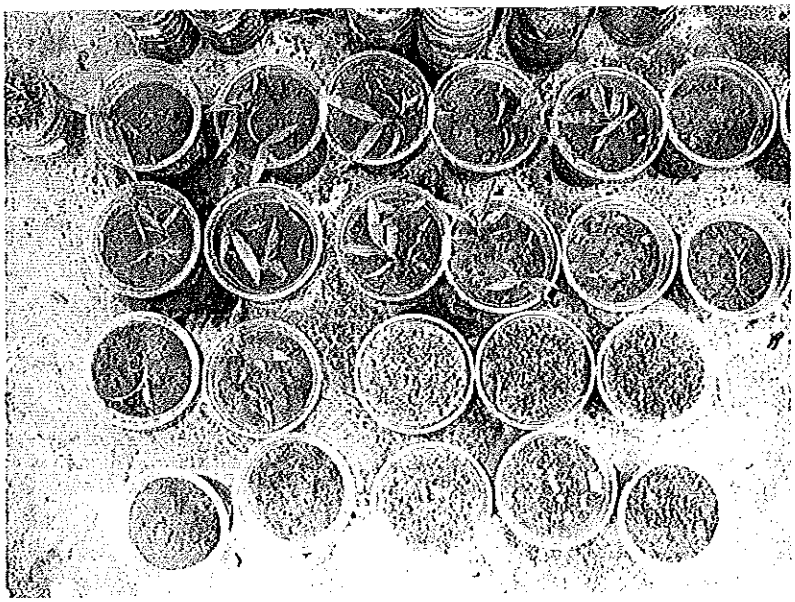
$\therefore$ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหาได้จากสูตร

$$\mu = \frac{\vec{F}_f}{\vec{N}}$$

สำหรับการทดสอบวัดความเสียดทานของพื้นผิวใช้ชิ้นตัวอย่างขนาด 2.5 × 8 cm การการทดสอบด้วยเครื่อง เครื่องวัดแรงเสียดทาน TE 75R Research rubber friction test machine ดังรูป 3.23

3.4.15 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

นำชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบฝังดินขนาด 1 × 5 cm ใส่ในแก้วพลาสติกดังรูป ทำการทดสอบฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยถ่ายรูปชิ้นตัวอย่างก่อนทดสอบฝังดินเพื่อนเปรียบเทียบกับหลังการทดสอบฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน สังเกตการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 ภาพลักษณะการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

3.4.16 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน

ชิ้นทดสอบขนาด 1 cm × 6 cm หนา 2.0 ± 0.2 cm ความยาวระหว่างรอยจับให้ยางยืด ไม่ต่ำกว่า 40 mm ความเข้มของโอโซนที่ใช้ 50 ± 5 pphm อุณหภูมิที่ใช้ 40 ± 2 °C ยืดตัวอย่าง 20 % ใส่ในตู้โอโซนเป็นเวลา 72 hours จึงนำมาตรวจรอยแตก รายงานผลโดยรายงานว่าเกิดรอยแตกหรือไม่ ถ้าเกิดรอยแตกให้บรรยายลักษณะรอยแตกด้วย เช่น รอยเดียว จำนวนรอยแตกต่อพื้นที่ ความยาวเฉลี่ยของรอยแตกที่ใหญ่ที่สุดจำนวน 10 รอยและถ่ายรูปไว้

3.4.17 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์

ทำการวิเคราะห์การเกิดผลึกในตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่อง X' Pert MPD, Philips X-ray diffractometer โดยใช้หลอดทดสอบคอบเปอร์ โปรแกรมในการสแกนใช้ geo new-0.4

1. ทำการทดสอบโดยใช้อัตรามุมตกกระทบของรังสีเอกซ์ต่อเวลาเท่ากับ 4°/min เลือกมุมองศาในการทดสอบตั้งแต่ 5-90 (2θ) ใช้กำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการทดสอบเท่ากับ 35 kV และ 25 mA ตามลำดับ

2. สเปกตรัมของสารที่ตรวจสอบได้ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมองศาที่รังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนและผลึกของสารที่ทำการทดสอบ

3.4.18 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM มีวิธีดังนี้

1. นำชิ้นตัวอย่างขนาด 5x20 mm ความหนาประมาณ 1-2 mm ไปแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 5-10 min แล้วทำการหักทันที พยายามให้รอยหักเรียบที่สุด

2. นำส่วนที่หักไปติดลงบนตลับทองเหลือง โดยหันปลายที่หักขึ้นข้างบน จากนั้นนำไปเคลือบด้วยชั้นทองคำบางๆ เพื่อให้ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้

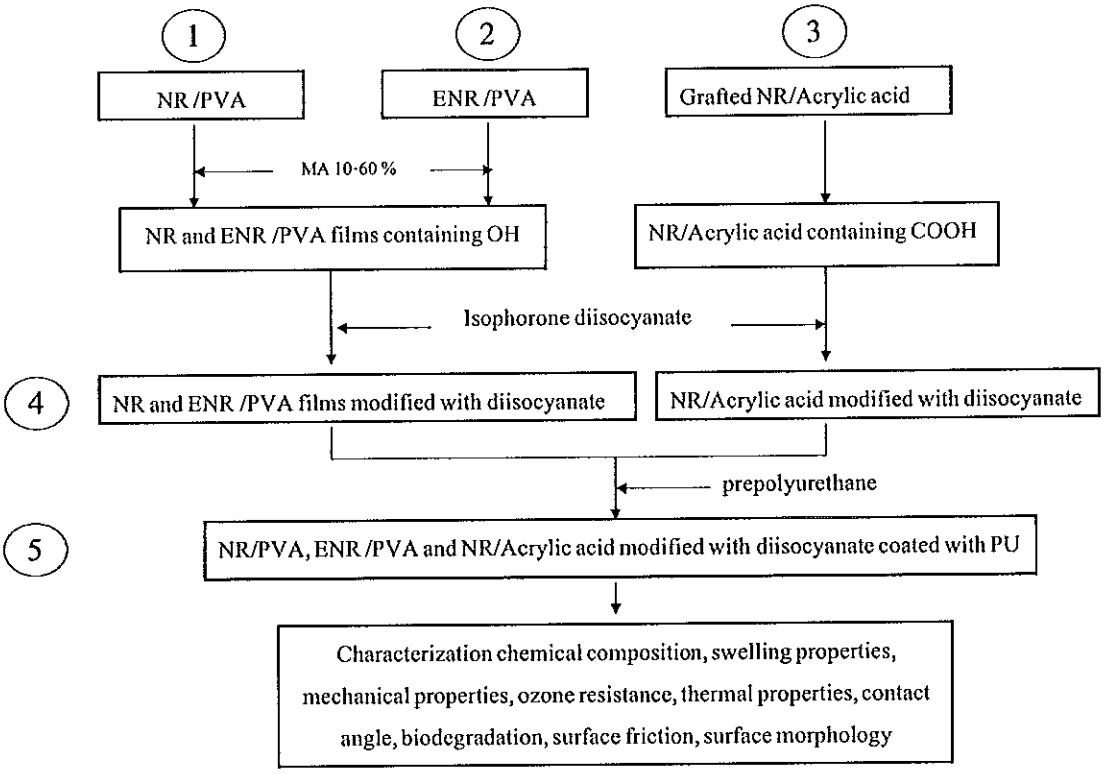
3. นำไปวิเคราะห์โครงสร้างภายนอก ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กระแสลำอิเล็กตรอนเท่ากับ 10 kV

3.4.19 การทดสอบความต้านทานการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

ทดสอบตาม AATCC 147 (Modified):Antibacterial Activity Assessment of Textile Materials เป็นการหา Clear zone ซึ่งสามารถทำโดยการบ่มเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อก่อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 ^{o}C สำหรับเชื้อ Escherichia coli ATCC 25922 จากนั้นทำการเจือจางเชื้อที่บ่มในอัตราส่วน 1:10 จุ่มเชื้อมาลากลงบนจานแก้วที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ ตัดชิ้นไฮโดรเจลทดสอบเป็นรูปวงรีที่มีขนาด 25 มิลลิเมตรและยาว 50 มิลลิเมตร ทำให้แผ่นไฮโดรเจลปราศจากเชื้อที่ผิวหน้าด้วยแสงยูวีด้านละ 15 นาที แล้วนำไม้พันสำลีจุ่มเชื้อจุลินทรีย์ลากเป็นเส้นยาว 60 มิลลิเมตร จำนวน 5 เส้น ซึ่งแต่ละเส้นห่างกัน 10 มิลลิเมตร ลงบนแผ่นวุ้นที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อของจุลินทรีย์ในจานแก้ว นำไฮโดรเจลทดสอบวางให้แนบที่สุดบนจานแก้ว จากนั้นเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตว่ามีขอบเขตที่ปลอดเชื้อจุลินทรีย์ที่เรียกว่า Clear zone ทำการวัด Clear zone ที่เกิดขึ้น คำนวณหาความกว้างของ Clear zone ที่เป็นขอบเขตในการยับยั้งจุลินทรีย์ไม่ให้เจริญเติบโต

3.5 บทสรุปของงานวิจัย

บทสรุปของงานวิจัยที่จะทำทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังแผนภาพข้างล่าง



รูปที่ 3.35 แผนภาพบทสรุปงานวิจัยทั้งหมด

เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นจึงแบ่งงานวิจัยออกเป็น 5 ส่วนดังนี้คือ *ส่วนที่ 1* เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ *ส่วนที่ 2* เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ *ส่วนที่ 3* เป็นการศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค *ส่วนที่ 4* เป็นการดัดแปรแผ่นยางผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต *ส่วนที่ 5* ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการศึกษาการเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วยพอลียูเทน ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆจะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของการปรับปรุงผิวยางธรรมชาติในรูปแผ่นโดยการดัดแปรทางเคมี โดยเริ่มต้นจากการเตรียมการผสมน้ำยางธรรมชาติและสารละลายพอลิไวนิลแอกอฮอล์ และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในสภาวะน้ำยางกับสารละลายพอลิไวนิลแอกอฮอล์ เพื่อเป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้กับผิวยางธรรมชาติ และการเตรียมการกราฟต์กรดอะคริลิคบนผิวยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลิค จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และพรีพอลิยูรีเทนตามลำดับ เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้นจึงแบ่งงานวิจัยออกเป็น 6 ส่วน ดังนี้คือ *ส่วนที่ 1* เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ *ส่วนที่ 2* เป็นการศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ *ส่วนที่ 3* เป็นการศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค *ส่วนที่ 4* เป็นการเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากข้อ 1-3 *ส่วนที่ 5* เป็นการดัดแปรแผ่นยางผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต *ส่วนที่ 6* ซึ่งเป็นส่วนสุดท้าย กล่าวถึงการศึกษาการเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วยพอลียูเทน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

4.1.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

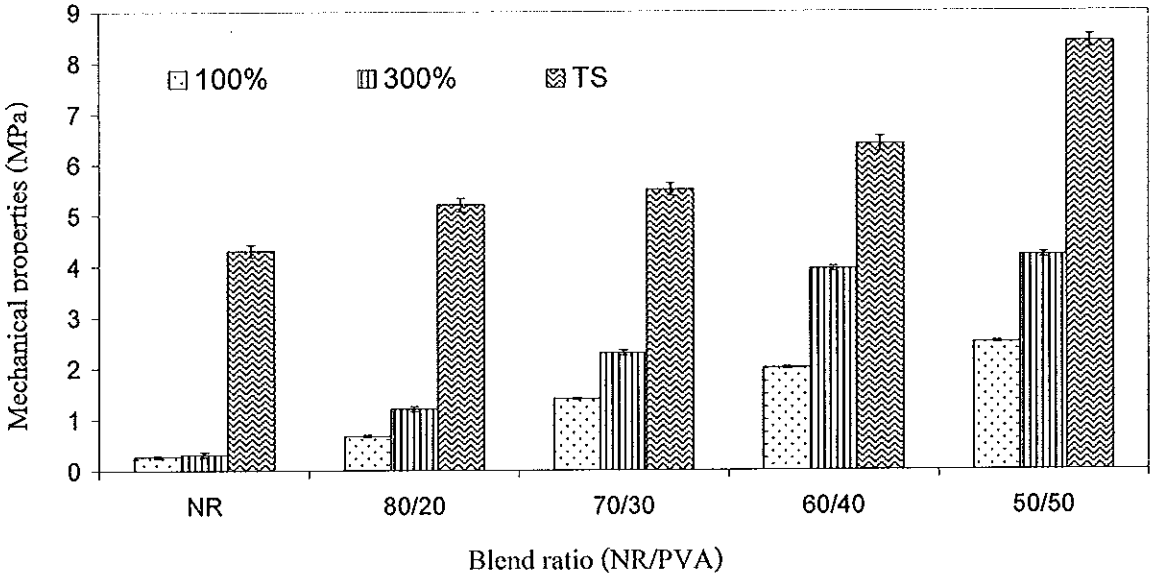
สำหรับการเตรียมแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA โดยการใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมโยง ทำการศึกษาสภาวะต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสม ปริมาณกรดมาลีอิค อุณหภูมิและระยะเวลาในการเชื่อมขวาง ซึ่งมีรายละเอียดที่ได้ทำการศึกษาต่อไปนี้

4.1.1.1 อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสม

ทำการศึกษาอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ NR/PVA โดยแปรอัตราส่วนระหว่าง NR/PVA เป็น 80/20 70/30 60/40 และ 50/50 เปรียบเทียบกับ NR และ PVA โดยใช้กรดมาลีอิคในปริมาณ 20% ของ PVA สำหรับทุกอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม ในขั้นแรกได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล เพื่อดูความเหมาะสมในแต่ละอัตราส่วน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA อันได้แก่ ค่าความต้านทานต่อแรงดึง 100% และ 300% มอดุลัส ดังรูปที่ 4.1 พบว่าที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของ

PVA ที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยปกติของยาง NR ที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางเป็นวัสดุที่เรียกว่าวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) (Aleksey D. Drozdov and Al Dorfmann, 2002) จึงจำเป็นต้องมีการเชื่อมขวางโดยใช้สารเชื่อมขวางที่นิยมเช่น กำมะถัน เพื่อให้มีสมบัติของความเป็นอิลาสติกเต็มตัวไม่เกิดการไหลเยิ้ม แต่ในงานวิจัยครั้งนี้ไม่มีการใส่สารวัลคาไนซ์ให้กับยาง NR ค่าสมบัติเชิงกลของแผ่นยาง NR ที่ได้จากการทดลองในรูปที่ 4.1 จึงค่อนข้างต่ำ โดยในงานวิจัยนี้ใช้การเชื่อมขวางของ PVA กับกรดมาลีอิค (Gohil *et al.*, 2002) ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า โครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ (Semi-interpenetrating polymer network) ซึ่งกรดมาลีอิคเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของ PVA และมัดสายโซ่ของยาง NR ไว้ดังรูปที่ 4.2 ทำให้ค่าของสมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

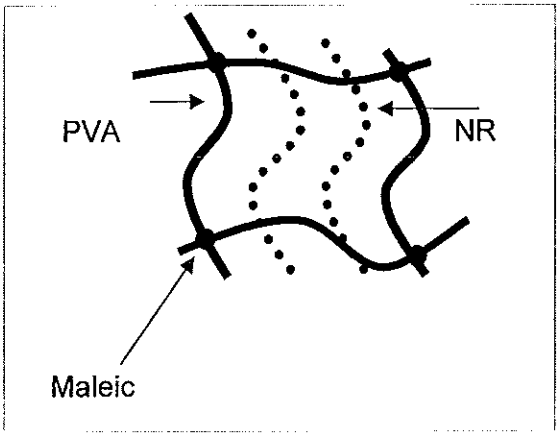


รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 80/20 70/30 60/40 และ 50/50 เปรียบเทียบกับ NR

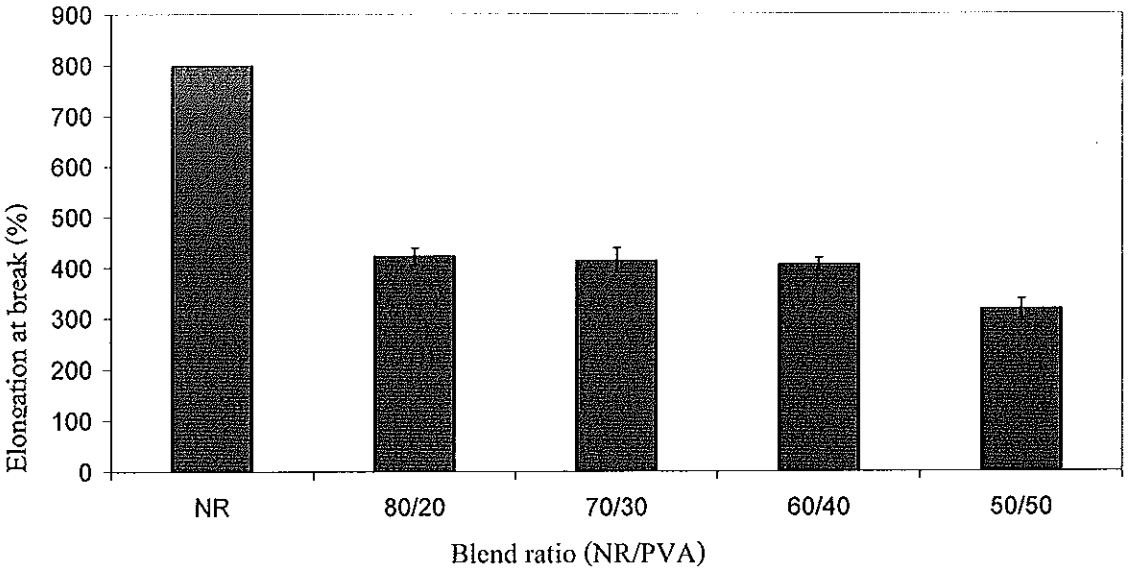
ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 4.3 พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อสัดส่วนของ PVA ที่ใช้เพิ่มขึ้น ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกันกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง 100% และ 300% มอดุลัส สาเหตุที่ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสมลดลงเป็นเพราะว่า ส่วนที่มีการยืดคือส่วนของยาง NR เมื่อมีการเชื่อมขวาง PVA กับกรดมาลีอิคดังรูปที่ 4.2 เป็นการมัดสายโซ่ไว้ทำให้ยาง NR ยืดได้น้อยลงนั่นเอง (กรดมาลีอิคไม่เกิดปฏิกิริยากับยางธรรมชาติเนื่องจากไม่มีการใส่ตัวริเริ่มปฏิกิริยา)

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เห็นได้ว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PVA ที่เพิ่มขึ้น แต่ตรงกันข้ามกับค่าความสามารถในการยืดที่มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาสมบัติ

เชิงกลและค่าความสามารถในการยืดแล้วในงานวิจัยนี้จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40



รูปที่ 4.2 ลักษณะการเกิดโครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

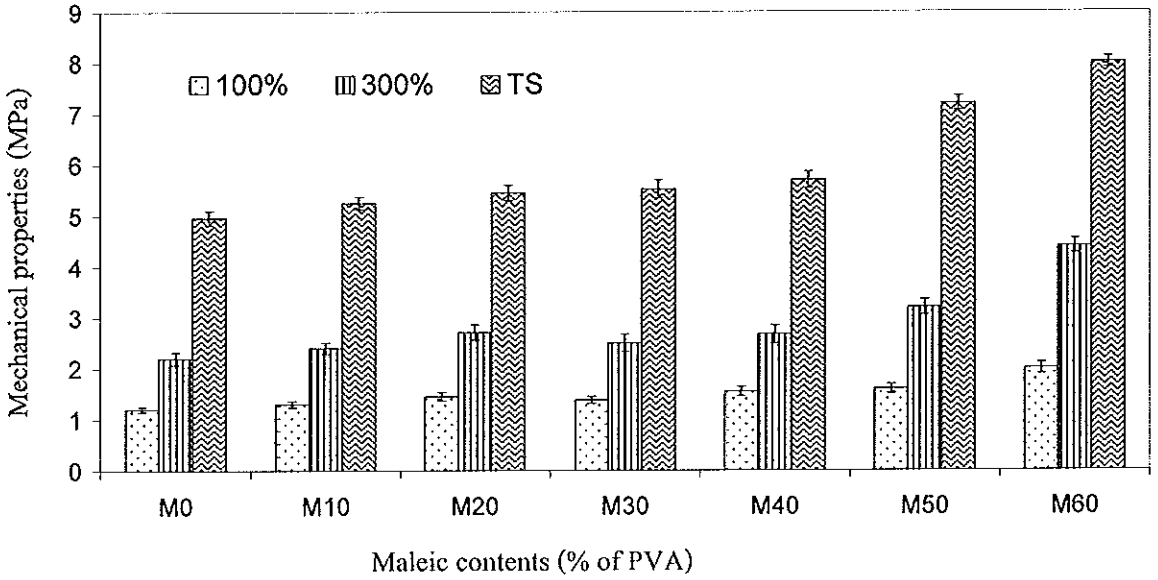


รูปที่ 4.3 ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆคือ 80/20 70/30 60/40 และ 50/50 เปรียบเทียบกับ NR

4.1.1.2 ปริมาณกรดมาลีอิก

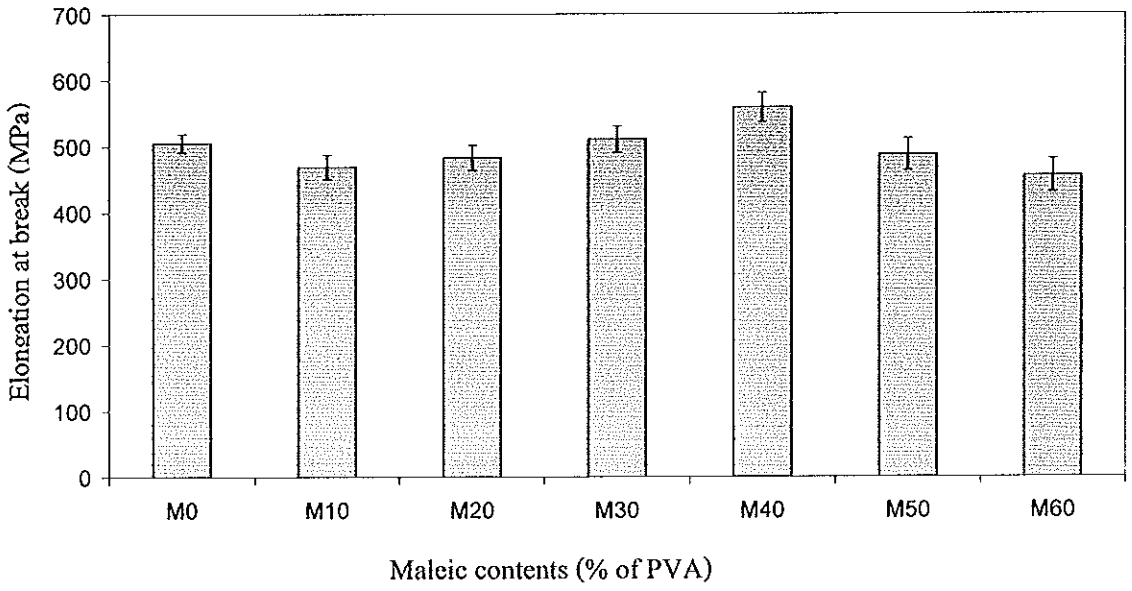
ทำการศึกษาปริมาณกรดมาลีอิคที่ใช้เชื่อมขวางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ซึ่งดูจากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.1.1 โดยแปรปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 10 20 30 40 50 และ 60% ของ PVA เปรียบเทียบกับ NR และ PVA ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลได้ดังนี้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณการใช้สารเชื่อมขวางต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่า 8 MPa ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิคแสดงไว้ในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 เมื่อปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 10 20 30 40 50 และ 60%

ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณการใช้สารเชื่อมขวางต่างๆ ดังรูปที่ 4.5 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ใช้เพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนถึงปริมาณการใช้สารเชื่อมขวาง 40 % ซึ่งมีค่าความสามารถในการยืดเท่ากับ 560% หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มสารเชื่อมขวางเป็น 50 และ 60 % ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มที่ลดลง โดยที่ปริมาณกรดมาลีอิค 60% มีค่าความสามารถในการยืดเพียง 460%

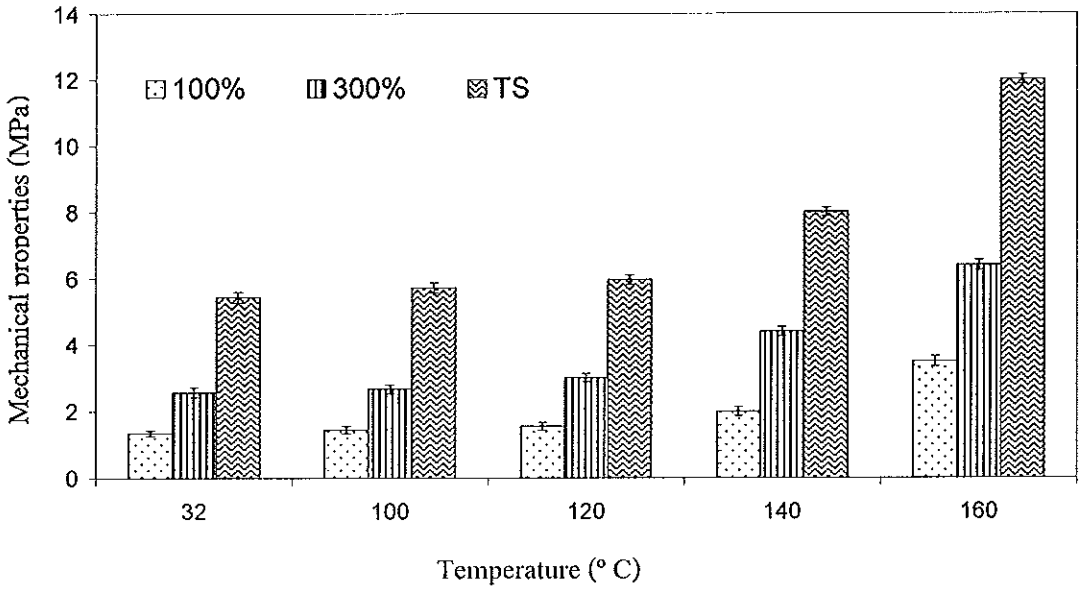


รูปที่ 4.5 ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 เมื่อปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 10 20 30 40 50 และ 60%

4.1.1.3 อุณหภูมิในการเชื่อมขวาง

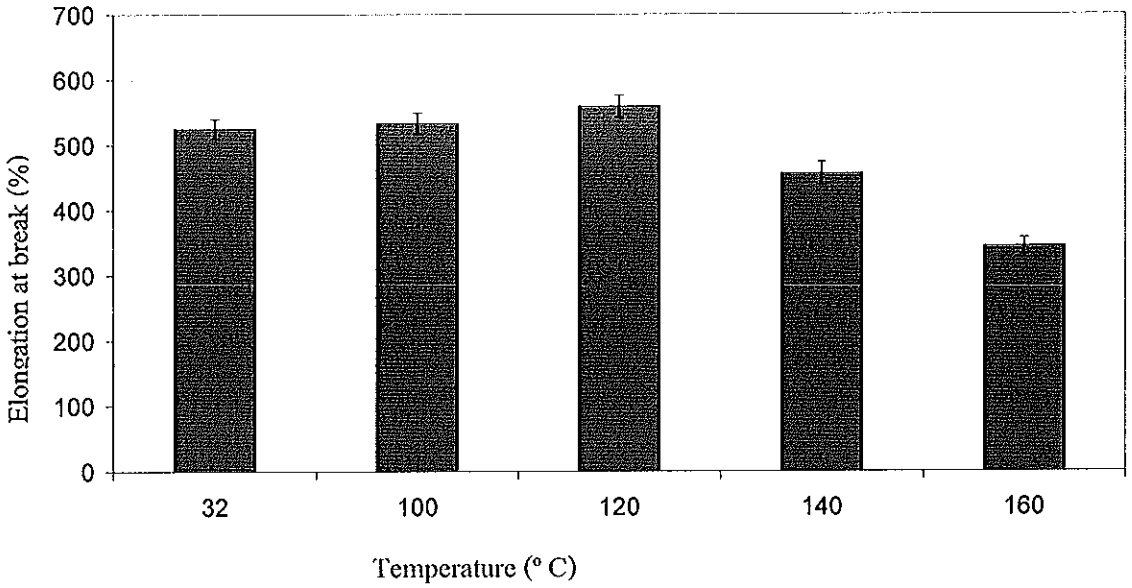
ทำการศึกษาอุณหภูมิในการเชื่อมขวาง โดยนำมาทำการแปรอุณหภูมิในการเชื่อมขวางเป็น 32 100 120 140 และ160 ° C ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อให้ได้อุณหภูมิในการเชื่อมขวางที่เหมาะสมนั้น สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

จากรูปที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA พบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิในการเชื่อมขวางเท่ากับ 160°C พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 12 MPa ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นการเร่งให้เกิดปฏิกิริยากันระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิคดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 40 เมื่ออุณหภูมิในการเชื่อมขวางเป็น 32 100 120 140 และ160 °C

จากรูป 4.7 พบว่าค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกหลังจากการเชื่อมขวางจนถึงอุณหภูมิ 120 °C โดยมีค่าความสามารถในการยืดเท่ากับ 560% หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเร่งมากขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการยืดลดลง โดยที่อุณหภูมิในการเชื่อมขวางเท่ากับ 160 °C พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่าความสามารถในการยืดเหลือเพียง 340% ซึ่งการลดลงของค่าความสามารถในการยืดเกิดขึ้นเนื่องมาจากการเสื่อมของยาง NR กล่าวคืออุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้พันธะคู่ที่มีมากในยาง NR เกิดการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (C. Nakason *et al.*, 2005) ทำให้เกิดการขาดจากกันตรงตำแหน่งนี้ได้ง่าย



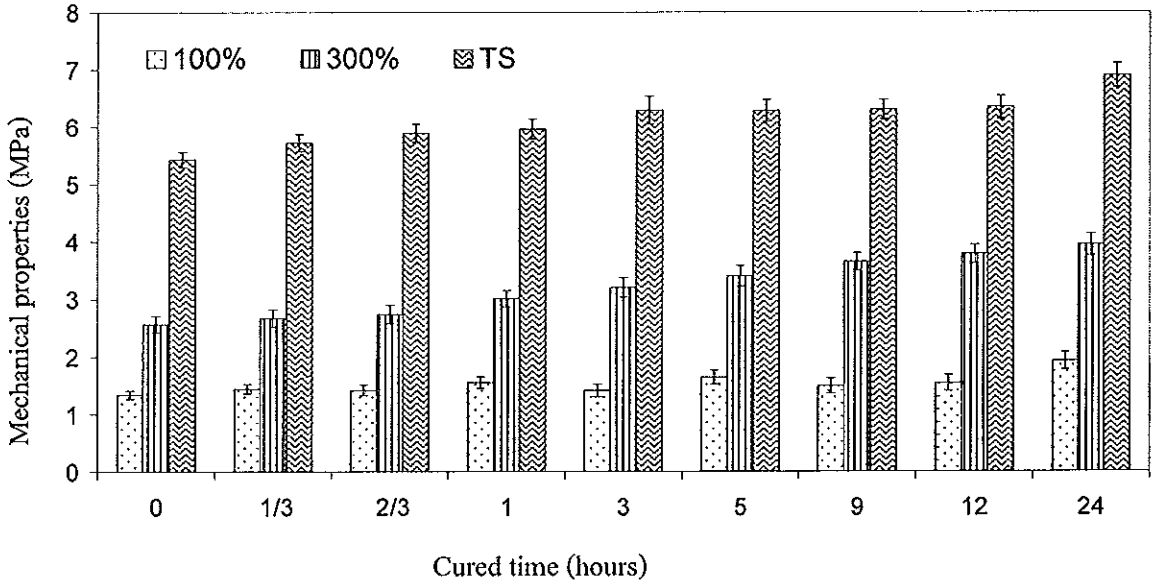
รูปที่ 4.7 ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 40 เมื่อระยะเวลาในเชื่อมขวางเป็น 32 100 120 140 และ160 °C

4.1.1.4 ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง

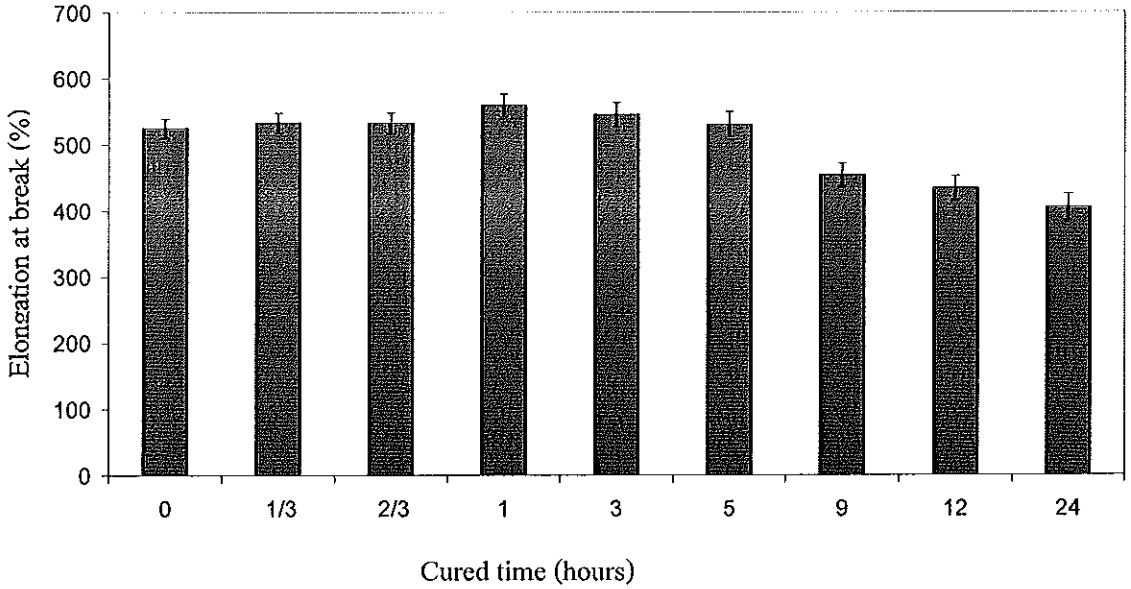
ทำการศึกษาระยะเวลาในการเชื่อมขวาง โดยนำมาทำการแปรระยะเวลาในการเชื่อมขวางเป็น 1/3 2/3 1 3 5 9 12 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อให้ได้อุณหภูมิในการเชื่อมขวางที่เหมาะสมนั้น สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดังรูปที่ 4.8 พบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาการเชื่อมขวาง 24 ชั่วโมง พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 6.89 MPa ซึ่งระยะเวลาในการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มระยะเวลาในเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิคเมื่อระยะเวลานานขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นนั่นเอง

ค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดังรูปที่ 4.9 พบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนถึงการบ่มเร่งเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะทำให้ได้ค่าความสามารถในการยืดสูงที่สุดคือ 560 % หลังจากผ่านช่วงนี้ไปแล้ว ค่าความสามารถในการยืดมีแนวโน้มที่ตกลง โดยที่ระยะเวลาการเชื่อมขวาง 24 ชั่วโมง พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความสามารถในการยืดเพียง 405% เนื่องมาจากการเสื่อมของยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.8 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 40 เมื่ออุณหภูมิในการเชื่อมขวางเป็น 120 ° C ระยะเวลาในเชื่อมขวางเป็น 1/3 2/3 1 3 5 9 12 และ24 ชั่วโมง



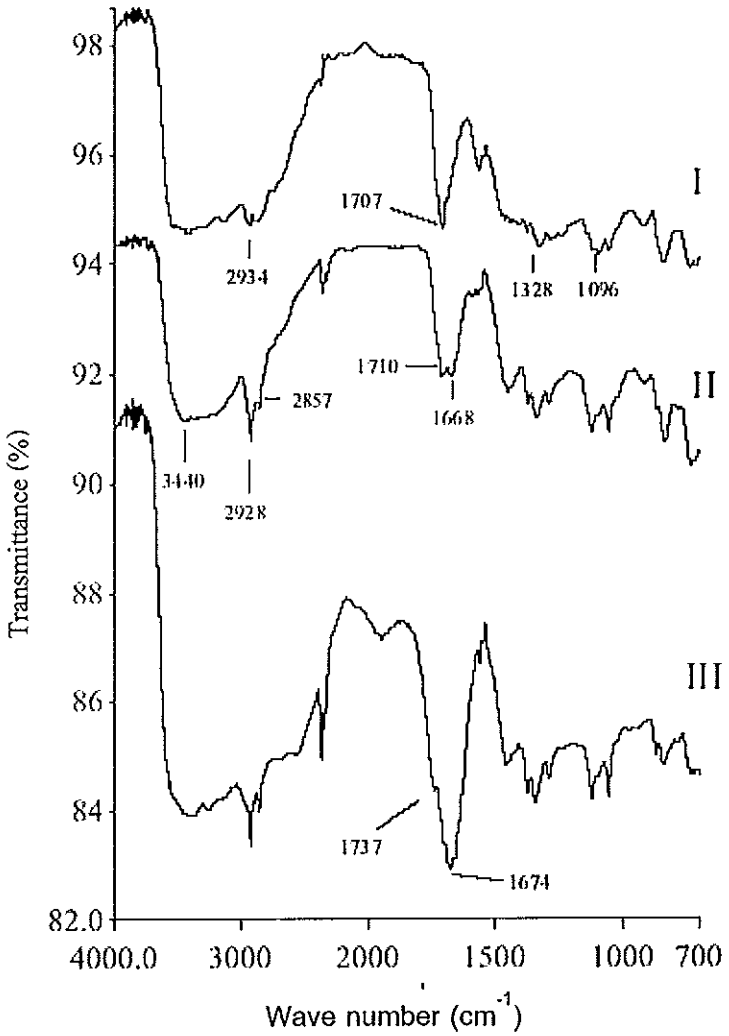
รูปที่ 4.9 ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ปริมาณของกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 40 เมื่ออุณหภูมิในการเชื่อมขวางเป็น 120 ° C ระยะเวลาในการเชื่อมขวางเป็น 1/3 2/3 1 3 5 9 12 และ24 ชั่วโมง

4.1.2 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เพื่อเป็นการยืนยันปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค โดยการทดลองในตอนนี้มีเทคนิคที่ใช้ในการยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น 2 เทคนิคคือ 1 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR และ 2 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค XRD ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

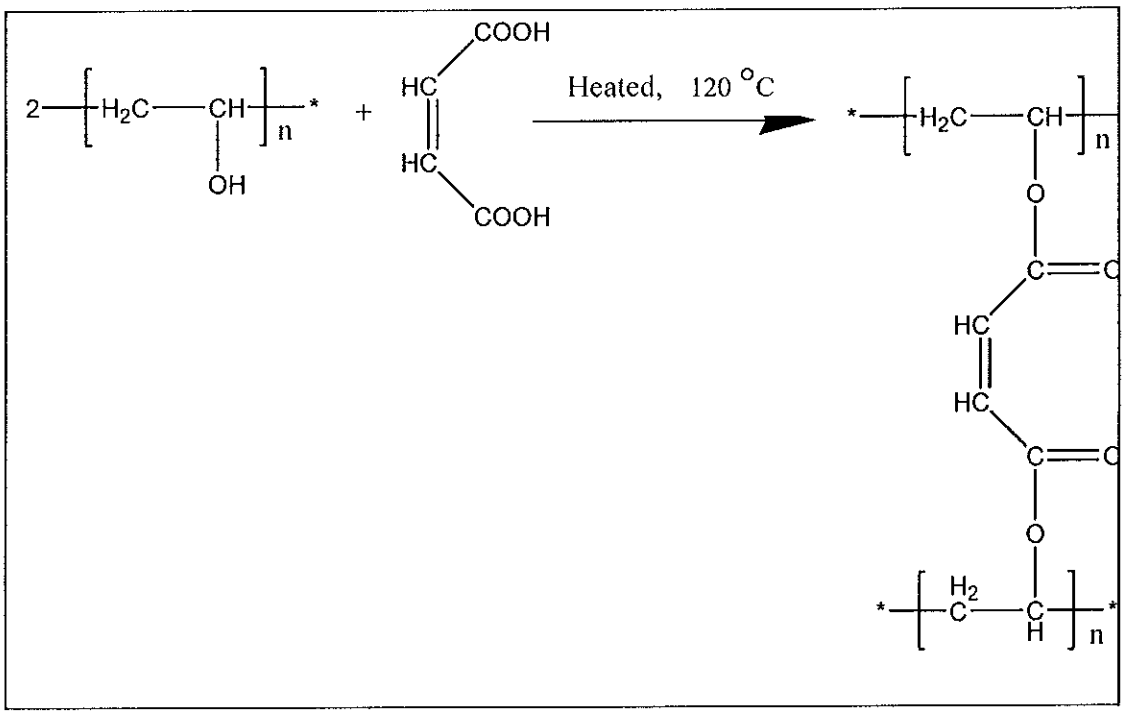
4.1.2.1 โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR

จากการศึกษาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิคเพื่อยืนยันปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.10 Gohil และคณะ (2006) ทำการศึกษา PVA ที่เชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิค ซึ่งมีผลการทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 สเปคตราอิฟราเรดของแผ่นฟิล์ม PVA โดยที่ I คือ PVA บริสุทธิ์ II คือ PVA ที่ให้ความร้อน III คือ PVA ที่เชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิค (Gohil *et al.*, 2006)

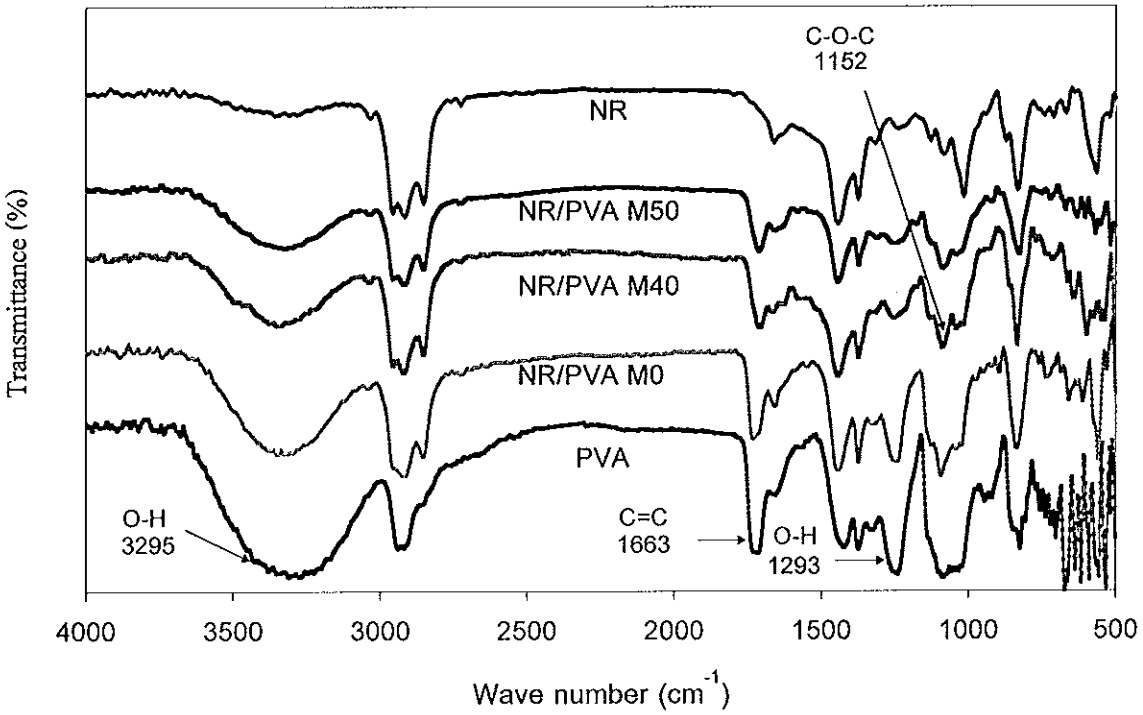
จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของ PVA บริสุทธิ์ที่ไม่มีการใส่สารเชื่อมขวางดังรูปที่ 4.9 I พบลักษณะที่สำคัญของ PVA คือแถบการดูดกลืนที่ 3,200 - 3,500 cm^{-1} เป็น O-H stretching เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงภายในสายโซ่โมเลกุลและระหว่างโมเลกุล (T. Razzak *et al.*, 1993) การสั่น C-H stretching ที่ 2,934 - 2,904 cm^{-1} (Mishra., 1982) พีคที่ตำแหน่ง 1,707 และ 1,096 cm^{-1} ของหมู่ ไวนิล อะซิเตตของ PVA ที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำ พีคที่ตำแหน่ง 1,378 cm^{-1} เป็นการสั่นของ $-CH_2-$ wagging และ 1,328 cm^{-1} เป็นการสั่นของ –C-H- and –O-H- bending (Mishra., 1982) และจากการเชื่อมขวาง PVA ด้วยกรดมาลีอิคดังรูปที่ 4.11 พบว่า PVA ที่มีการเชื่อมขวางด้วยมาลีอิคที่เกิดขึ้นนั้นจะแสดงพีคที่สำคัญเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 1,674 cm^{-1} เป็นการยืนยันการเกิดขึ้นของหมู่เอสเทอร์ตามปฏิกิริยา ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค (Gohil *et al.*, 2006)

จากการผลการทดลองเชื่อมขวาง PVA ของยางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA โดยใช้กรดมาลีอิค ปริมาณ 0 40 และ 50% เปรียบเทียบ NR และ PVA บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.12 พบว่ามีการเกิดขึ้นของหมู่เอสเทอร์ที่ตำแหน่ง 1663 cm^{-1} (C=C stretching of maleic acid ester) และ 1152 cm^{-1} (C-O-C stretching of maleic acid ester) (Majumdar and Adhikari, 2006) ซึ่งเป็นการยืนยันการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นของกรดมาลีอิคกับ PVA ในพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

แถบการดูดกลืนที่ 3,200 - 3,500 cm^{-1} (O-H stretching of PVA) และแถบการดูดกลืนที่ 1293 cm^{-1} (O-H in-plane bending of PVA) หลังการใช้กรดมาลีอิคเชื่อมขวางในพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ปริมาณ 40 และ 50% พบว่าแถบการดูดกลืนบริเวณนี้มีค่าลดลง แสดงให้ให้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้เกิดการเชื่อมขวางกับกรดมาลีอิคจริง



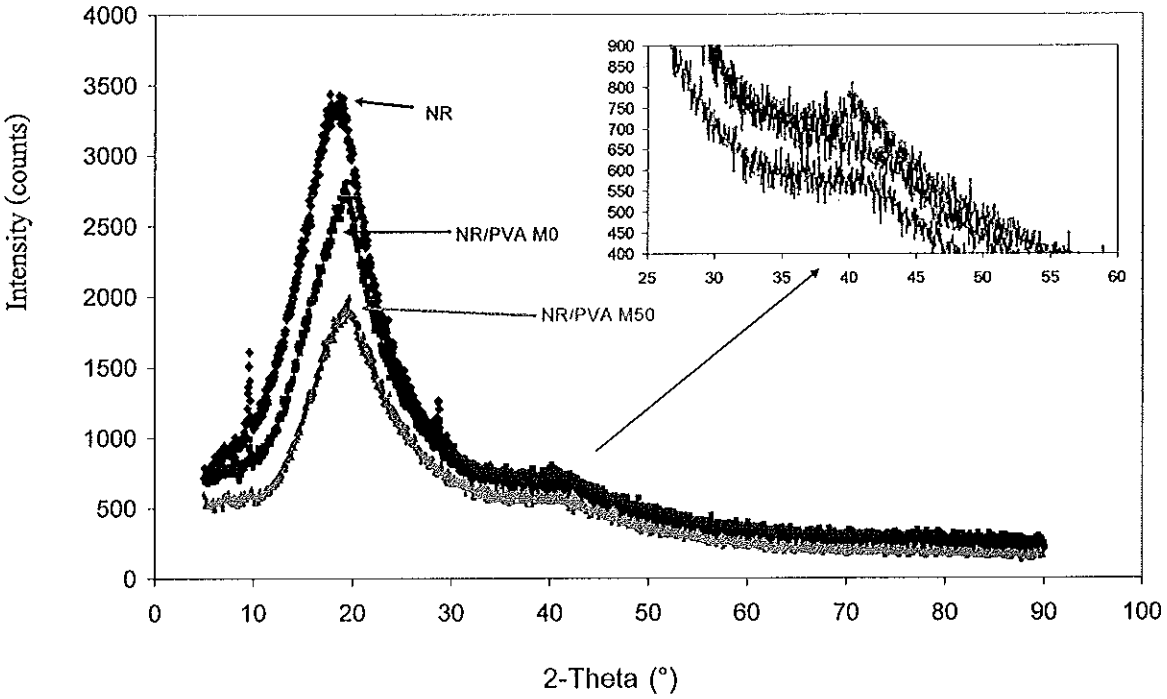
รูปที่ 4.12 สเปคตราอินฟราเรดของยางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA โดยใช้กรดมาลีอิค ปริมาณ 0 40 และ 50% เปรียบเทียบ NR และ PVA บริสุทธิ์

ตารางที่ 4.1 สเปคตรัมอินฟราเรดของ PVA และ PVA-M (Majumdar and Adhikari, 2006)

Wave number (cm^{-1})		Peak assignments
PVA	PVA-M	
1293	-	O-H in-plane bending of PVA
1069	1064	C-O stretching and O-H in-plane bending vibrations coupled
997	998	C-O stretching and O-H in-plane bending vibrations coupled
3290	3295	O-H stretching of PVA
-	1152	C-O-C stretching of maleic acid ester
-	1663	C=C stretching of maleic acid ester
2967	2968	CH_2-symmetric stretching RCH2R'
2864	2864	C-H stretching (isolated) >C(OH)-H

4.1.2.2 โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค XRD

เป็นอีกเทคนิคเพื่อเป็นการยืนยันว่ามีปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค ดังรูปที่ 4.11 จากรูปที่ 4.13 พบว่าในยาง NR จะปรากฏมุม 2-Theta ที่ 40 ° (2θ) ไม่เด่นชัด แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่ใส่กรดมาลิคเชื่อมขวางจะมีพีคที่ตำแหน่งนี้ปรากฏอย่างชัดเจนซึ่งเป็นพีคซึ่งแสดงถึงชั้นผลึกของ PVA (Majumdar and Adhikari, 2006) และเมื่อใส่สารเชื่อมขวางในปริมาณ 50% พบว่าพีคที่ตำแหน่งนี้มีค่าลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีผลึกของ PVA ที่ลดลงเนื่องจากการเชื่อมขวางของ PVA กับกรดมาลีอิค



รูปที่ 4.13 ผลของ XRD pattern ที่ มุม 2-Theta ของ NR/PVA M0 และ M50 และยาง NR

4.1.3 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย

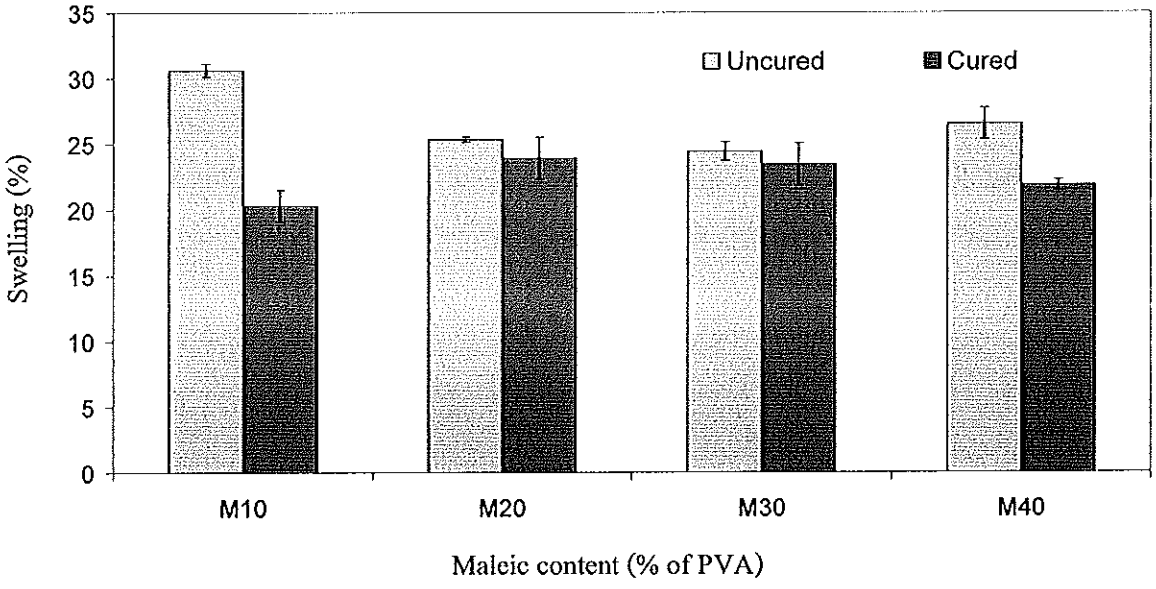
การศึกษาสมบัติทางด้านความทนทานต่อตัวทำละลาย เพื่อเป็นการตรวจสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการดัดแปร โดยทำการศึกษาในตัวทำละลาย คือ น้ำ โทลูอีน อะซิโตน เตตระไฮโดรฟูราน คลอโรฟอร์ม และไซโคลเฮกเซน ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1.3.1 การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำ

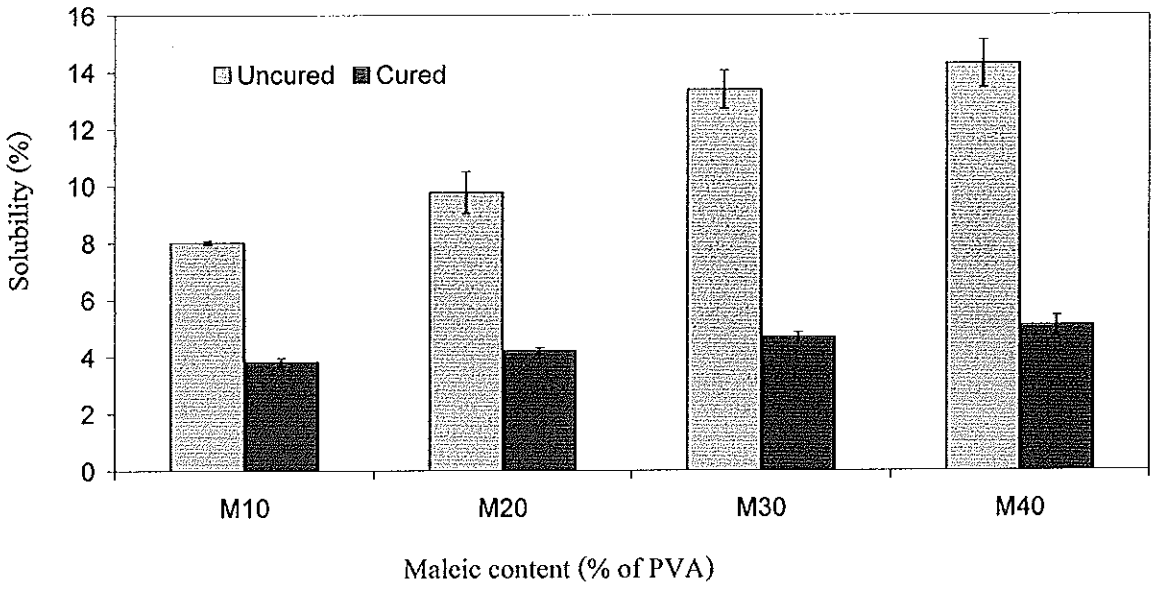
ทำการศึกษาการบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำโดยการแปรปริมาณกรดมาลีอิคตั้งแต่ 0-40 % โดยน้ำหนักของ PVA เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการเชื่อมโยง ซึ่งมีผลการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.14 และ 4.15

การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 % โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ดังรูปที่ 4.14 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ภายหลังการเชื่อมขวางมีการบวมตัวในน้ำที่ลดลงเล็กน้อย โดยที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีการบวมตัวในน้ำ 26.53% แต่หลังจากการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีการบวมตัวในน้ำเท่ากับ 21.87% ซึ่งการบวมตัวในน้ำที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมขวางเนื่องจากส่วนที่มีการบวมตัวเป็นส่วนของ PVA เมื่อมีการการเชื่อมโยงของ PVA กับกรดมาลีอิคหลังจากการเชื่อมขวางดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.11 ทำให้น้ำจึงแทรกซึมเข้าไปได้ยากมากขึ้น

การละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40% ดังรูปที่ 4.15 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมขวางมีค่าความสามารถในการละลายน้ำลดลง โดยที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความสามารถในการละลายน้ำ 14.29% หลังจากการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับ 5.1% ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมขวางเนื่องจากการเชื่อมขวางของ PVA กับกรดมาลีอิคหลังจากการเชื่อมขวาง ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.11 โดยผลการทดลองสอดคล้องกับการทดสอบการบวมตัวในน้ำ



รูปที่ 4.14 การบวมตัวในน้ำของ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40% ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง

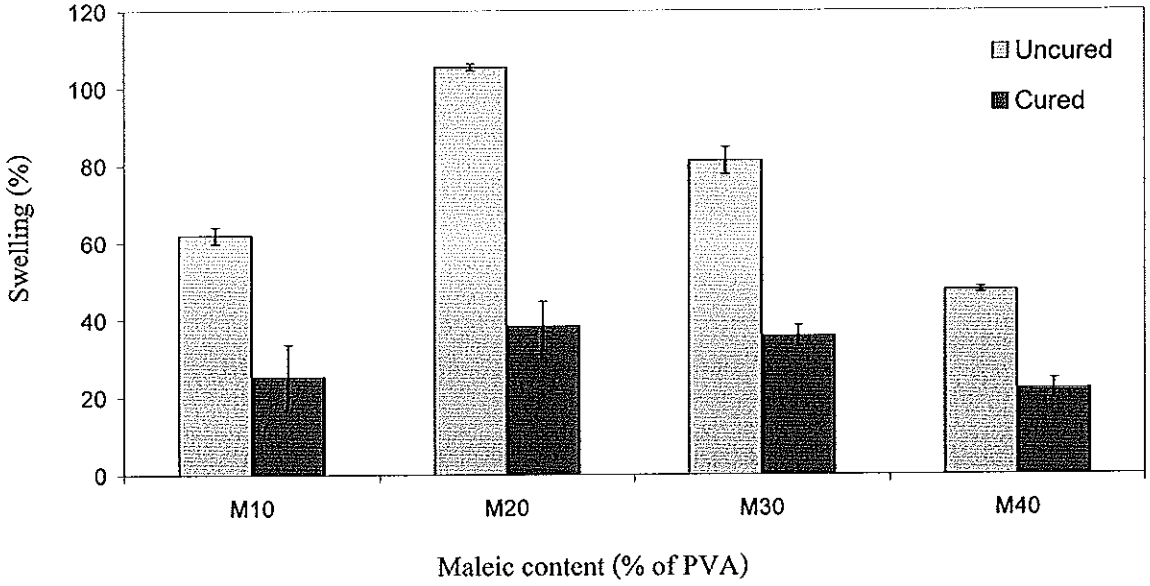


รูปที่ 4.15 ความสามารถในการละลายน้ำของ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40% ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง

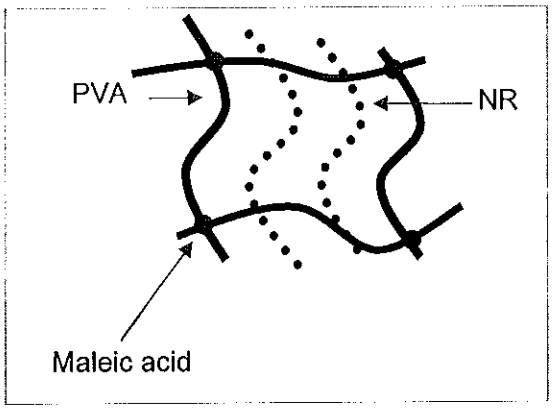
4.1.3.2 การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีน

ทำการศึกษาการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอรผสม NR/PVA โดยการแปรปริมาณกรดมาลีอิคตั้งแต่ 0-40% ของ PVA เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ซึ่งมีผลการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.16 - 4.18

การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40% เปรียบเทียบก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ดังรูปที่ 4.16 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังจากวัลคาไนซ์มีการบวมตัวในโทลูอีนที่ลดลง โดยที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีการบวมตัวในโทลูอีน 47.73% หลังจากการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีการบวมตัวในโทลูอีนเท่ากับ 22.09% ซึ่งการบวมตัวในโทลูอีนที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA การเชื่อมโยง เนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ PVA โดยกรดมาลีอิค ดังรูปที่ 4.11 โดยการเชื่อมขวางนี้จะเกิดการสอดไขว้กับสายโซ่ของยางธรรมชาติทำให้เกิดโครงสร้างที่เรียกว่า โครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ (Interpenetrating polymer network, IPN) ดังรูปที่ 4.17



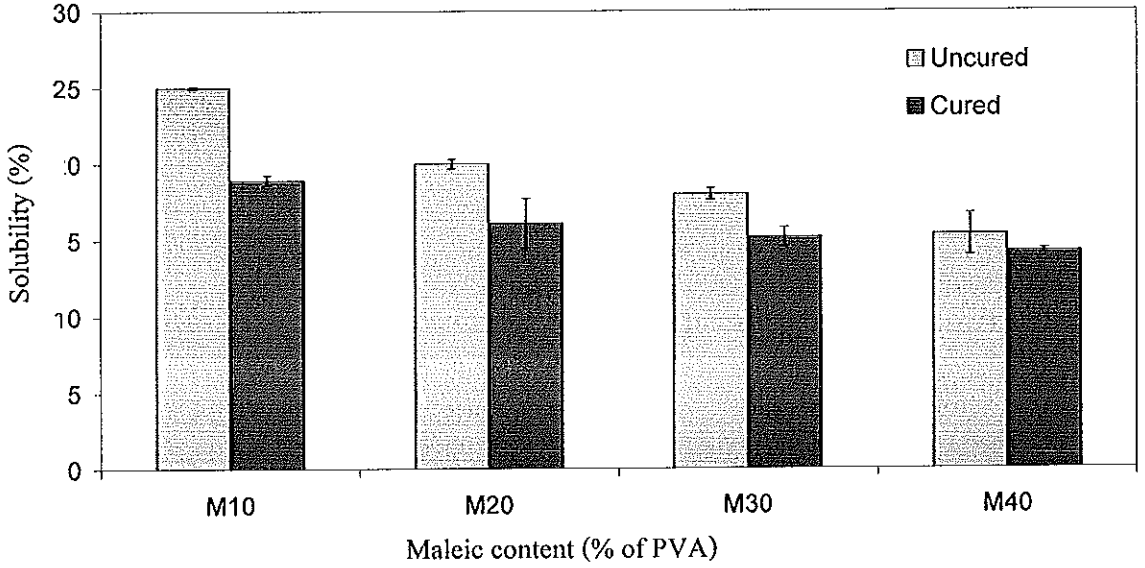
รูปที่ 4.16 การบวมตัวในโทลูอีนของ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40% ก่อนและเชื่อมขวาง



รูปที่ 4.17 ลักษณะการเกิดโครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40% ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ดังรูปที่ 4.18 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังจากการเชื่อมขวางมีความสามารถในการการละลายโทลูอีนที่ลดลง โดยที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ความสามารถในการการละลายโทลูอีน 15.37% หลังจากการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความสามารถในการการละลายโทลูอีนเท่ากับ 14.24% ซึ่งความสามารถในการการละลายโทลูอีนที่ลดลงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมขวาง เนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ PVA โดยกรดมาลีอิค ดังรูปที่ 4.11 โดยการเชื่อมขวางนี้เกิด

การสอดไขว้กับสายโซ่ของยางธรรมชาติทำให้เกิดโครงสร้างที่เรียกว่า โครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ (Interpenetrating polymer network, IPN) ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.18 ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40% ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง

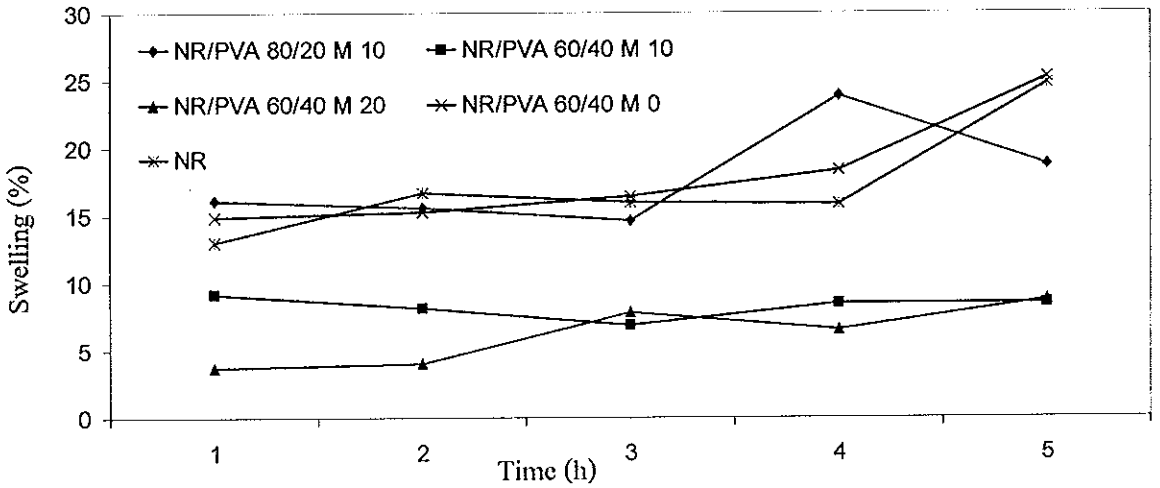
4.1.3.3 การบวมตัวในตัวทำละลายอื่นๆ

การทดสอบการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ในตัวทำละลายอื่นๆได้แก่การทดสอบการบวมตัวในอะซิโตน ดังรูปที่ 4.19 และการเปรียบเทียบผลของตัวทำละลายต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 4.20

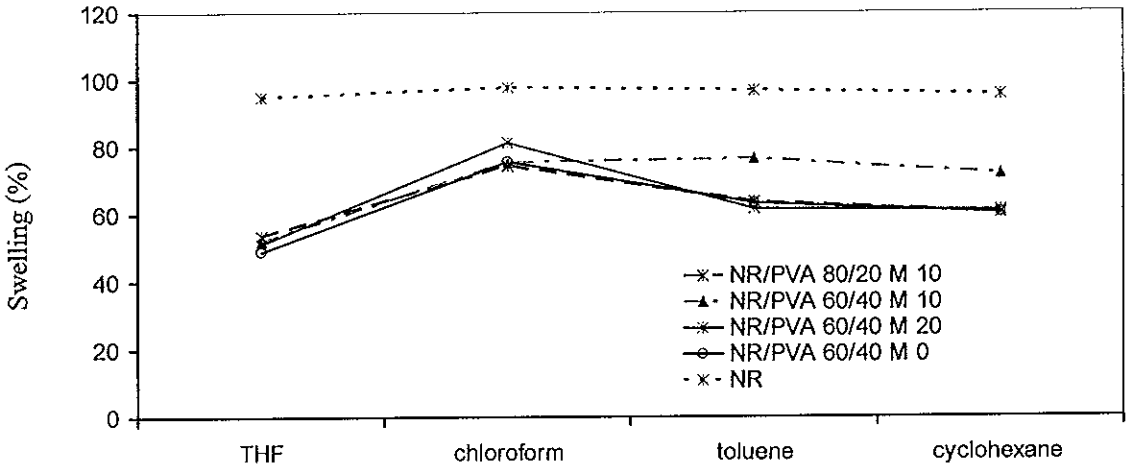
การทดสอบการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมในตัวทำละลายอะซิโตนที่ระยะเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อระยะเวลาการแช่ในอะซิโตนเพิ่มขึ้นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีแนวโน้มการบวมตัวเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับยาง NR ซึ่งมีการบวมตัวในอะซิโตนมาก แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ใช้กรดมาลีอิคเชื่อมขวางในปริมาณ 10 และ 20% พบว่ามีการบวมตัวในอะซิโตนที่ต่ำลง แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมมีความทนทานในอะซิโตนที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิค

การบวมตัวของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ในตัวทำละลายต่างๆ คือ เตตระไฮโดรฟูราน คลอโรฟอร์ม โทลูอีน และไซโคลเฮกเซน เป็นเวลา 5 วัน ดังรูปที่ 4.20 พบว่าการบวมตัวในตัวทำละลายต่างๆจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่บวมตัวได้น้อยที่สุดคือใน THF และยังพบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความทนทานต่อตัวทำละลายต่าง ๆได้ดี โดยปกติยาง NR มีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายต่างดังตารางที่ 4.2 ได้ดีอันเนื่องมาจากยาง NR มีค่าความสามารถในการละลายเท่ากับ 16.6 J/ml (S. C. NG and K. K. CHEE, 1997) ซึ่งใกล้เคียงกับตัวทำละลาย

ต่างๆเหล่านี้ แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA โดยใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางแล้วทำให้สามารถทนทานต่อตัวทำละลายต่างๆ เหล่านี้ได้มากขึ้น



รูปที่ 4.19 การบวมของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ในอะซิโตน



รูปที่ 4.20 การบวมตัวของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ในตัวทำละลายต่างๆ คือ เตตระไฮโดรฟูราน คลอโรฟอร์ม โทลูอีน และไซโคลเฮกเซน เป็นเวลา 5 วัน

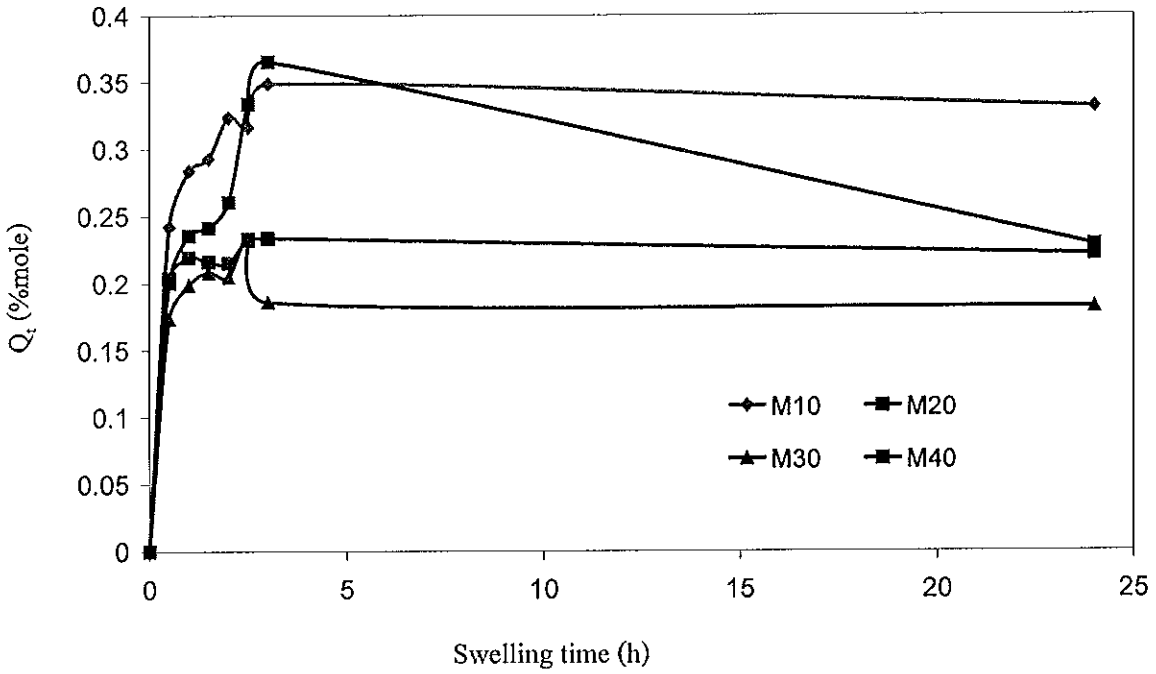
ตารางที่ 4.2 ค่าความสามารถในการละลาย (solubility parameter) ของตัวทำละลายต่างๆ (S. C. NG and K. K. CHEE, 1997)

Solvent	Solubility parameter (J/ml)
THF	18.4
Chloroform	18.9
Toluene	18.1
Cyclohexane	20.2

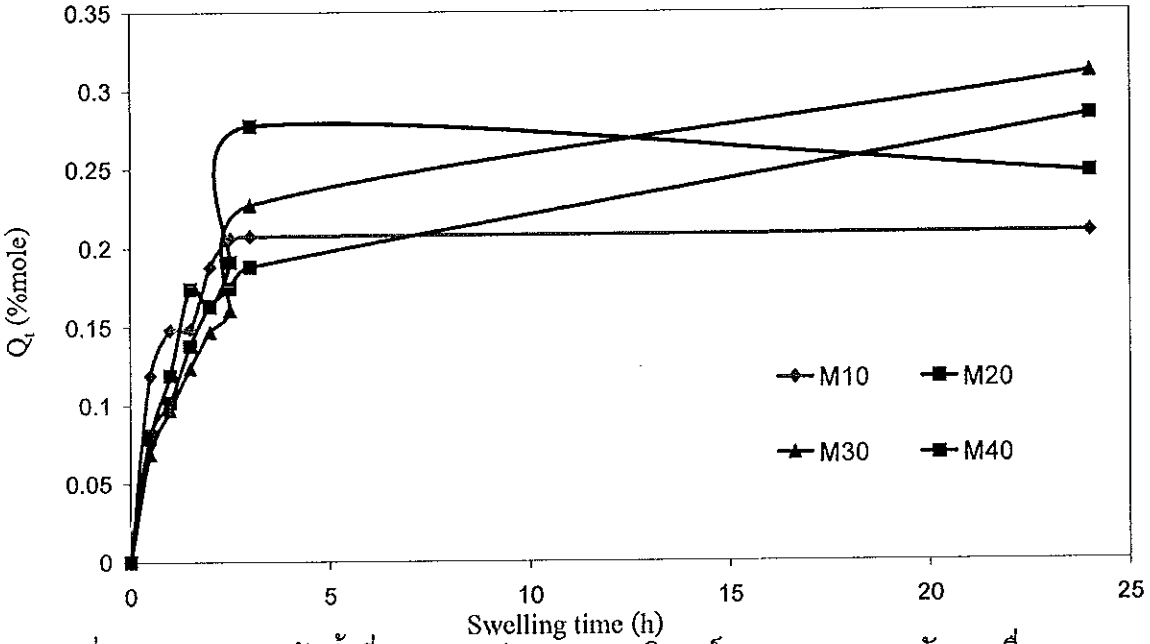
4.1.3.4 การทดสอบการดูดซับ (sorbtion) และการคายออก (desorbtion) ในน้ำและโทลูอีนที่อุณหภูมิห้อง

การทดสอบการดูดซับและการคายออกในน้ำและโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 % ก่อนและหลังการเชื่อมโยง ดังหัวข้อ 3.4.8.1 โดยมีผลการทดลองการดูดซับและการคายออกดังนี้

ค่าการดูดซับน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนและเชื่อมขวางดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่ได้เชื่อมขวางมีค่าการดูดซับน้ำที่เร็วมากในช่วงแรก แต่หลังจากการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ทำให้การดูดซับน้ำช้าลงเล็กน้อยในช่วงแรกแต่ค่อยๆสูงขึ้นเช่นเดียวกันในเวลาต่อมา และปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมขวางต่ำกว่าก่อนการเชื่อมขวาง

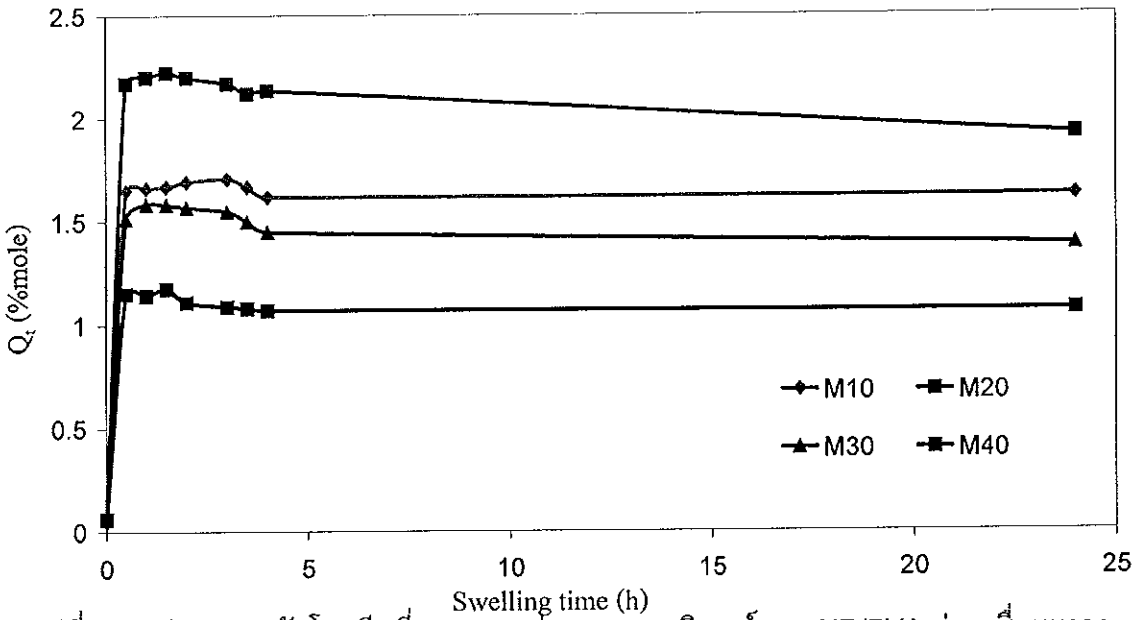


รูปที่ 4.21 ค่าการดูดซับน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนการเชื่อมขวาง

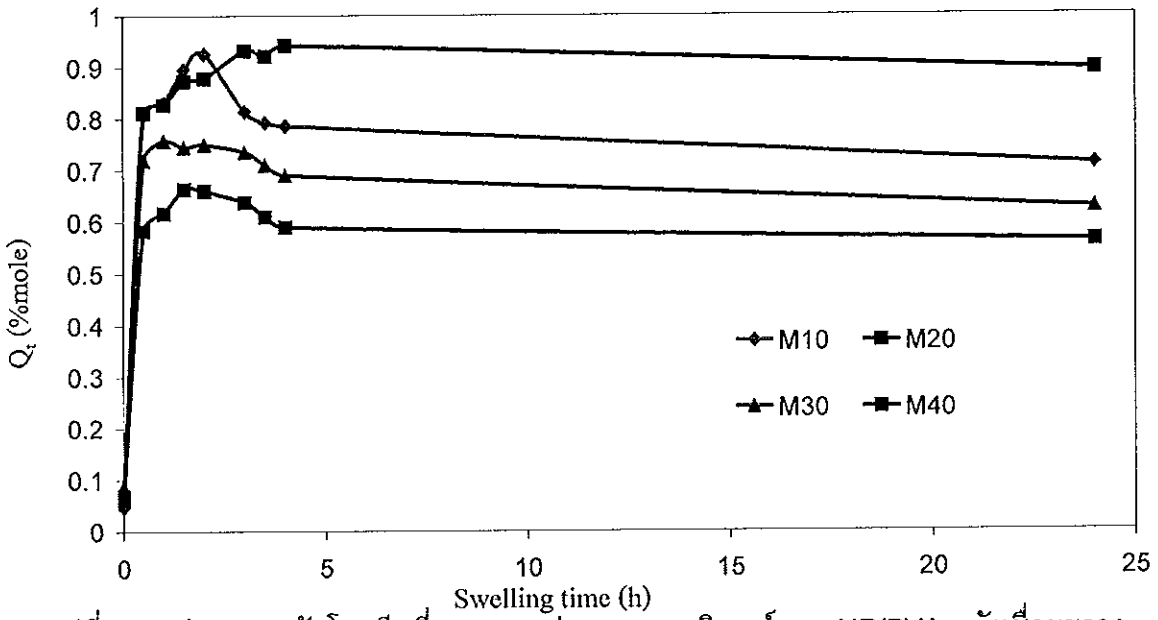


รูปที่ 4.22 ค่าการดูดซับน้ำที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมขวาง

ค่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนและหลังการเชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมโยงมีค่าการดูดซับน้ำที่ลดลง และปริมาณการใช้สารเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่าการดูดซับในโทลูอีนที่ลดลงเช่นเดียวกัน

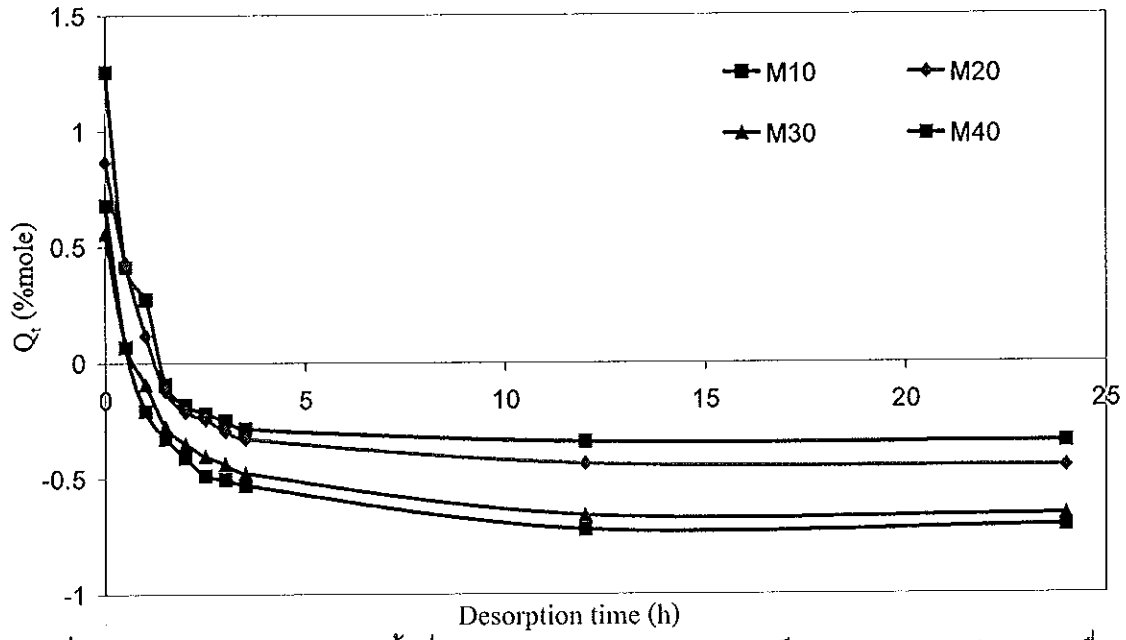


รูปที่ 4.23 ค่าการดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนเชื่อมขวาง

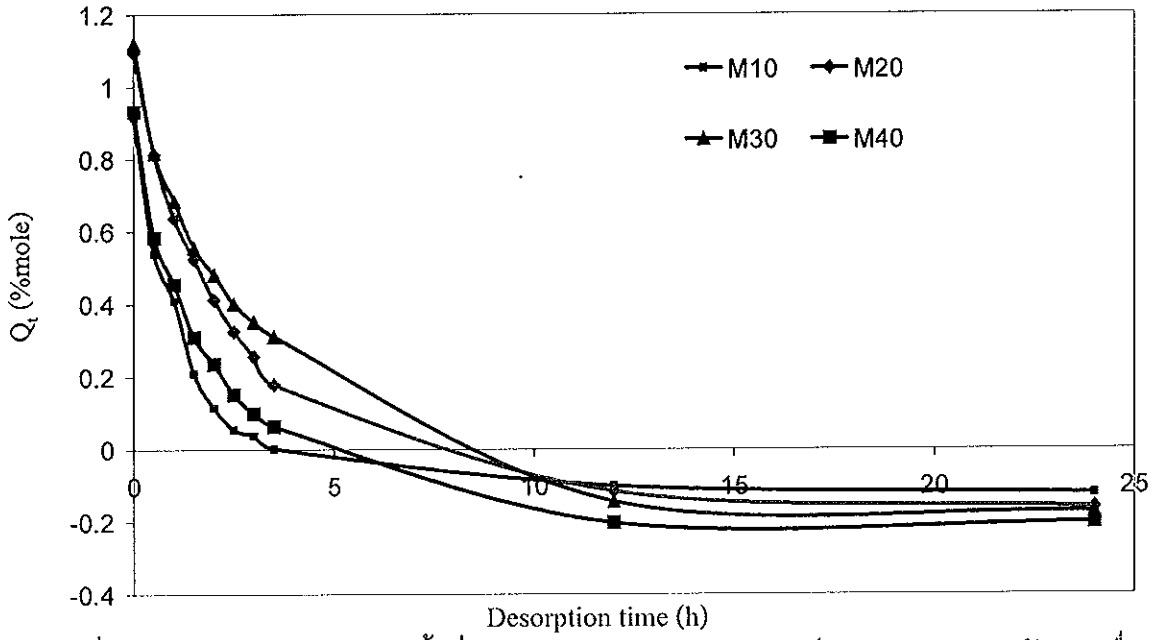


รูปที่ 4.24 ค่าการดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังเชื่อมขวาง

ค่าการคายออกของน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนการเชื่อมขวางมีค่าคายออกของน้ำที่รวดเร็วในช่วงแรก แต่หลังจากการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่าการคายออกของน้ำที่ช้าลงในช่วงแรก และค่าการคายออกของน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนและหลังการเชื่อมโยงมีค่าเป็นลบเมื่อระยะเวลาในการคายออกเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีส่วนที่ละลายน้ำ และค่าการคายออกของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมโยงมีค่าติดลบน้อยลงแสดงให้เห็นว่ามีการเชื่อมขวางของ PVA กับกรดมาลีอิคเกิดขึ้นจริงแต่ก็ยังมีบางส่วนของ PVA ที่ไม่ถูกเชื่อมขวางละลายออก

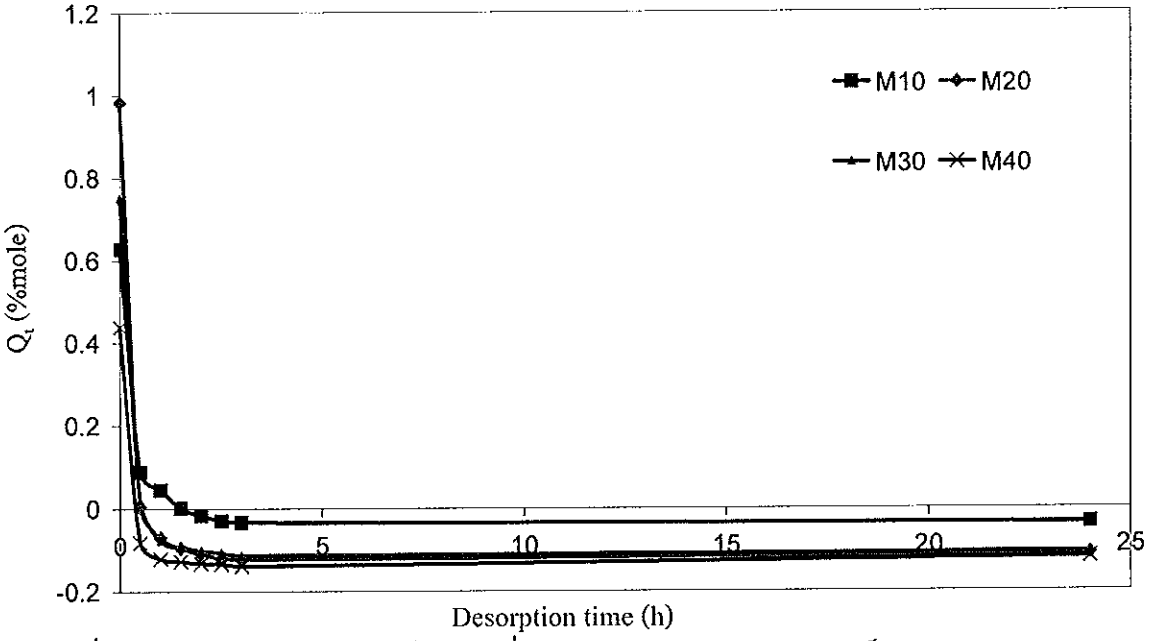


รูปที่ 4.25 ค่าการคายออกของน้ำที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนการเชื่อมขวาง

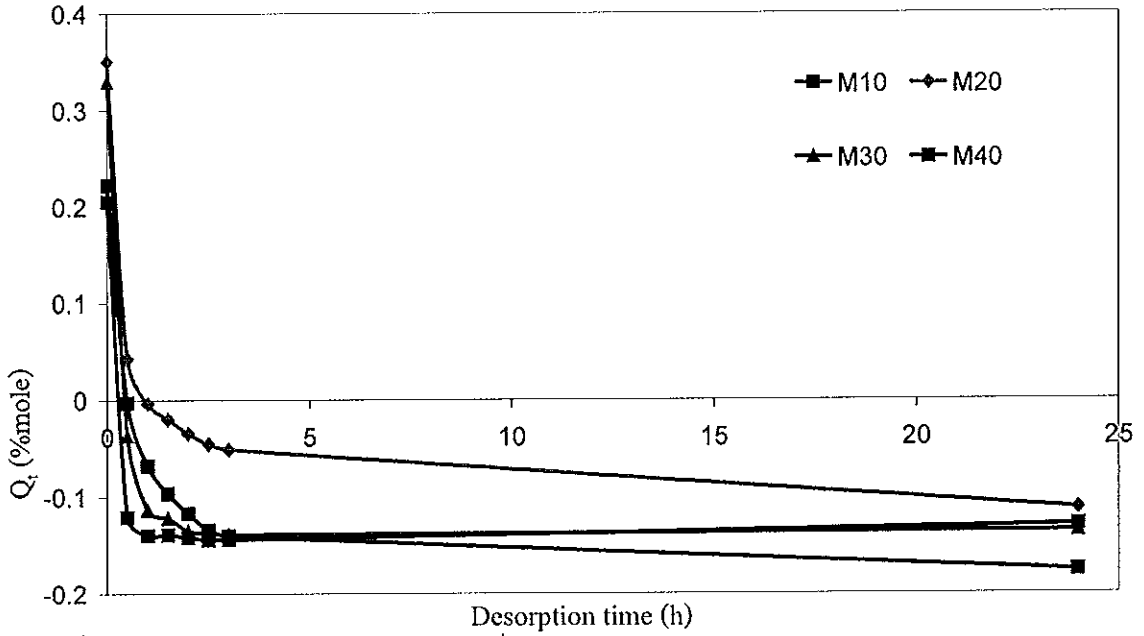


รูปที่ 4.26 ค่าการคายออกของน้ำที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมขวาง

ค่าการคายออกของโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่าค่าการคายออกของโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนและหลังการเชื่อมขวางเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกซึ่งเร็วกว่าค่าการคายออกของน้ำ



รูปที่ 4.27 ค่าการคายออกของโทลูอีนที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนการเชื่อมขวาง



รูปที่ 4.28 ค่าการคายออกของโทลูอีนที่ระยะเวลาต่างๆของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมขวาง

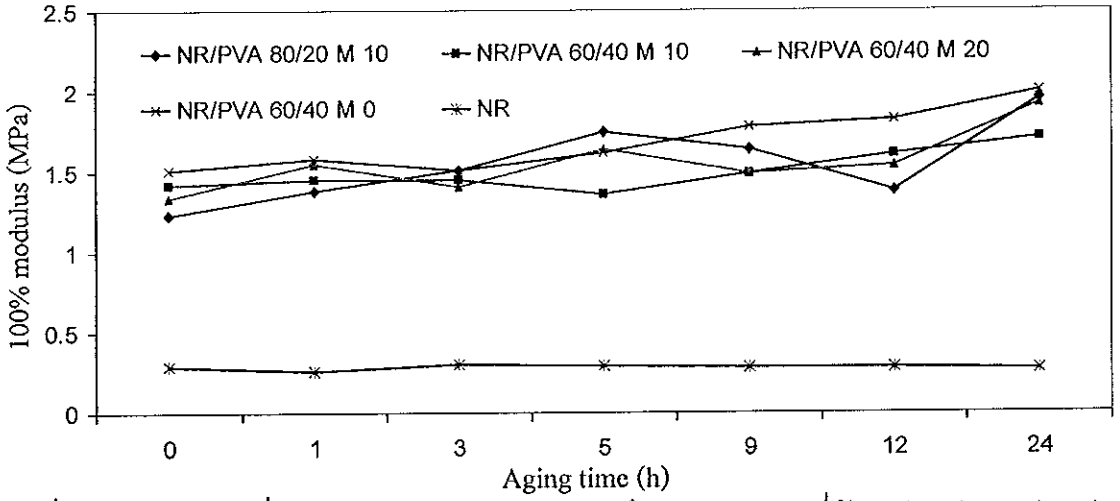
4.1.4 ศึกษาการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน เพราะโดยทั่วไปเราไม่สามารถทำนายสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ได้โดยอาศัยความรู้จากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีได้อย่างแม่นยำ เช่น การคำนวณความแข็งแรงโดยอาศัยความรู้พื้นฐานจากความแข็งแรงของพันธะ และแรงระหว่างโมเลกุล เพราะฉะนั้นการทดสอบสมบัติเชิงกลจึงเป็นวิธีการที่ดีที่จะศึกษาถึงสมบัติและความเป็นไปได้ในการนำเอาพอลิเมอร์ผสมไปใช้งาน

4.1.4.1 100 % มอดุลัส

ทำการทดสอบค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ด้วยเครื่องเทนโซมิเตอร์ ที่อัตราดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที วิธีการทดสอบดังในอธิบายในหัวข้อที่ 3.5.3.1 ได้ผลแสดงดังในรูปที่ 4.29

ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดังรูปที่ 4.29 ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100 % ของยาง NR จะมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มาก เนื่องจากเป็นยาง NR ที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมโยง ส่วนพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเร่ง

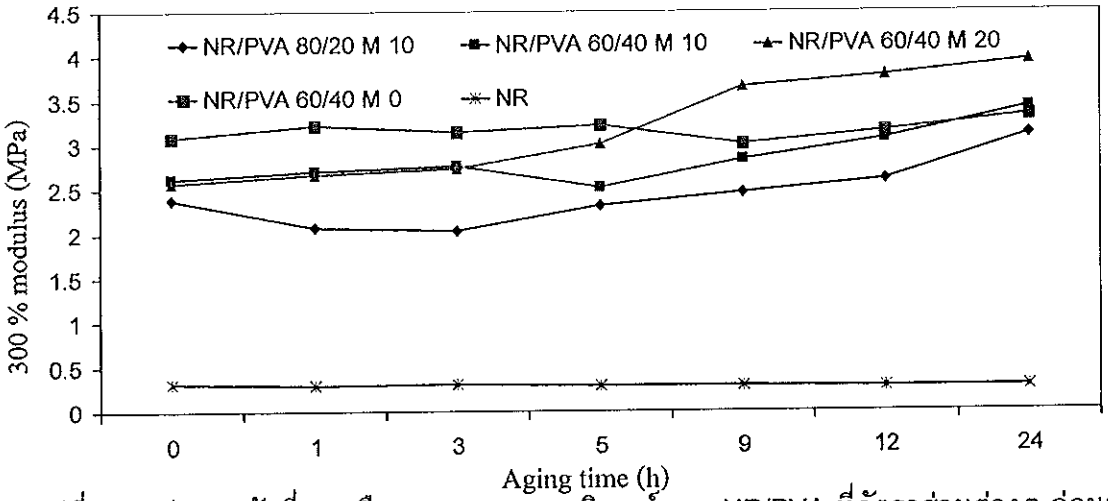


รูปที่ 4.29 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง

4.1.4.2 300 % มอดุลัส

ทำการทดสอบค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300 % ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ด้วยเครื่องเทนโซมิเตอร์ที่อัตราดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที วิธีการทดสอบดังในข้อที่ 3.5.3.1 ได้ผลแสดงดังในรูปที่ 4.30

ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300 % ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดังรูปที่ 4.30 ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300 % จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า 100 % มอดุลัส คือ ยาง NR จะมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่าง ๆพบว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มเมื่อระยะเวลาในการบ่มเร่งเพิ่มขึ้นในลักษณะที่คล้าย ๆกันสำหรับสูตรที่ใส่สารเชื่อมขวางคือ กรดมาลีอิค 20 จะมีค่า 300 % มอดุลัสที่สูงกว่าสูตรอื่น ๆที่ระยะเวลาในการบ่มเร่ง 24 ชั่วโมง เนื่องจากกรดมาลีอิคอาจเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ผสมช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

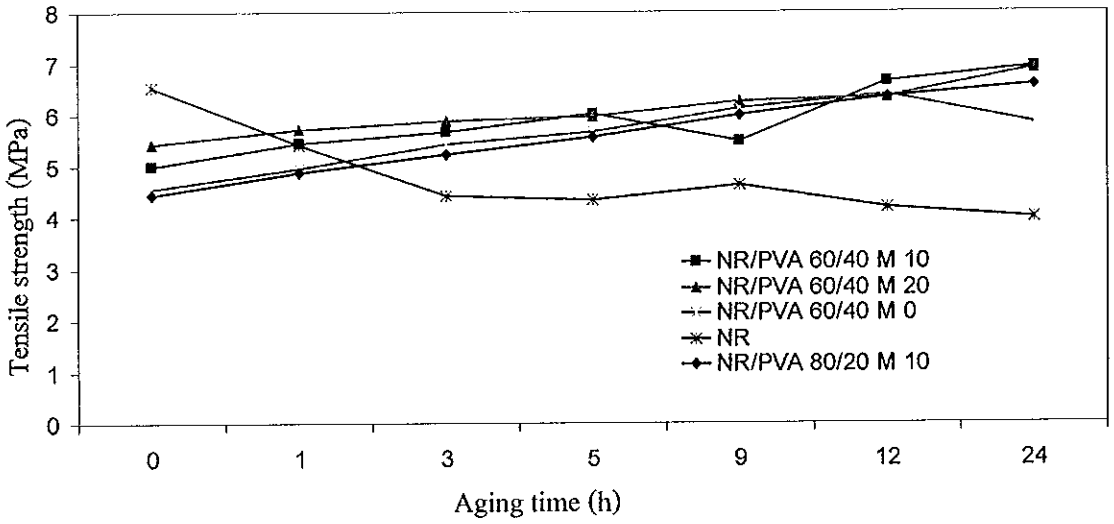


รูปที่ 4.30 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง

4.1.4.3 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

ทำการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึง ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ด้วยเครื่องเทนโซมิเตอร์ ที่อัตราดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที วิธีการทดสอบดังในข้อที่ 3.5.3.1ได้ผลแสดงดังในรูปที่ 4.31

ค่าความต้านทานต่อแรงดึงก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดังรูปที่ 4.31 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า 100 % และ 300% โมดูลัส คือยาง NR จะมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ยาง NR เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเร่งพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากพันธะคู่ที่มีอยู่มากในยาง NR เกิดการออกซิไดซ์ สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเร่ง อาจเกิดเนื่องจากการขยับเข้าใกล้กันมากขึ้นระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และยังอาจเกิดจากการที่ใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางจึงทำให้พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

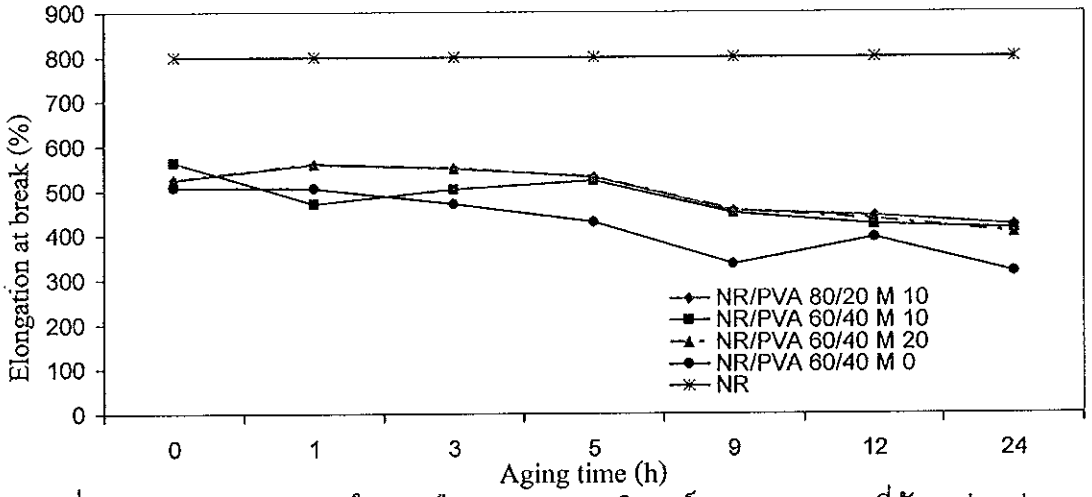


รูปที่ 4.31 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง

4.1.4.4 สมบัติด้านความสามารถในการยืด

ทำการทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการยืด ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ด้วยเครื่อง เทนโซมิเตอร์ ที่อัตราดึง 500 มิลิเมตรต่อนาที วิธีการทดสอบดังในข้อที่ 3.5.3.1 ได้ผลแสดงดังในรูปที่ 4.32

จากรูปที่ 4.32 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง พบว่ายาง NR จะมีค่าความสามารถในการยืดสูงที่สุด คือ มากกว่า 800 % สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA พบว่า ค่าความสามารถในการยืดลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR การใช้กรดมาลีอิคสามารถช่วยให้พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความสามารถในการยืดเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อยเหมือนกันเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนเดียวกันที่ไม่ใส่กรดมาลีอิค เมื่อระยะเวลาในการบ่มเร่งเพิ่มขึ้นค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีแนวโน้มที่ลดลงเหมือนๆกัน



รูปที่ 4.32 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง

4.1.5 ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

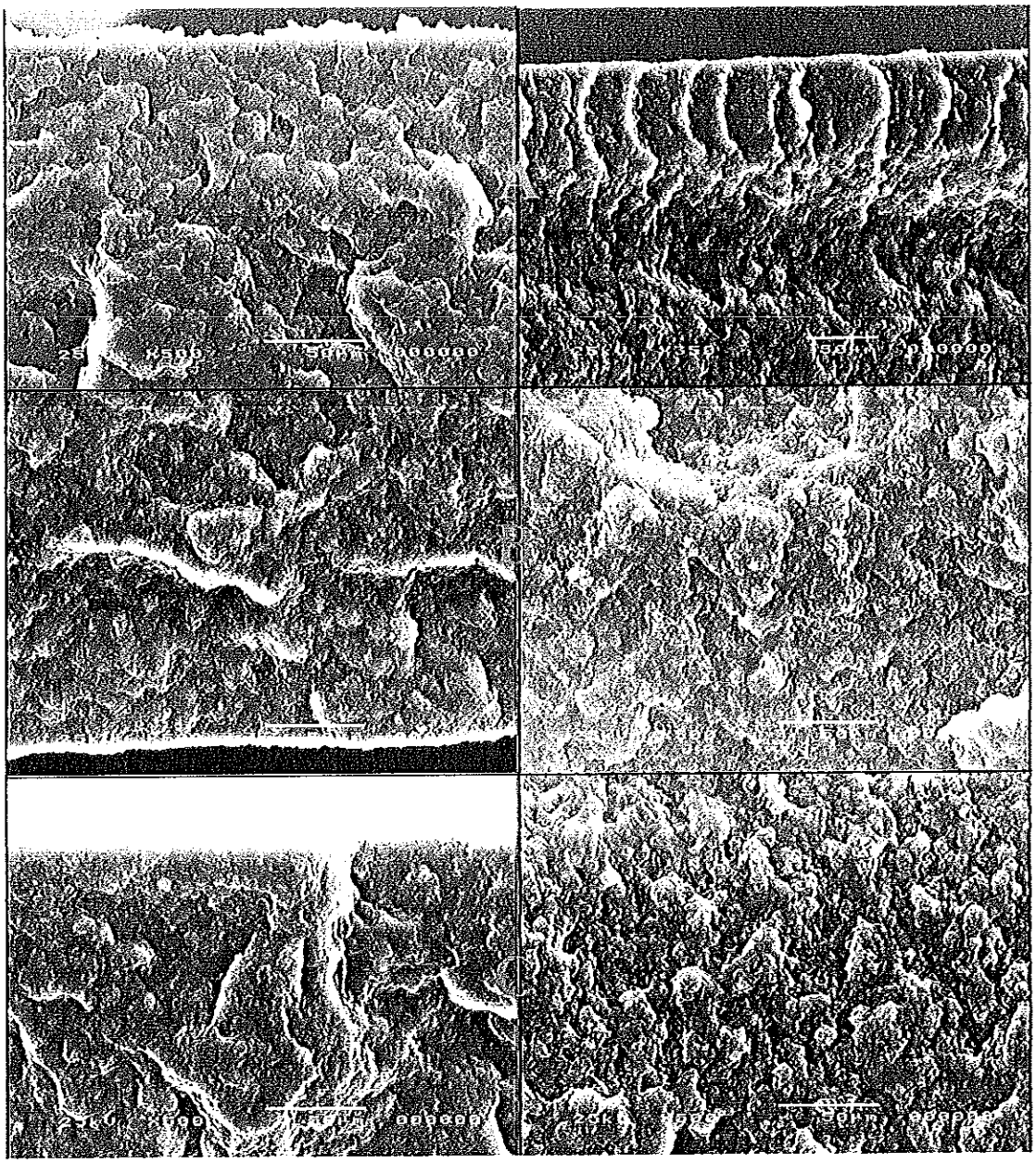
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เพื่อเป็นการตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด โดยในงานวิจัยครั้งนี้มีเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA อยู่ 2 วิธีคือ 1) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM 2) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย AFM โดยมีผลการทดลองจากเทคนิคต่างๆดังต่อไปนี้

4.1.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 โดยแปรปริมาณกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 10 20 และ 30% โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบโดยใช้เครื่อง JSM JEOL 2000 โดยการชิ้นตัวอย่างมาทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจน พื้นผิวที่ผ่านการทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจนแล้วมาทำการเคลือบด้วยทองก่อนที่จะนำมาทดสอบ

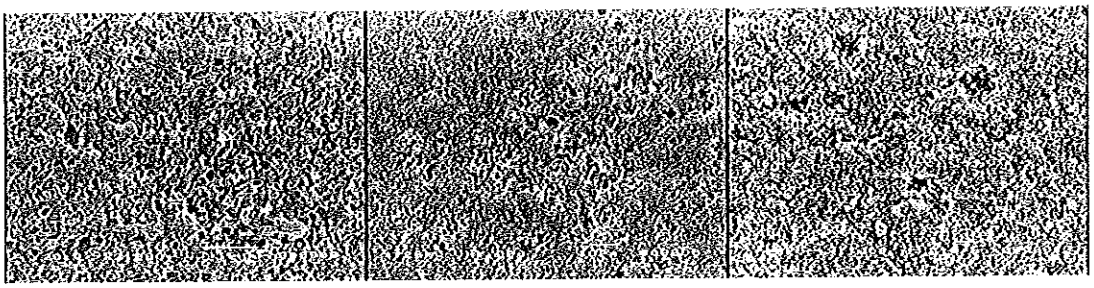
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนและหลังการเชื่อมขวางที่ 120 °C ที่กำลังขยาย 100 150 และ200 เท่า จากรูปที่ 4.33 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการเชื่อมขวางจะทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีลักษณะที่ขรุขระเพิ่มมากขึ้น และการใช้ปริมาณของมาลีอิคเพิ่มขึ้น จาก 10-30% ก็จะทำให้ความขรุขระเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งความขรุขระที่เพิ่มมากขึ้นนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเชื่อมขวางของ PVA โดยกรดมาลีอิค (Gohil *et al.*, 2006) และพบว่าPVA กระจายตัวอย่าง

สม่ำเสมอในเฟสของยาง NR ซึ่ง PVA ที่เกิดการเชื่อมขวางจะสังเกตได้จากลักษณะที่นูนขึ้นจากภาพที่ได้ สำหรับรูปที่ 4.34 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการละลายในโทลูอีน พบว่ามีบางส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ถูกละลายออกไปซึ่งเป็นส่วนของยาง NR ที่ละลายในโทลูอีนได้ดี และเห็นได้ว่าการผสมระหว่างยาง NR กับ PVA มีการกระจายตัวที่ดีสม่ำเสมอ



Uncured Cured

รูปที่ 4.33 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) M0 B) M10 C) M30 เชื่อมขวางที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.34 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) M0 B) M20 และ C) M40 ก่อนการเชื่อมขวาง หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน ที่กำลังขยาย 200 เท่า

4.1.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

หลักการพื้นฐานของ AFM คืออาศัยแรงดูดและแรงผลักที่เกิดขึ้นจากหัวเข็มกับพื้นผิวของชิ้นงาน โดยเข็มที่ติดอยู่บนคานกระเดื่อง และเคลื่อนที่กวาดไปบนชิ้นงาน หรือ ให้เข็มอยู่กับที่ และชิ้นงานเคลื่อนที่ก็ได้ ทำให้คานกระเดื่องบิดตัวขึ้นลงตามความสูงต่ำของพื้นผิวชิ้นงาน แสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากคานกระเดื่อง ก็จะเปลี่ยนทิศทางการสะท้อนตามการบิดตัวของคานกระเดื่อง นำข้อมูลของเลเซอร์ที่ได้ไปแปรผล ก็สามารถสร้างภาพพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างได้ (http://www.rmutphysics.com)

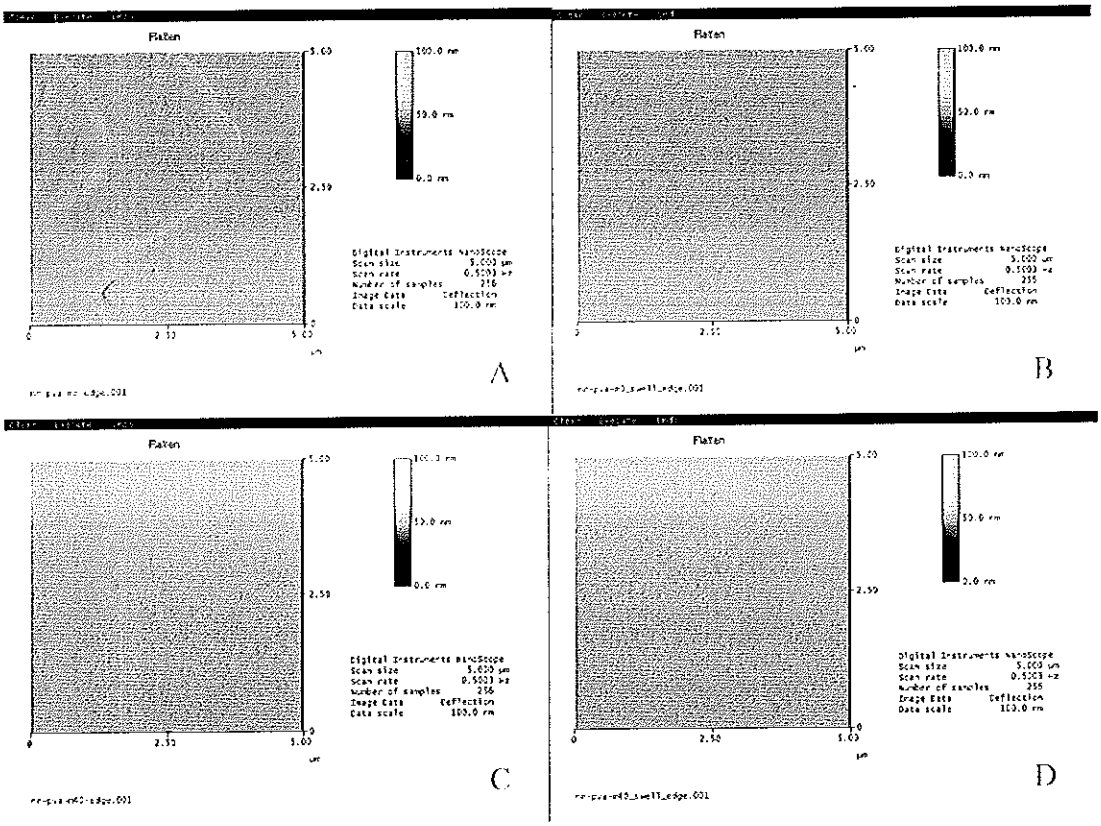
วิธีการทำงานของเครื่อง AFM สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

1.การสัมผัสแบบต่อเนื่อง เป็นการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลา ข้อเสียของวิธีนี้คือ จะทำให้เกิดแรงด้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น อันอาจทำให้คานของโพรบที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มิได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง

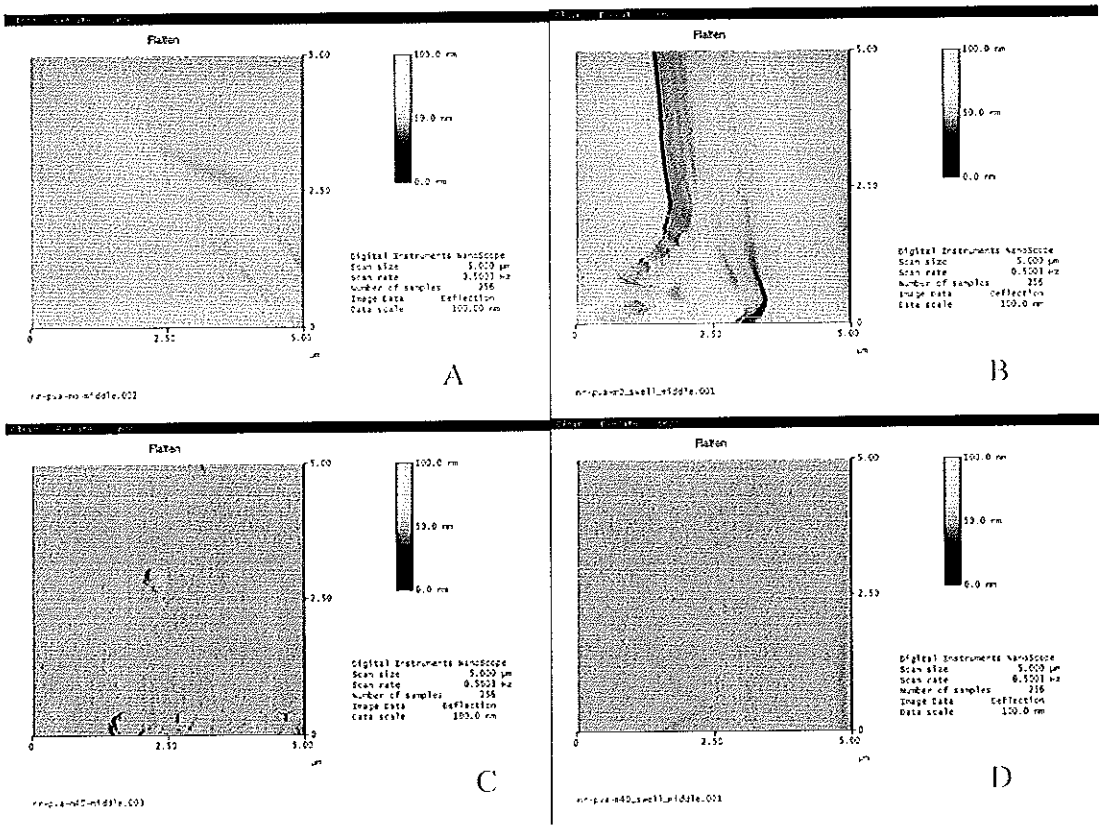
2.การสัมผัสแบบไม่ต่อเนื่อง เป็นการสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (คล้ายกับการใช้ปลายนิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะๆ นั่นเอง) ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงด้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น แต่เนื่องจากปลายแหลมสัมผัสพื้นผิวเป็นระยะสั้นๆ จึงทำให้เกิดการสั่นของคาน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นไม่คงที่หรือไม่แม่นยำได้

โดยในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ด้วยเทคนิค AFM ในครั้งนี้ได้ทำการทดลอง 2 โหมดคือ ทดสอบแบบ deflection และทดสอบแบบ height และทำการวัดตรงกลาง (middle) และขอบ (edge) ของชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

เปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากเครื่อง AFM ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ในการทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ ดังรูปที่ 4.35 (edge) และรูปที่ 4.36 (middle) พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีการวัดแรงที่เปลี่ยนแปลงของเข็มวัด AFM (deflection) ของตรงกลางและขอบตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบบวมตัวในน้ำที่เหมือนกันกล่าวคือการสะท้อนของแสงจากการทดสอบเป็นการบ่งบอกแรงในแต่ละตำแหน่งของพื้นผิวของตัวอย่างโดยแต่ละตำแหน่งมีค่าแรงใกล้เคียงกันไม่แตกต่างต่างกันมากแสดงให้เห็นว่าการผสมของพอลิเมอร์มีความเข้ากันได้ดี

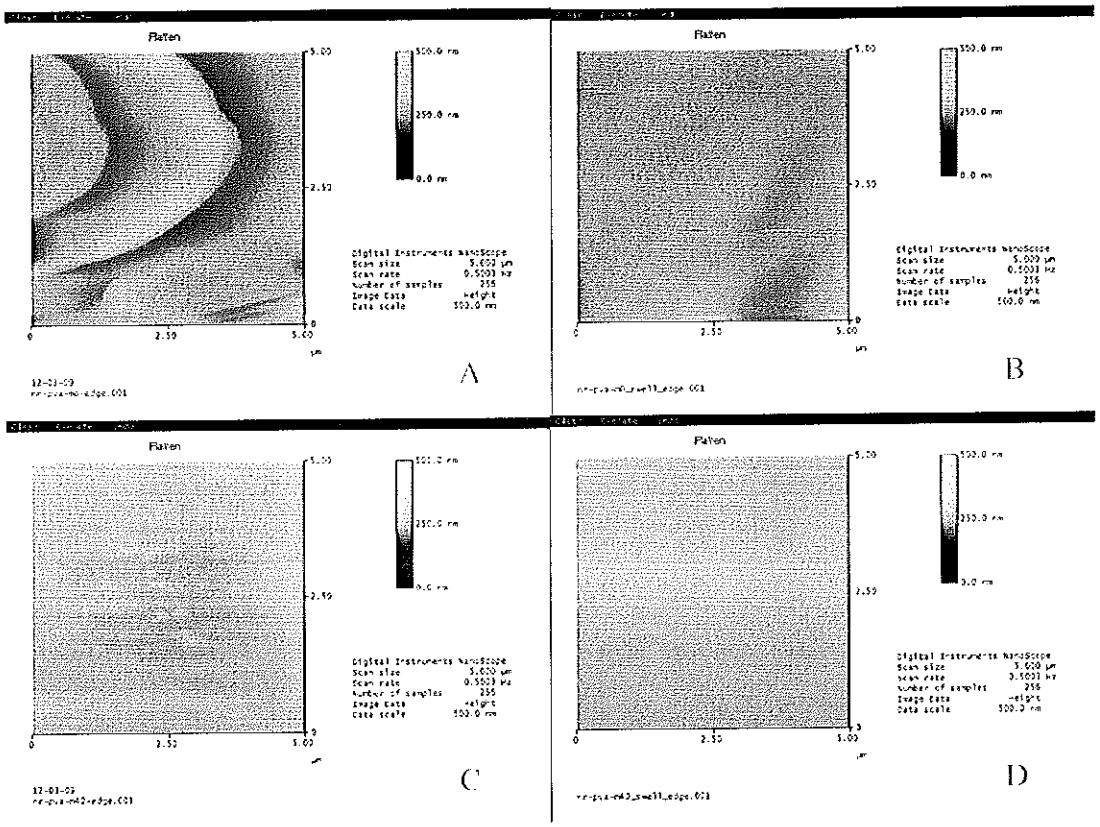


รูปที่ 4.35 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) NR/PVA M0 (edge, before swelling) B) NR/PVA M0 (edge, after swelling) C) NR/PVA M40 (edge, before swelling) D) NR/PVA M40 (edge, after swelling) จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ



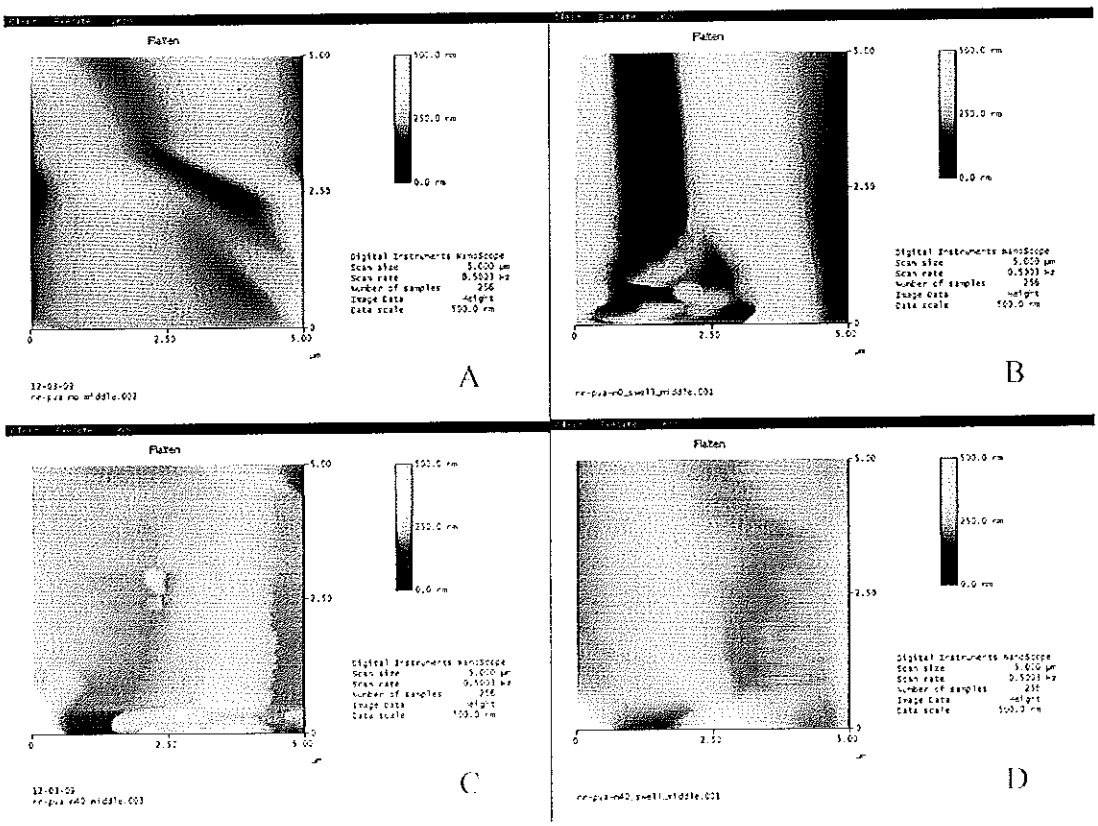
รูปที่ 4.36 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) NR/PVA M0 (middle, before swelling) B) NR/PVA M0 (middle, after swelling) C) NR/PVA M40 (middle, before swelling) D) NR/PVA M40 (middle, after swelling) จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

เปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากเครื่อง AFM ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40 ในการทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ ดังรูปที่ 4.37 และรูปที่ 4.38 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีระดับความสูงของแต่ละตำแหน่งบนชิ้นงาน (height) ขอบตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบบวมตัวในน้ำที่เหมือนกันกล่าวคือระดับความสูงของแต่ละตำแหน่งบนชิ้นงานมีระดับความสูงใกล้เคียงกันไม่แตกต่างต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าการผสมของพอลิเมอร์มีความเข้ากันได้ดี แต่เมื่อทดสอบตรงกลางของชิ้นตัวอย่างเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำพบว่าชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีกรดมาลีอิคหลังการละลายน้ำจะเห็นว่ามีความสูงที่แตกต่างกันมากแสดงถึงส่วนที่ละลายน้ำนั่นเอง แต่หลังจากใช้กรดมาลีอิคเชื่อมขวางในรูปที่ 4.38D จะเห็นว่าความสูงของพอลิเมอร์ผสมแต่ละตำแหน่งมีความแตกต่างกันน้อยลงแสดงถึงความทนทานต่อการละลายในน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA นั่นเอง



รูปที่ 4.37 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) NR/PVA M0 (edge, before swelling) B) NR/PVA M0 (edge, after swelling) C) NR/PVA M40 (edge, before swelling) D) NR/PVA M40 (edge, after swelling) จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

สำหรับตารางที่ 4.3 แสดงค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ โดยค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับตัวอย่างมากแสดงถึงพื้นผิวพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นขั้วมาก เห็นได้ว่าที่พื้นผิว (EDGE) พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางก่อนการทดสอบบวมตัวในน้ำมีค่ายึดติดเท่ากับ 11.54 แต่หลังจากทดสอบการบวมตัวในน้ำ พบว่าค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับตัวอย่างมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงถึงไม่มีความเป็นขั้วที่พื้นผิว แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่มีการใช้กรดมาลีอิคปริมาณ 40% หลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ พบว่าค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับตัวอย่างมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ในส่วนของการตรวจสอบแรงยึดติดระหว่างเข็มกับตำแหน่งตรงกลางตัวอย่าง พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางหลังการทดสอบการบวมตัวมีค่าแรงยึดติดเพิ่มขึ้น และพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่มีการใช้กรดมาลีอิคปริมาณ 40% หลังการทดสอบการบวมตัวมีค่าแรงยึดติดลดลง เนื่องจากน้ำจะเป็นตัวดึงส่วนที่ชอบน้ำออกมาบริเวณผิวตัวอย่างมากขึ้น ทำให้ภายในตัวอย่างมีส่วนที่ชอบน้ำลดลง



รูปที่ 4.38 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA A) NR/PVA M0 (middle, before swelling) B) NR/PVA M0 (middle, after swelling) C) NR/PVA M40 (middle, before swelling) D) NR/PVA M40 (middle, after swelling) จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

จากตารางที่ 4.3ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ โดยค่าแรงยึดติดระหว่างปลายเข็มกับผิวตัวอย่างมากแสดงถึงความเป็นขั้วของผิวตัวอย่างมีมาก ผลการทดลองพบว่า พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีกรดมาลีอิค หลังการทดสอบบวมตัวในน้ำทำให้ค่าแรงยึดติดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดสอบบวมตัว เนื่องมาจากส่วนที่ชอบน้ำคือส่วนของพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ที่อยู่ภายในตัวอย่างหลังการทดสอบบวมตัวในน้ำทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีการซึมออกมาอยู่บริเวณผิวตัวอย่างมากขึ้น ส่วนพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 หลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำมีค่าแรงยึดติดลดลงเนื่องมาจากการเชื่อมขวางโดยกรดมาลีอิคทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ซึมออกมาอยู่บริเวณผิวตัวอย่างได้ยากมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ

	Adhesion force (N.m)			
	EDGE		MIDDLE	
Sample	Before swell	After swell	Before swell	After swell
NR/PVA M0	11.54	0	80.54	144.38
NR/PVA M40	19.99	17.55	153.81	5.27

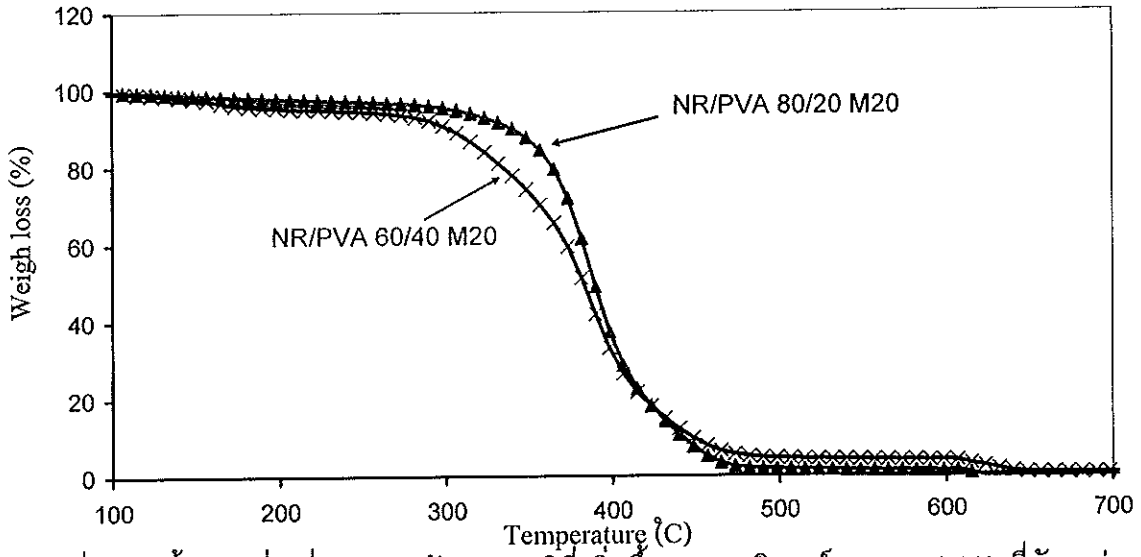
4.1.6 ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เพื่อตรวจดูความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ในงานวิจัยครั้งนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 เทคนิคคือ 1) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA 2) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA และ3) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริก

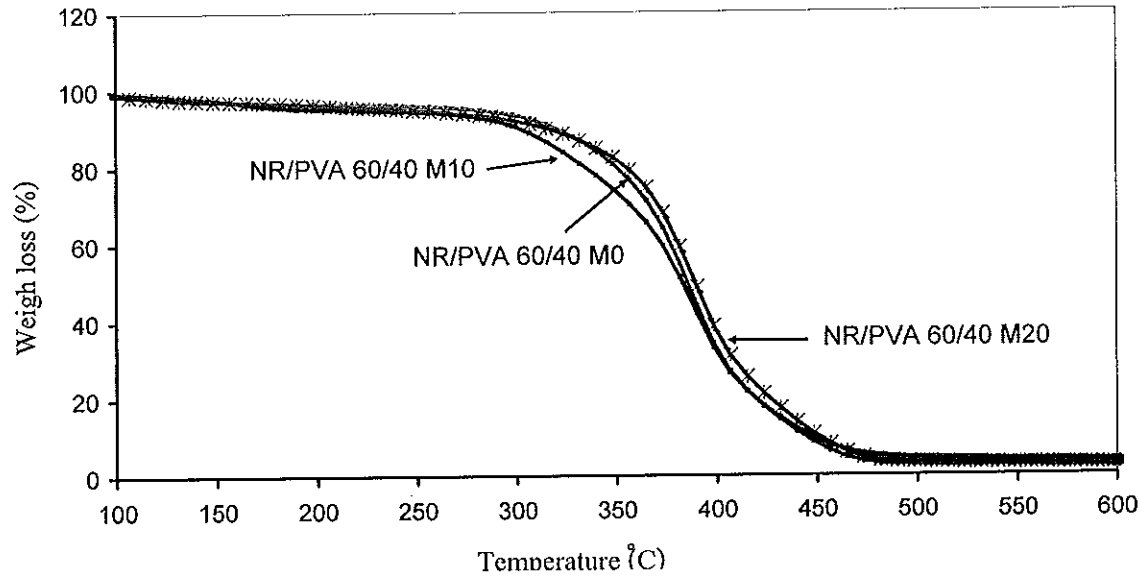
วิธีการทดสอบดังแสดงในหัวข้อ 3.4.9 เทคนิคนี้เป็นการใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของวัสดุ โดยวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปจากการให้ความร้อนหรือจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์เกิดการสูญเสียน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากตัวอย่างของพอลิเมอร์เกิดการ สูญเสียน้ำ(dehydration) การแตกออกของส่วนต่างๆ (decomposition) หรือ ออกซิเดชัน (oxidation) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบคือ ภายใต้บรรยากาศ ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 30 – 600 °C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600–800°C และอัตราการให้ความร้อนที่ใช้ในการทดสอบคือ 10°C/min

เปรียบเทียบน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 80/20 และ 60/40 ดังรูปที่ 4.39 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 80/20 พอลิเมอร์สลายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 400 °C ขณะที่พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ 60/40 มีการสลายตัวบางส่วนในช่วงแรกที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 400 °C แต่ยังคงเหลือพอลิเมอร์ผสมบางส่วนที่สลายตัวที่อุณหภูมิมากกว่า 600°C ซึ่งสลายตัวที่อุณหภูมิสูงเป็นส่วนของ PVA ที่ถูกเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิค จากการที่ยาง NR สลายตัวที่ 360 °C (Aji P. Mathew *et al.*, 2001) และ PVA สลายตัวที่ 550°C (Vladimir M. Nikolic *et al.*, 2007) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความทนทานต่อการสลายตัวทางความร้อนมากกว่ายาง NR แต่ไม่เทียบเท่ากับ PVA.



รูปที่ 4.39 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 80/20 และ 60/40

น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 10 และ 20 ดังรูปที่ 4.40 พบว่า NR/PVA M20 มีความทนทานต่อการสลายตัวทางความร้อนดีที่สุด การเสื่อมสลายของ PVA เกิดขึ้นจากการหลุดออกของโมเลกุลของ PVA ทำให้เกิดโครงสร้างคือ น้ำ อะซิตัลดีไฮด์ อะซิโตน เอทานอล อัลดีไฮด์ที่ไม่อิ่มตัว คีโตน และ อะโรมาติกต่างๆ (Spell and C. P. Christenson, 1979)

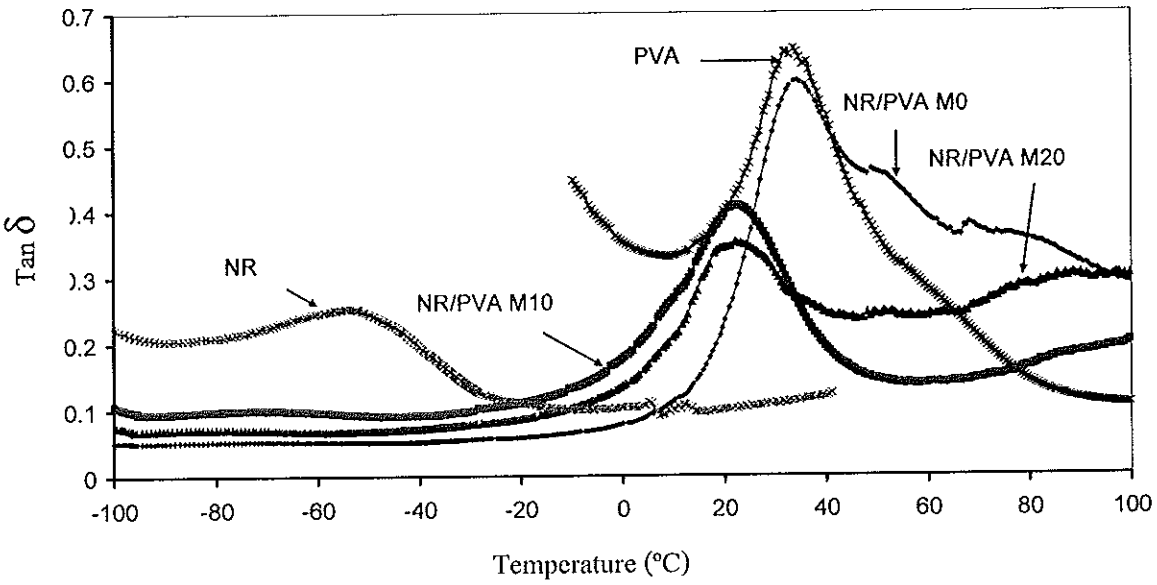


รูปที่ 4.40 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 10 และ 20

4.1.6.2 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์

การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.10 เป็นอีกเทคนิคที่สามารถตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA การศึกษาหาสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ใช้การทดสอบแบบดึง (tension) ด้วยความถี่ 1 Hz เปอร์เซ็นต์การยืดถูกควบคุมไว้ที่ 0.1% ช่วงอุณหภูมิการทดสอบ -100°C ถึง 250°C และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 2°C/min

การเปรียบเทียบค่า Tan δ ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 10 และ20 และ PVA ดังรูป 4.41 พบว่ายาง NR มี T_g ที่ประมาณ -60 °C PVA มี T_g ที่ประมาณ 35 °C ส่วนพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 10 และ 20 มี T_g ที่ประมาณ 20 °C เห็นได้ว่าสามารถผสมพอลิเมอร์ระหว่าง NR กับ PVA เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม NR/PVA จะแสดง T_g เพียงค่าเดียว สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีกรดมาลีอิคแสดง T_g ที่ตำแหน่งเดียวกับ PVA คือจะมี T_g ที่ประมาณ 35 °C



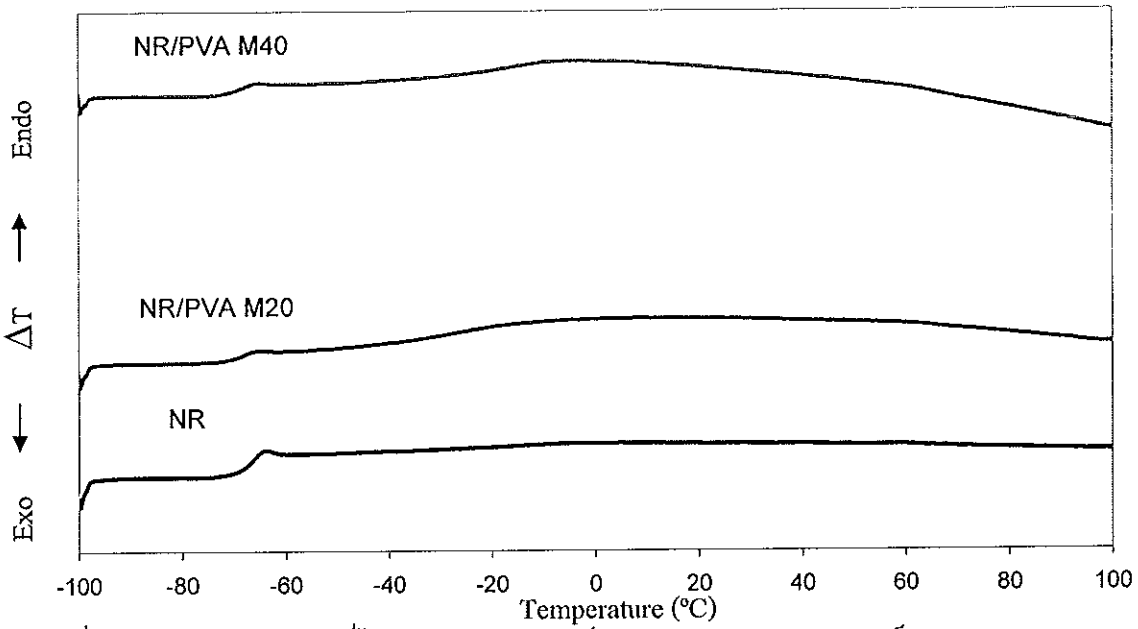
รูปที่ 4.41 Tan δ กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 10 และ20 และ PVA

4.1.6.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

การทดสอบดังหัวข้อ 4.4.12 เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม สำหรับเทคนิค DSC สารตัวอย่าง และ สารอ้างอิงจะถูกให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานสองแหล่งที่แยกกัน ค่าพลังงานความร้อน ($d\Delta Q/dt$) ที่ใช้ในการ

รักษาอุณหภูมิของตัวอย่าง และ สารอ้างอิงให้เท่ากันจะถูกบันทึกไว้ ข้อมูลที่ถูกนำมาพลอตกราฟกับอุณหภูมิ คือ $d\Delta Q/dt$ กราฟที่ได้เรียกว่า เทอร์โมแกรม (thermogram)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ด้วยเครื่อง DSC ดังรูปที่ 4.42 พบว่า T_g ของยางธรรมชาติจากการทดลองอยู่ที่ประมาณ -67 °C และพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 20 และ 40% ก็ปรากฏ T_g ที่ตำแหน่งนี้เช่นเดียวกันแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ยังคงสมบัติของความเป็นยางอยู่ซึ่งเป็นส่วนของยางที่อยู่ภายในร่างแหของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของ PVA โดยเทคนิค DSC ไม่สามารถตรวจพบ T_g ของ PVA ได้ แต่สามารถพบค่า T_m ได้ที่ 202.7 °C (Sudhamani *et al.*, 2003)



รูปที่ 4.42 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M20 และ M40 เปรียบเทียบกับ NR

4.1.7 การวัดมุมสัมผัส

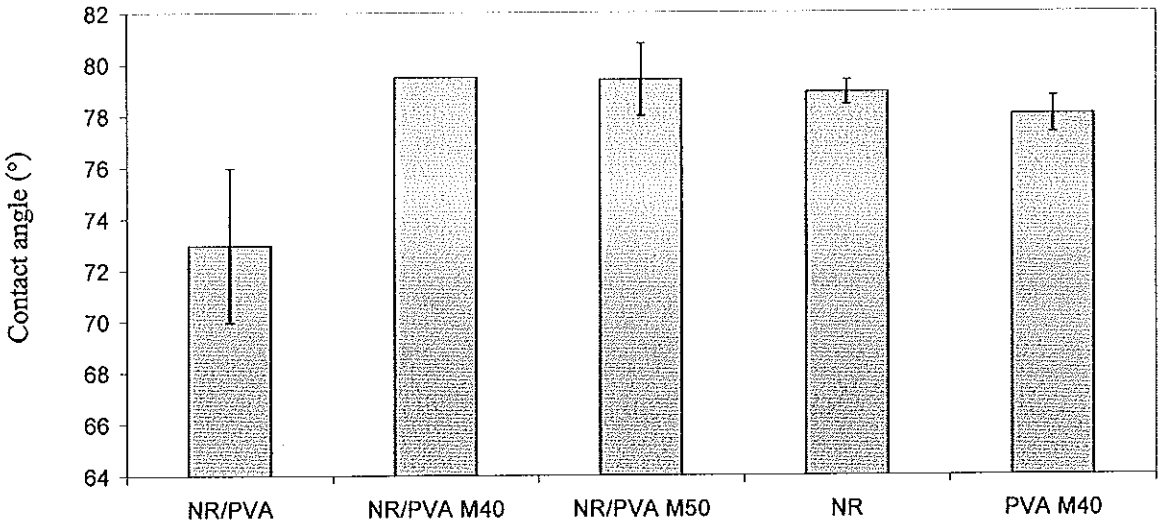
การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.13 ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.43

เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 เปรียบเทียบกับ NR และPVA M40 ดังรูปที่ 4.43 และตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ายาง NR มีค่ามุมสัมผัสที่สูงหมายถึงไม่ชอบน้ำนั่นเอง แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่สารเชื่อมขวางจะ

เห็นว่ามีความชอบน้ำมาก (มุมสัมผัสต่ำ) แต่หลังจากเชื่อมขวางพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ด้วยกรดมาลีอิคในปริมาณ 40 และ 50% จะเห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความชอบน้ำลดลง

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 NR และPVA M40

		Contact angle (°)			
No.	Formula	1	2	3	Average
1	NR/PVA	68.5	75.2	75.2	72.97
2	NR/PVA M40	79.5	79.5	79.5	79.50
3	NR/PVA M50	78.5	78.2	81.5	79.40
4	NR	79.5	78.2	79	78.90
5	PVA M0	61.5	59.8	58	59.77
6	PVA M40	78.2	78.4	77.5	78.03



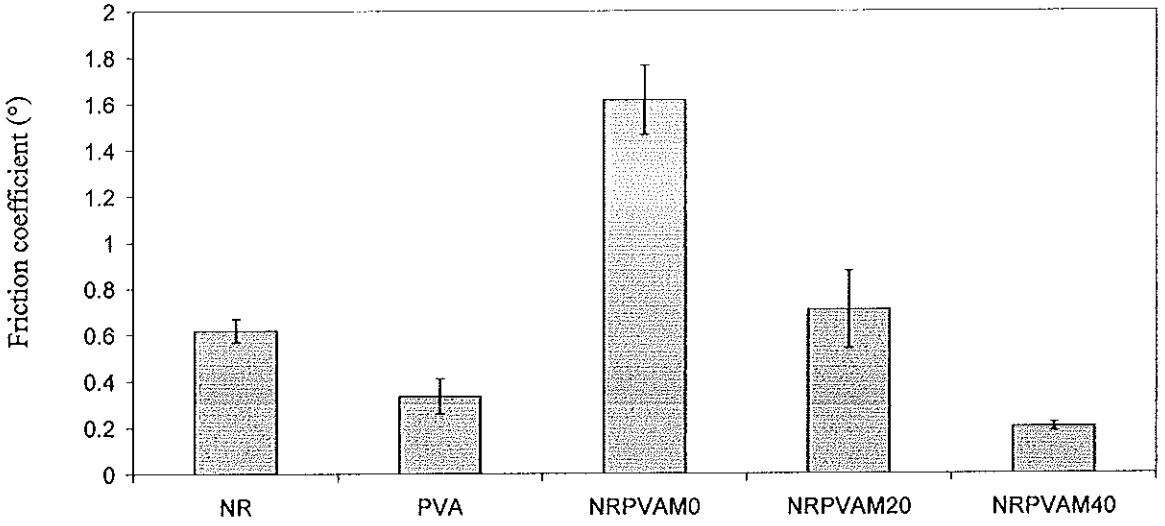
รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบมุมสัมผัส NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 NR และPVA M40

4.1.8 การวัดความเสียดทานของพื้นผิว

การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.14 ทำการวัดความเสียดทานของพื้นผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสม มีผลการทดลองดังรูปที่ 4.44

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.44 เปรียบเทียบระหว่าง NR PVA และ NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 พบว่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ยาง NR > PVA สำหรับ

สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เมื่อใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวาง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานมีแนวโน้มที่ลดลง กล่าวคือ เมื่อใช้กรดมาลีอิคเชื่อมขวางในปริมาณที่มากขึ้นทำให้มีการเชื่อมขวางระหว่างกรดมาลีอิคกับ PVA ได้มากขึ้น เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหแบบสอดไขว้กับยางธรรมชาติ (interpenetrating polymer network) ซึ่งเมื่อแผ่นพอลิเมอร์ผสมแข็งแรงขึ้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานลดลง



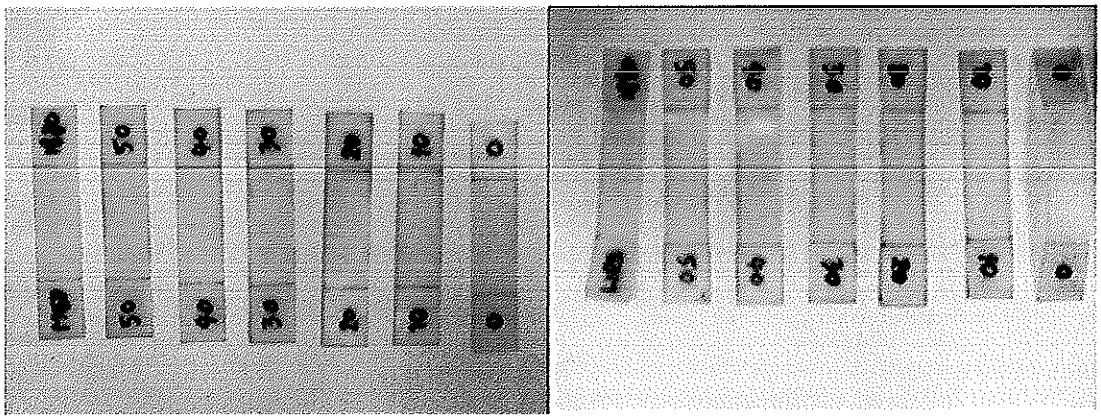
รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบความเสียดทานของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 NR และPVA เชื่อมขวาง

4.1.9 ศึกษาการทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม

ทำการทดสอบโอโซนเพื่อศึกษาลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบที่ความเข้มโอโซนที่ 50 ± 5 pphm อุณหภูมิที่ใช้ 40 ± 2 ° C และยืดตัวอย่างไว้ 20 % ใส่ในตู้โอโซนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จึงนำมาตรวจรอยแตก ได้ผลการทดลองดังนี้

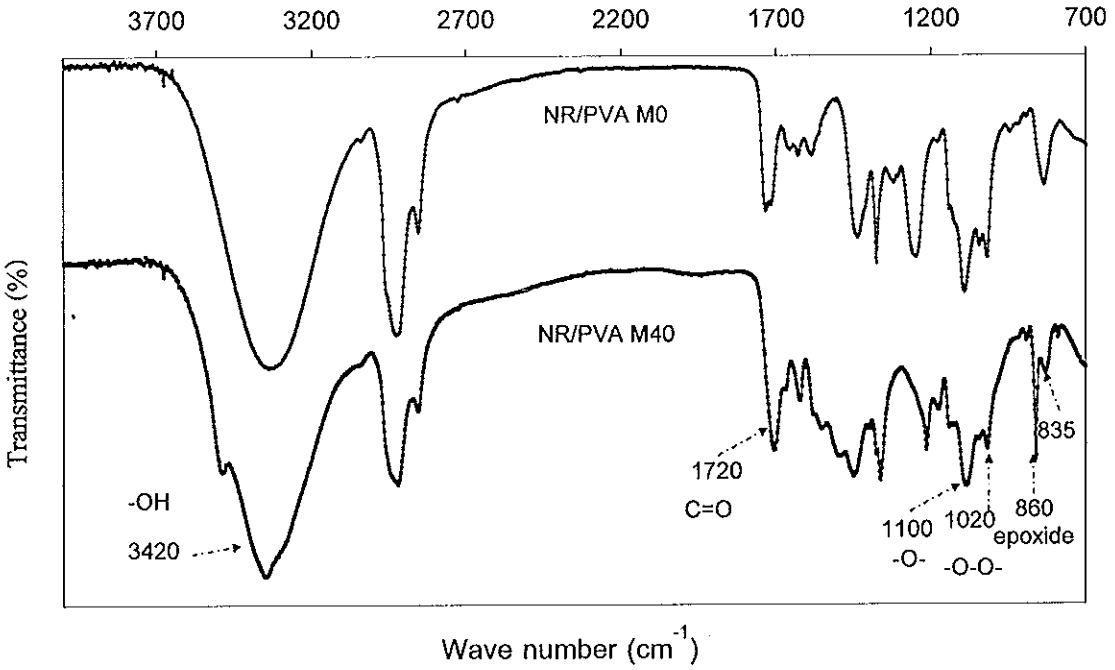
จากผลการทดลองที่ได้ ดังรูปที่ 4.45 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆ ไม่สามารถสังเกตเห็นรอยแตกได้เลยแต่มีการเปลี่ยนแปลงสีและชิ้นตัวอย่างมีการบิดเบี้ยวไปจากเดิมเล็กน้อย สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในคือสูตร NR/PVA M0 โดยชิ้นตัวอย่างมีการบิดเบี้ยวไปจากเดิม ซึ่งจากการทดสอบความทนทานต่อโอโซนแสดงให้เห็นว่าการผสมระหว่าง NR/PVA ทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อโอโซนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว (H.M. Nor and J.R. Ebdon, 2000) จากลักษณะดังกล่าวหากมีการบ่มเร่งให้นานขึ้น โอโซนสามารถซึมผ่านรอยแตกเข้าทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติเสื่อมสภาพได้ โดยเมื่อยางธรรมชาติทำ

ปฏิกิริยากับโอโซน จะแสดงโครงสร้างต่างๆที่เป็นไปได้ จะเป็นดังรูป 4.47 สำหรับรูปที่ 4.46 เปรียบเทียบสเปคตราของ NR/PVA M0 และ NR/PVA M40 หลังการทดสอบโอโซน พอลิเมอร์ผสมจะแสดงพีคที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 1720 cm^{-1} เป็นของหมู่คาร์บอนิล และ 3420 cm^{-1} เป็นของหมู่ ไฮดรอกซิล และที่ตำแหน่ง 835 cm^{-1} เป็นตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นพีคที่ตำแหน่ง 860 1020 และ 1100 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ epoxide –O-O- และ –O- ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการที่โอโซนเข้าไปทำปฏิกิริยาในพอลิเมอร์ผสม (H.M. Nor and J.R. Ebdon, 2000) แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่มีปริมาณสารเชื่อมโยง 40% จะยังคงมีตำแหน่งพีคที่ 835 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติเป็นการแสดงให้เห็นว่าการใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางทำให้พอลิเมอรผสมมีความทนทานต่อโอโซนมากขึ้น

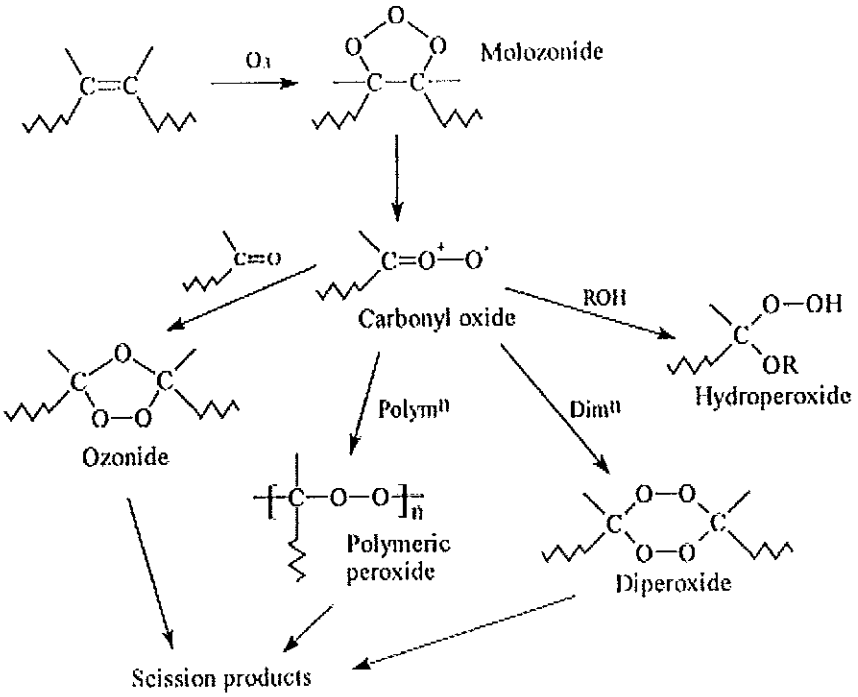


ก่อนการทดสอบโอโซน หลังการทดสอบโอโซน

รูปที่ 4.45 ลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบโอโซน



รูปที่ 4.46 สเปคตราของ NR/PVA M0 และ NR/PVA M40 หลังการทดสอบโอโซน



รูปที่ 4.47 ภาพแสดงปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางธรรมชาติและโอโซน (H.M. Nor and J.R. Ebdon, 2000)

4.1.10 สรุปผลการทดลองตอนที่ 1

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ในขั้นต้นเพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ โดยพบว่าสัดส่วนของ PVA ในพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น รวมถึงปริมาณกรดมาลีอิค อุณหภูมิในการเชื่อมขวาง ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ผสมได้จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมคือปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ C=O ที่ 1663 cm^{-1} คือ O-H ที่ 1293 cm^{-1} และคือ C-O-C ที่ 1152 cm^{-1} และการลดลงของความเข้มของพลังงานที่ 2θ เท่ากับ 40° จากเทคนิค XRD แสดงถึงการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิก โดยสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดีขึ้นหลังจากการเชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิค และยังดีขึ้นอีกเมื่อปรับปรุงโดยการเติมกลีเซอรอล การศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลายพบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความทนทานต่อตัวทำละลายต่างๆดีขึ้นหลังจากการเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิค ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA โดยเฟสของ PVA ที่เกิดขึ้นจะมีการแจกแจง และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเฟสของยาง NR ซึ่ง PVA ที่เกิดการเชื่อมขวางจะสังเกตได้จากลักษณะที่นูนขึ้นจากภาพที่ได้จากเทคนิค SEM การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมNR/PVA มีความทนทานต่อความร้อนมากถึง $400^{\circ}C$ และมีความทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น จากเทคนิค TGA การตรวจสอบสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ด้วยเทคนิค DMTA พอลิเมอร์ผสม NR/PVA สามารถเข้ากันได้ดีโดยแสดง T_g ค่าเดียวที่ประมาณ 20 °C ส่วน ENR/PVA แสดง T_g ค่าเดียวที่ประมาณ 0 °C (ยาง NR จะมี T_g ที่ประมาณ -60 °C PVA จะมี T_g ที่ประมาณ 35 °C) การวัดมุมสัมผัส พอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีความชอบน้ำลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางคือกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้น การวัดความเสียดทานของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น การทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสมNR/PVA สามารถทนทานต่อโอโซนได้ดี กล่าวคือไม่มีรอยแตกเกิดขึ้น

4.2 ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม จากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

4.2.1 ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

เพื่อให้ได้มาซึ่งแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ดีที่สุด จึงจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยหลัก ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ไม่ว่าจะเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ผสม ปริมาณสารเชื่อมขวางที่ใช้ รวมไปถึงระยะเวลาในเชื่อมขวาง

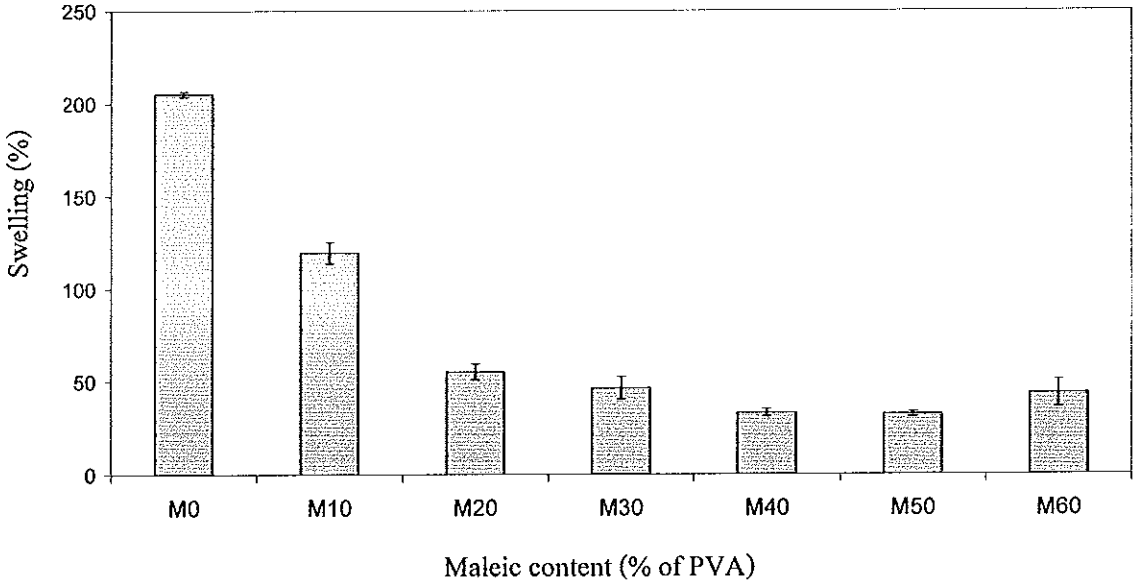
4.2.1.1 อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสม

อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง ENR กับ PVA ที่ใช้คือ 60/40 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมตามการศึกษาในหัวข้อที่ 4.1

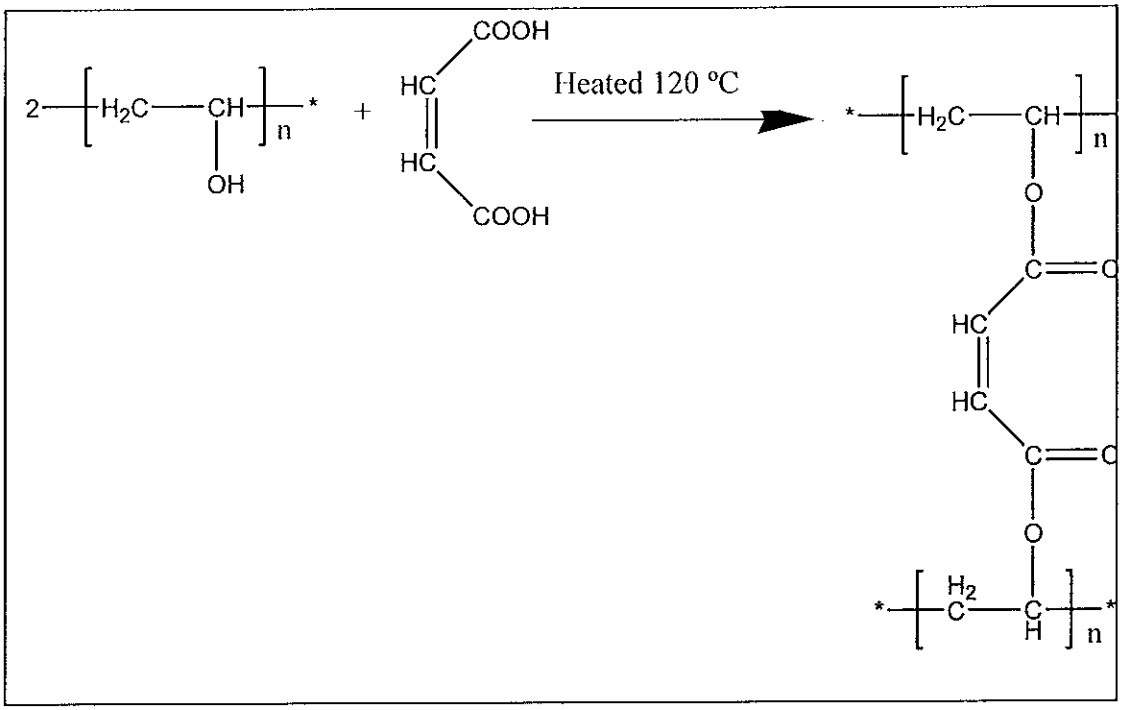
4.2.1.2 ปริมาณกรดมาลีอิก

ทำการศึกษาปริมาณกรดมาลีอิดที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง โดยแปรปริมาณของกรดมาลีอิดที่ใช้เป็น 10 20 30 40 50 และ 60% ของ PVA ซึ่งจากการทดสอบสมบัติทางด้านการบวมตัวในตัวทำละลายเพื่อให้ทราบปริมาณกรดมาลีอิดที่เหมาะสมนั้น สามารถแสดงผลการทดสอบได้ดังนี้

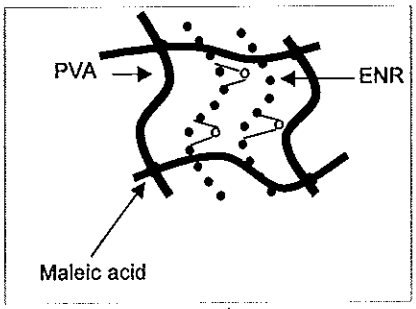
จากการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 โดยการแปรปริมาณสารการเชื่อมขวางคือกรดมาลีอิดเป็น 0-60% ของ PVA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางทำให้เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA ลดต่ำลงอีกด้วย โดยที่ปริมาณสารเชื่อมโยง 50% พอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวเพียง 32.25% สาเหตุที่ปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มมากขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวที่ลดลงนั้นเนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ PVA โดยกรดมาลีอิค ดังรูปที่ 4.49 และการเชื่อมขวางนี้เกิดการสอดไขว้กับสายโซ่ของยางธรรมชาติทำให้เกิดโครงสร้างที่เรียกว่า โครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ (Interpenetrating polymer network, IPN) ดังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.48 การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60% และยางธรรมชาติอิพอกไซด์



รูปที่ 4.49 ปฏิกิริยาระหว่างพอลิไวนิล แอลกอฮอล์กับกรดมาลีอิค (Riyajan *et al.*, 2009)

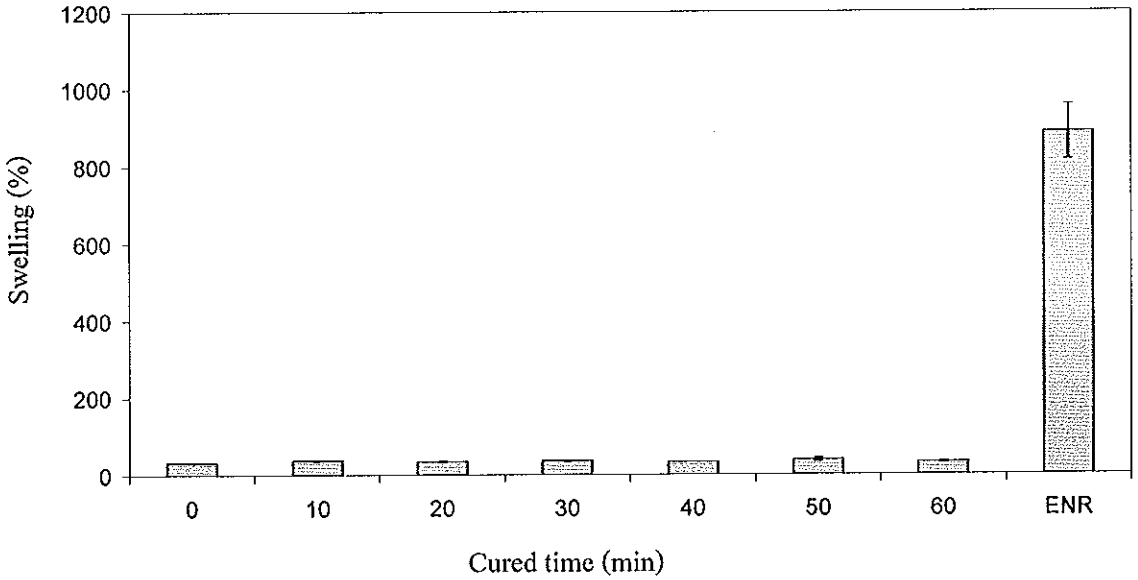


รูปที่ 4.50 ลักษณะการเกิดโครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA

4.2.1.3 ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง

ทำการศึกษาระยะเวลาในการเชื่อมขวางของพอลิเมอรผสม ENR/PVA โดยนำมาทำการแปรระยะเวลาในการเชื่อมขวางเป็น 10 20 30 40 50 และ60 นาทีตามลำดับ ซึ่ง เปรียบเทียบกับยาง ENR ซึ่งจากการทดสอบสมบัติเพื่อให้ได้ระยะเวลาในการเชื่อมขวางที่เหมาะสมนั้น สามารถแสดงผลการทดสอบต่าง ๆ คือสมบัติทางด้านการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนได้ดังนี้

การศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 ปริมาณสารเชื่อมขวาง คือกรดมาลีอิค 40 % ของ PVAโดยการแปรระยะเวลาในเชื่อมขวางเป็น 0-60 นาที เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางด้านการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีนกับยาง ENR พบว่าระยะเวลาในการเชื่อมขวางไม่ค่อยมีผลต่อสมบัติทางด้านการบวมตัวในโทลูอีน (ดังแสดงรูปที่ 4.51)



รูปที่ 4.51 การบวมตัวในโทลูอีนของ ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการเชื่อมขวางตั้งแต่ 0-60 นาที

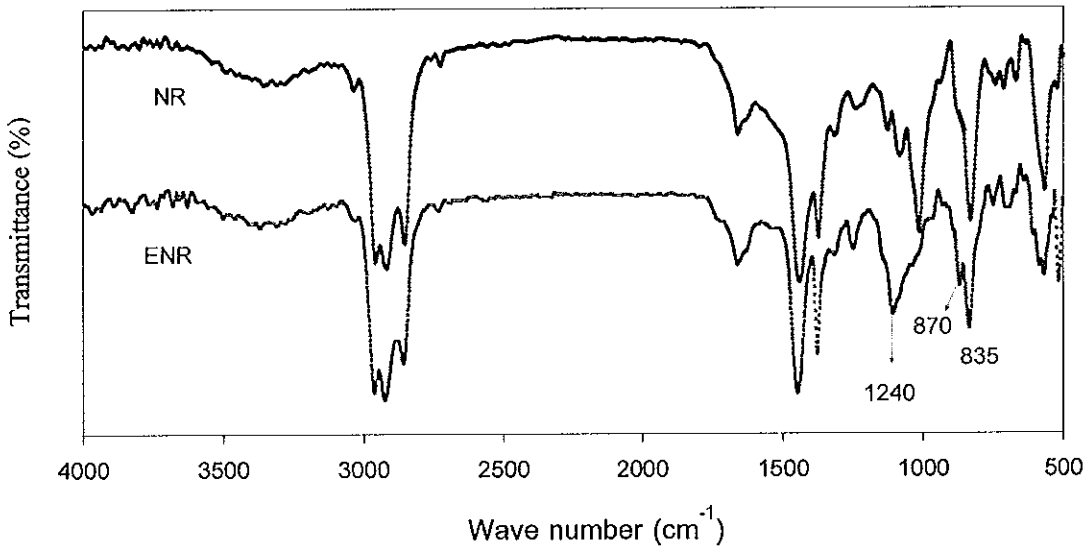
4.2.2 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม

4.2.2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอิพอกไซด์

จากการศึกษาเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในหัวข้อ 3.4.1 โดยปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน แล้วจับตัวน้ำยางเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อิพอกไซด์ด้วยเครื่องอิฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้สเปกตรัมของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.52 พบพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของหมู่อิพอกไซด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 1240 cm^{-1} และพีคอื่นๆดังแสดงในตารางที่ 4.5 จากอัตราส่วนของพีค (absorbance ratio) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870/835 cm^{-1} (ตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการเกิด out-of-plane-bending ของพันธะ C-H ที่เกาะกับ C=C ของ *cis*-1,4-polyisoprene สามารถนำไปหาเปอร์เซ็นต์การเกิดหมู่อิพอกไซด์ (% epoxidation) โดยการคำนวณหาค่า absorbance ratio (Ar) เพื่อเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (สุวิทย์, 2548) สำหรับการหาปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในหน่วยโมลเปอร์เซ็นต์จากความสัมพันธ์ดังสมการ 4.1 (Davey and Loadman, 1984) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.6

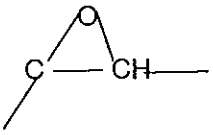
$$Ar = a_{870}/ (a_{870}+a_{835}) \qquad (4.1)$$

การเปรียบเทียบสเปคตราอินฟราเรดของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ดังรูปที่ 4.52 พบว่าหลังจากดัดแปรยางธรรมชาติเป็นยางธรรมชาติอิพอกไซด์ จะมีพีคปรากฏที่ตำแหน่ง 870 และ 1240 ซึ่งเป็นตำแหน่งวงแหวนออกซิเรนที่เกิดขึ้นมาหลังจากการดัดแปร เป็นการยืนยันว่าสามารถเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ได้สำเร็จ โดยตำแหน่งเลขคลื่นของสเปคตรัมต่างๆของยางธรรมชาติอิพอกไซด์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.52 สเปคตราอิฟราเรดของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอิพอกไซด์

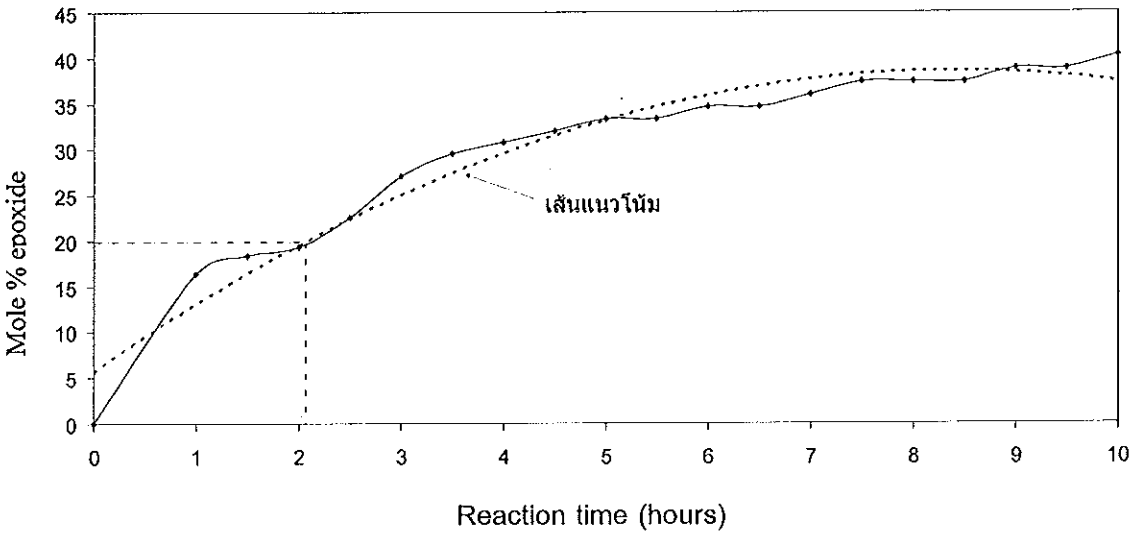
ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งเลขคลื่นของพีคสเปคตรัมอินฟราเรดหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (Davey and Loadman, 1984)

Functional group	Wave number (cm^{-1})
$-CH_3$	2956, 1377
$-CH_2$	2925, 1446
C=C	1657
-C=CH-(*cis*-1,4)	835
	870, 1240

ผลของการแปรเวลาของการทำปฏิกิริยาต่อ Absorbance ratio และปริมาณหมู่อิพอกไซด์ ดังตารางที่ 4.6 สามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหมู่อิพอกซิเดชันกับเวลาในการทำปฏิกิริยา ดังรูป 4.53 คือ เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน ทำให้การเพิ่มปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในโมเลกุลยางธรรมชาติในลักษณะพอลิโนเมียล เนื่องจากกรดเปอร์ฟอร์มิคทำปฏิกิริยากับโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวของยางธรรมชาติ เกิดเป็นวงแหวนอิพอกไซด์ขึ้นบนโครงสร้างโมเลกุล และกรดฟอร์มิคสามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในระบบได้ต่ออีก ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หมด ดังรายละเอียดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.54 จากกราฟนี้ทำให้ได้เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมงสำหรับการเตรียมยาง ENR-20 (มีปริมาณอิพอกไซด์ 20 โมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์) (สุวิทย์, 2548)

ตารางที่ 4.6 ผลของการแปรเวลาของการทำปฏิกิริยาต่อ Absorbance ratio และปริมาณหมู่อิพอกไซด์ (สุวิทย์, 2548)

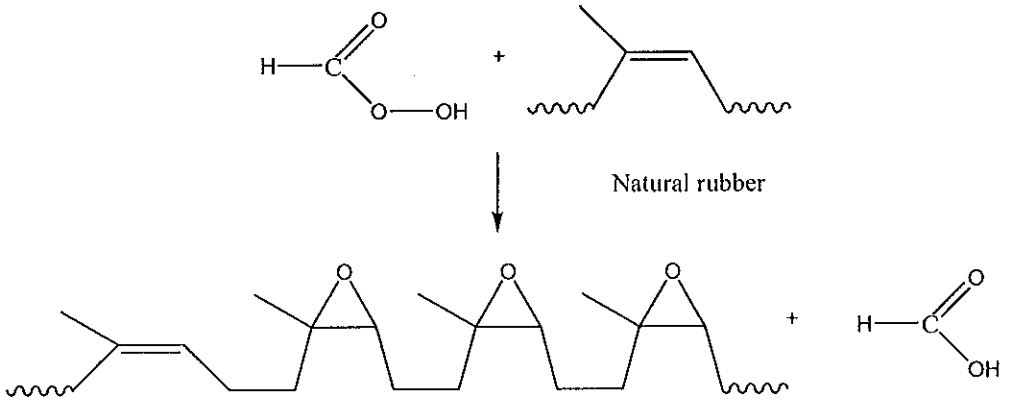
Reaction time (h)	Absorbance ratio	Mole % Epoxide
1.0	0.36	16.43
1.5	0.38	18.37
2.0	0.39	19.37
2.5	0.42	22.54
3.0	0.46	27.09
3.5	0.48	29.53
4.0	0.49	30.78
4.5	0.50	32.05
5.0	0.51	33.35
5.5	0.51	33.35
6.0	0.52	34.68
6.5	0.52	34.68
7.0	0.53	36.03
7.5	0.54	37.40
8.0	0.54	37.40
8.5	0.54	37.40
9.0	0.55	38.80
9.5	0.55	38.80
10.0	0.56	40.23



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างหมู่อิพอกซิเดชันกับเวลาการทำปฏิกิริยา (สุวิทย์, 2548)



Formic acid Hydroen peroxide Peroxy formic acid (1)

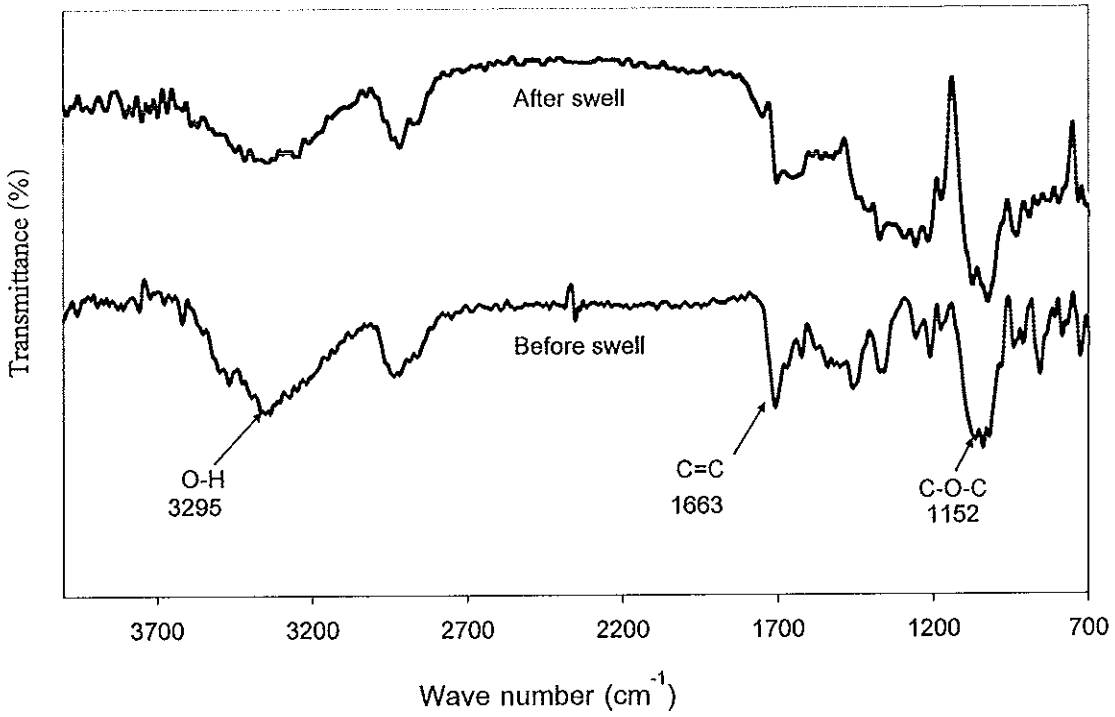


Epoxidize natural rubber, ENR Formic acid (2)

รูปที่ 4.54 ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันโดยใช้กรดฟอร์มิคและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ดัดแปลงจาก Baker and Geling, 1987)

4.2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค ATR-FTIR

การทดสอบเพื่อหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นหลังจากการใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นตัวอย่างไปต้มในน้ำร้อนที่ 85 °C เพื่อละลายส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกรดมาลีอิคที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไป ซึ่งจากรูป 4.55 พบว่าหลังจากต้มในน้ำร้อนแล้วนั้น พอลิเมอร์ผสมยังมีพีคที่ตำแหน่งต่างๆ คือ การเกิดขึ้นของหมู่เอสเทอร์ที่ตำแหน่ง 1663 cm^{-1} (C=C stretching of maleic acid ester) และ 1152 cm^{-1} (C-O-C stretching of maleic acid ester) (Majumdar and Adhikari, 2006) ซึ่งเป็นการยืนยันการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นของกรดมาลีอิคกับ PVA ในพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA และแถบการดูดกลืนที่ 3,200-3,500 cm^{-1} (O-H stretching of PVA)

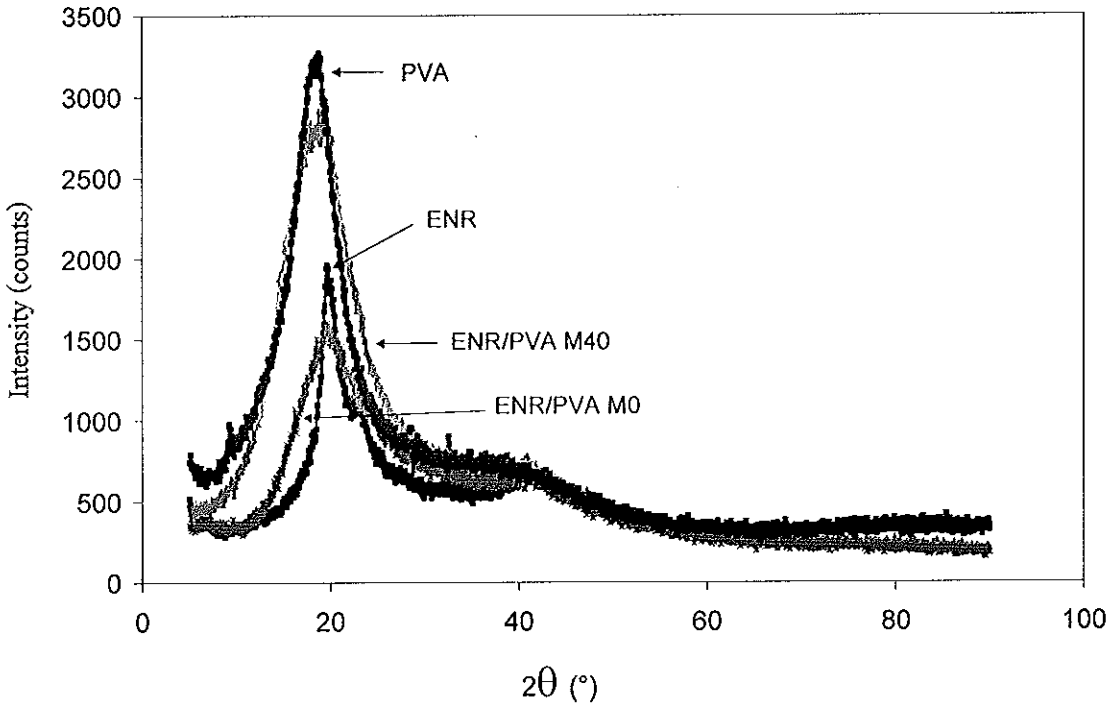


รูปที่ 4.55 สเปคตรัมอินฟราเรดของ ENR/PVA M 40 ก่อนและหลังการทดสอบบวมตัวในน้ำ

4.2.2.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค XRD

เป็นอีกเทคนิคเพื่อเป็นการยืนยันว่ามีปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.49 จากรูปที่ 4.56 พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จากการสังเกตสเปคตรัมของ PVA มีลักษณะที่เป็น semi-crystalline โดยปรากฏพีคที่สำคัญ 2 ตำแหน่งคือที่ 19.5° and 40.5° โดยพีคแรกเป็นพีคของผลึกซึ่งแสดง

2θ เท่ากับ 19.5° ซึ่งเป็นระนาบ (1 0 1) สำหรับพีคที่ 2 มีความเข้มของสัญญาณที่ต่ำ และมีลักษณะที่กว้างเป็นการตอบสนองของส่วนที่ไม่ใช่ผลึกซึ่งอยู่ภายในโครงสร้างของส่วนที่เป็นผลึก หลังจากเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางในพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่ง 19.5° มีลักษณะที่กว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PVA และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่ใส่กรดมาลีอิค เนื่องมาจากการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค สำหรับที่ความเข้มของสัญญาณพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ใช้ปริมาณกรดมาลีอิค 40% ที่ตำแหน่ง 40.5° มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมโยง และ PVA ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นมาจากอันตรกิริยาของพันธะไฮโดรเจนระหว่าง PVA ยาง ENR และโมเลกุลของกรดมาลีอิค ซึ่งก็เป็นการแสดงให้เห็นว่าการเติมกรดมาลีอิคในพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ช่วยปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันของ ENR กับ PVA (Riyajan *et al.*, 2009)

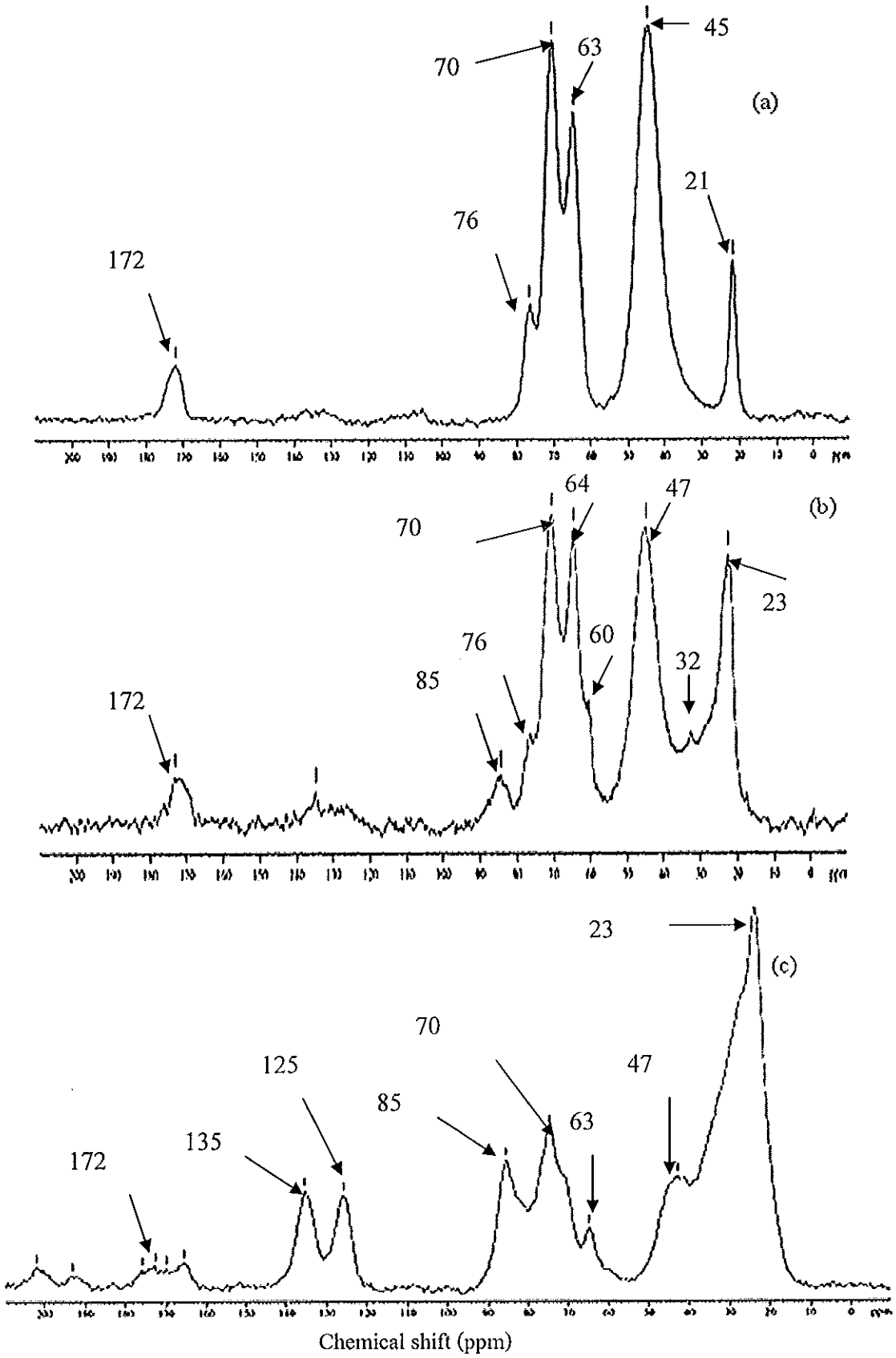


รูปที่ 4.56 ผล XRD pattern ของ ENR/P VA M0 และ M40 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ และ PVA

4.2.2.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค NMR

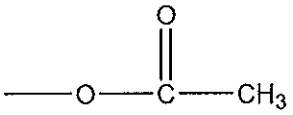
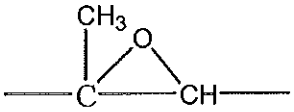
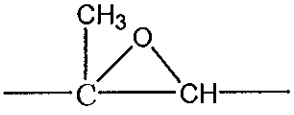
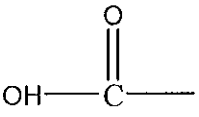
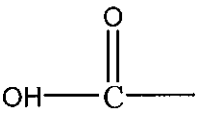
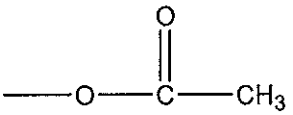
ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (20±1°C) โดยทดสอบแบบ solid state ^{13}C CP/MAS NMR ทำการบันทึกที่ความถี่ 75 MHz. พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ประกอบด้วย: จำนวนครั้งของการสแกน (NS) 1,600 เวลาในการผ่อนคลาย 4 วินาที อัตราการปั่น 5 kHz และขนาดของสเปคตรัม 2 และ 4 เท่าของขนาดจริง

จากรูปที่ 4.57 เป็นสเปคตรัม ^{13}C NMR ของ PVA ENR/PVA M0 และ ENR/PVA M40 ตามลำดับ ลักษณะสเปคตรัมที่สำคัญของ PVA ดังรูปที่ 4.57 a คือ ปรากฏสัญญาณที่ 45.0 ppm เป็นสัญญาณของหมู่ CH_2 ที่ตำแหน่ง 63.0 70.0 และ 76.0 ppm เป็นสัญญาณของหมู่ C H - O H การที่ปรากฏสัญญาณเป็นหลายพีคเนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล (Saito *et al.*, 2007) ส่วนที่ตำแหน่ง 172.0 ppm เป็นสัญญาณของหมู่คาร์บอกซิล สำหรับลักษณะสเปคตรัมที่สำคัญของ ENR/PVA ดังรูปที่ 4.57 b คือ ปรากฏสัญญาณที่ 23.0 ppm เป็นสัญญาณของหมู่ CH_3 ที่ตำแหน่ง 32.0 และ 47.0 ppm เป็นสัญญาณของหมู่ CH_2 ที่ตำแหน่ง 60.0 และ 64.0 ppm เป็นสัญญาณของวงแหวนออกซิเรนของยาง ENR โดยยังคงแสดงสัญญาณของหมู่ CH_2 ที่ตำแหน่ง 70.0 และ 76.0 ppm เป็นสัญญาณของหมู่ CH-OH และที่ตำแหน่ง 172.0 ppm เป็นสัญญาณของหมู่คาร์บอกซิลของ PVA สำหรับในส่วนของ E N R / P V A M 4 0 ดังรูปที่ 4 . 5 7 c ที่มีการใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางจะมีตำแหน่งสัญญาณที่สำคัญเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 85 p p m เป็นสัญญาณของพันธะเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค ซึ่งสอดคล้องกันกับสัญญาณที่ตำแหน่ง 63.0 และ 70.0 ppm เป็นสัญญาณของหมู่ CH-OH ในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดังรูปที่ 4.57 a และ 4 . 5 7 b มีค่าลดลง สำหรับลักษณะของพีคที่ตำแหน่งสำคัญอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 4.7



รูปที่4.57 สเปคตรา solid state ^{13}C NMR ของ a)PVA b)ENR/PVA M0 และc)ENR/PVA M40

ตารางที่ 4.7 ค่าสัญญาณ solid state ^{13}C-NMR ของ PVA ENR และกรดมาลีอิก

Component	Signal (ppm)	Assignment
PVA (Saito *et al.*, 2007)	45	CH_2
	63 70 76	CH-OH Carbon, several peaks due to inter and/or intramolecular hydrogen bonding
	172	
ENR (Iłczyszyn *et al.*, 2003)	23	CH_3 alkyl peak
	26.2	CH_2
	32	CH_2
	47	CH_2
		
	60	
		
	64	
	125	=CH-
	135	Quaternary carbon of natural rubber
Maleic acid (Jayaseksekara *et al.*, 2004)		-CH=
	133	-CH=
	140	
		
	170	
		
	173	
Eter-linkages		
		
	85	

4.2.3 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย

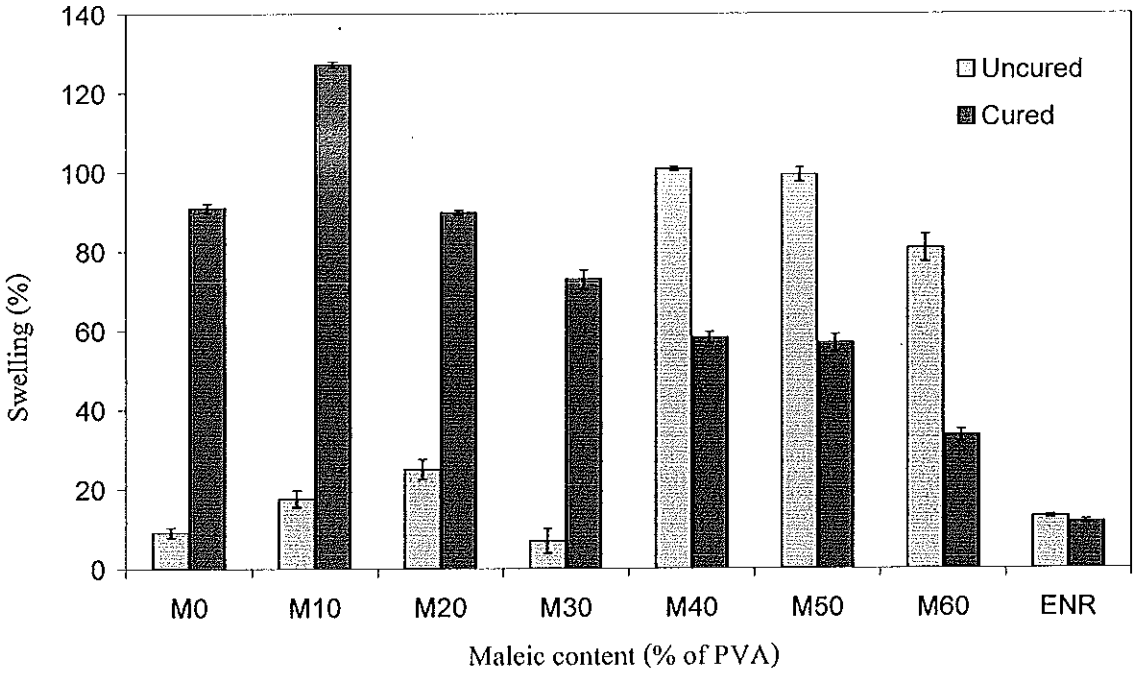
การศึกษาสมบัติทางด้านความทนทานต่อตัวทำละลาย เพื่อเป็นการตรวจสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการดัดแปร โดยทำการศึกษาในตัวทำละลาย คือ น้ำและโทลูอีน ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองต่าง ๆ ดังหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.2.3.1 การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำ

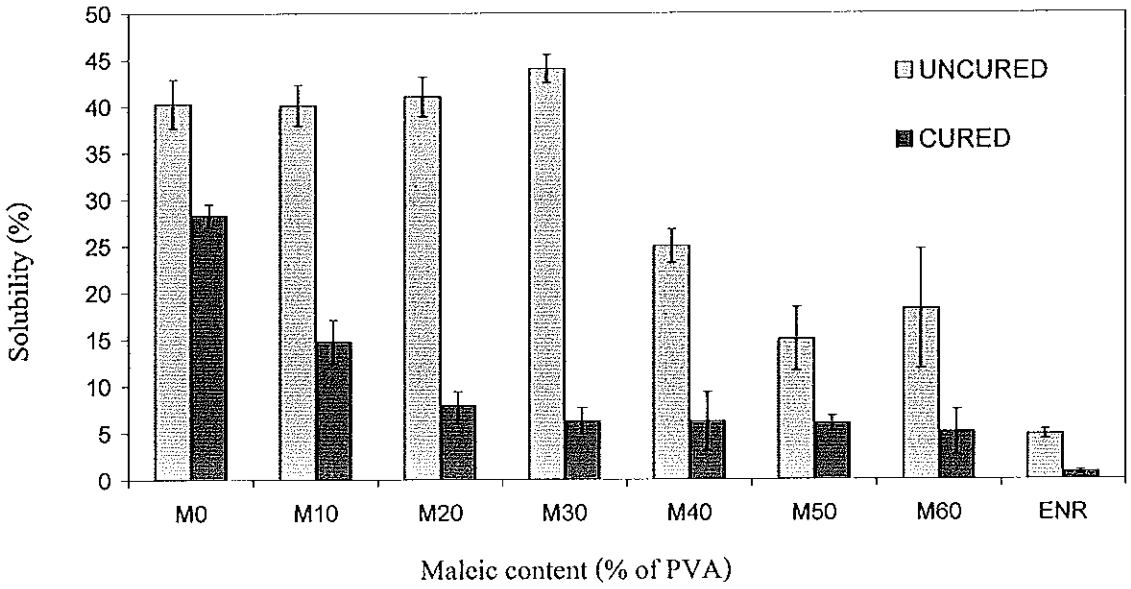
ทำการศึกษาการบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำโดยการแปรปริมาณกรดมาลีอิคตั้งแต่ 0-60 % ของ PVA เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ซึ่งมีผลการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.58 และ 4.59

จากผลการทดลองการบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.58 และ 4.59 พบว่าการบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการเชื่อมขวางมีค่าสูงกว่าก่อนการเชื่อมขวางมาก แต่หลังจากนั้นที่ปริมาณการใช้กรดมาลีอิค 40 % ขึ้นไป การบวมตัวในน้ำพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการเชื่อมขวางมีค่าต่ำกว่าก่อนการเชื่อมขวาง เนื่องมาจากในช่วงแรกที่ปริมาณการใช้กรดมาลีอิคต่ำกว่า 40 % พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ไม่มีการเชื่อมขวาง จึงทำให้มีส่วนของ PVA ที่ละลายออกไปทำให้มีส่วนของ PVA เหลืออยู่น้อยที่เกิดการบวมตัวอยู่ แต่เมื่อใช้ปริมาณการใช้กรดมาลีอิคมากกว่า 40 % มีการบวมตัวที่เพิ่มขึ้นมาอาจเนื่องมาจากในระหว่างขั้นตอนการอบแห้งพอลิเมอร์อาจทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์บางส่วนที่สามารถเกิดปฏิริยากับกรดมาลีอิคได้ สำหรับพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่มีการปริมาณการใช้กรดมาลีอิคต่ำกว่า 40 % มีการบวมตัวที่สูงในช่วงแรก เนื่องจากในช่วงแรกหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ถูกใช้ในการเชื่อมขวางน้อย แต่หลังจากที่เพิ่มปริมาณกรดมาลีอิค ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลถูกใช้ในการเชื่อมขวางมากขึ้น ทำให้ความชอบน้ำของพอลิเมอร์ลดลง ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.49

ความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดังรูปที่ 4.59 เมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการเชื่อมขวาง พบว่าหลังการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีส่วนที่ละลายลดลง แสดงว่ามีการเกิดการเชื่อมขวางขึ้นจริง และเมื่อปริมาณการใช้กรดมาลีอิคเพิ่มขึ้นก็ทำให้ส่วนที่ละลายลดลง ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการทดสอบการบวมตัว

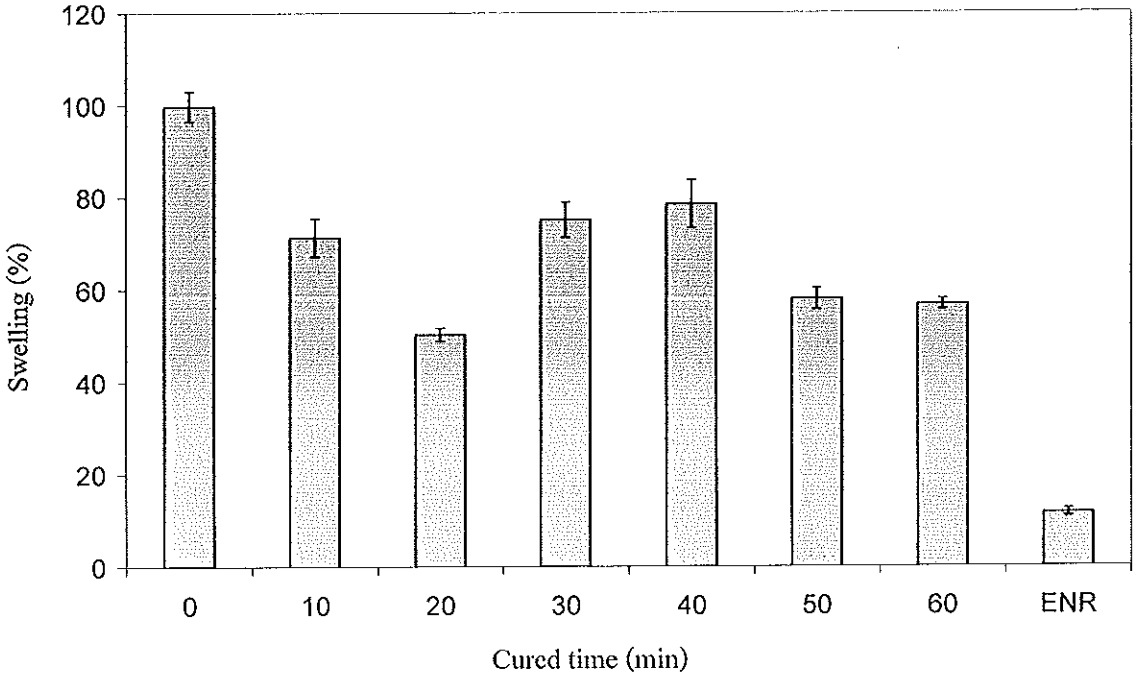


รูปที่ 4.58 การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60 % และยาง ENR ก่อนและหลังเชื่อมขวาง

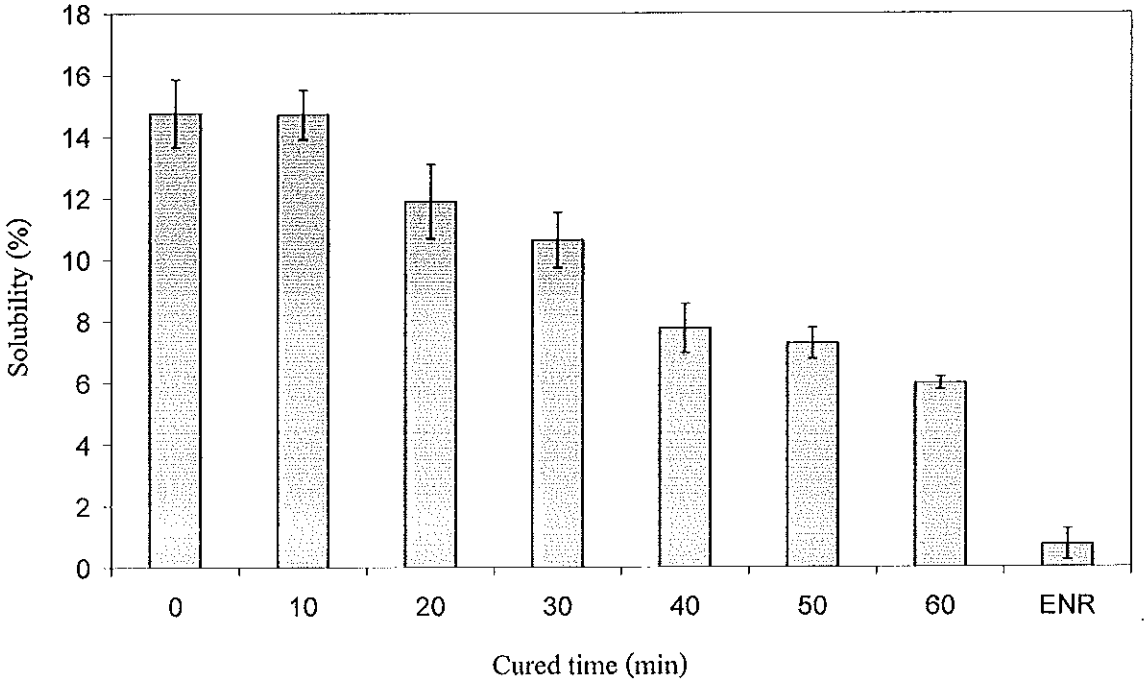


รูปที่ 4.59 ความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60 % และยาง ENR ก่อนและหลังเชื่อมขวาง

การทดสอบการบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำในรูปที่ 4.60 และ 4.61 เป็นการทดสอบโดยการแปรระยะเวลาในการเชื่อมขวาง 0-60 นาที พบว่าการบวมตัวและการละลายในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อระยะเวลาในการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง 60 นาที พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำ เท่ากับ 56.76 และ 5.97% ตามลำดับ ซึ่งการบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำเนื่องจากระยะเวลาการเชื่อมขวางที่นานขึ้นทำให้ปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค ตามรูปที่ 4.49 มากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.60 การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง 0-60 นาที และยางธรรมชาติอิพอกไซด์

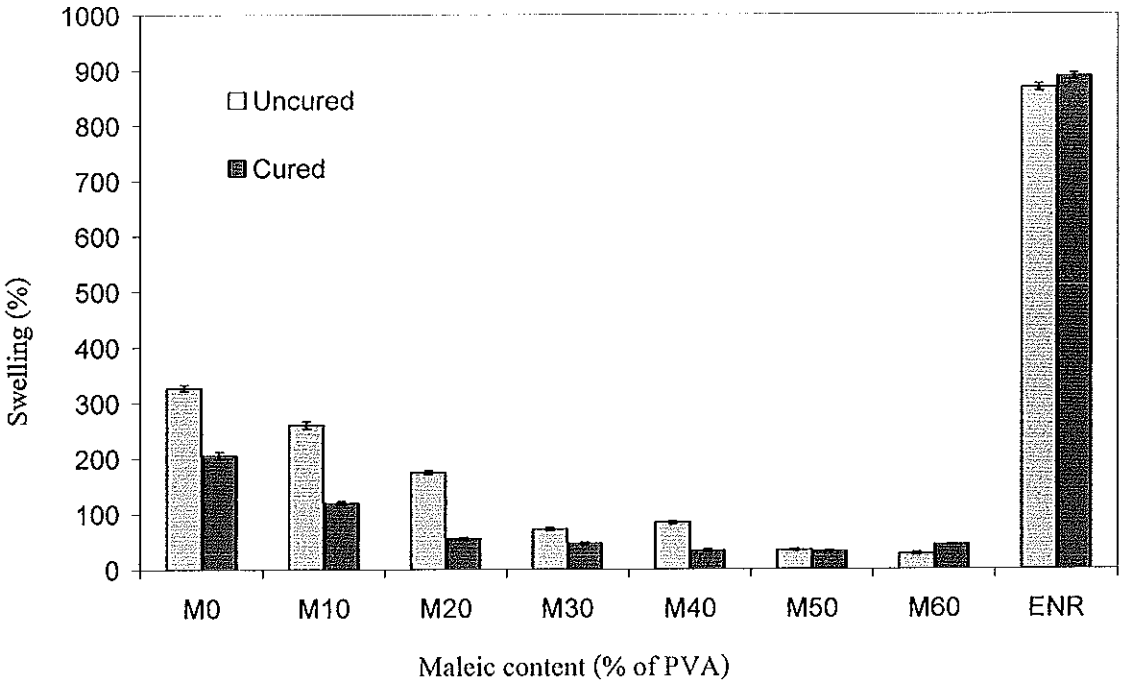


รูปที่ 4.61 ความสามารถในการการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง 0-60 นาทีและยางธรรมชาติอิพอกไซด์

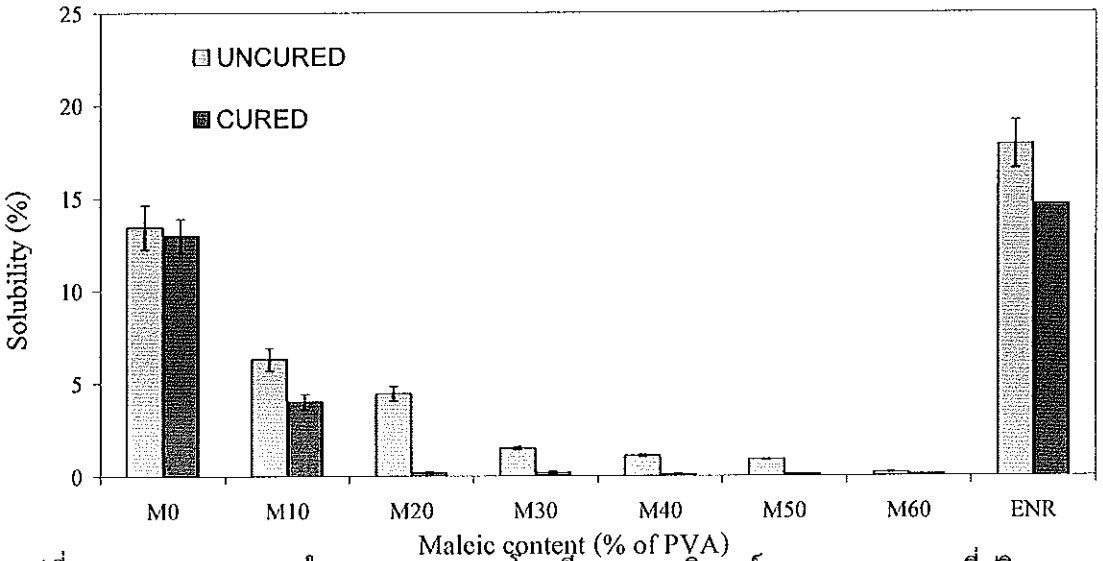
4.2.3.2 การบวมตัวในโทลูอีนความสามารถในการละลายโทลูอีน

ทำการศึกษาการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอรผสม ENR/PVA โดยการแปรปริมาณกรดมาลีอิคตั้งแต่ 0-60 % ของ PVA เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ซึ่งมีผลการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.62 - 4.65

จากผลการทดลองการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีน ดังแสดงในรูปที่ 4.62 และ 4.63 พบว่า การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการเชื่อมขวางมีค่าลดลง และปริมาณกรดมาลีอิคที่เพิ่มขึ้นก็ทำให้การบวมตัวในและความสามารถในการละลายโทลูอีนลดลงเช่นกัน ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.49 เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 กับยาง ENR พบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของยาง ENR มีค่าเท่ากับ 887.58 และ 14.63% ตามลำดับ ส่วนพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีน 33.06 และ 0.1% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางจะช่วยให้พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความทนทานต่อตัวทำละลายโทลูอีนมากที่เดียว



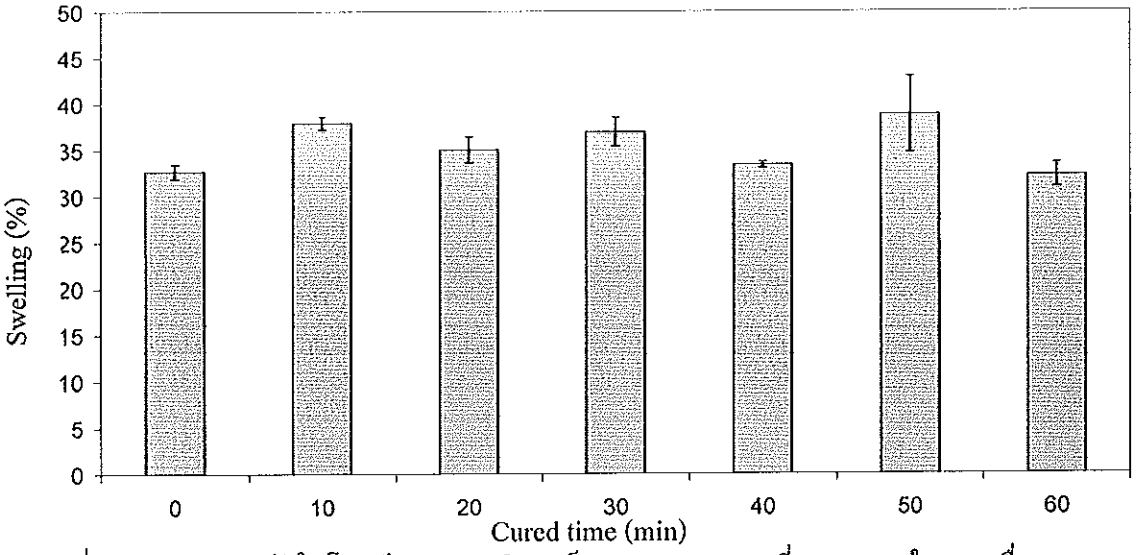
รูปที่ 4.62 การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60 % และยาง ENR ก่อนและหลังเชื่อมขวาง



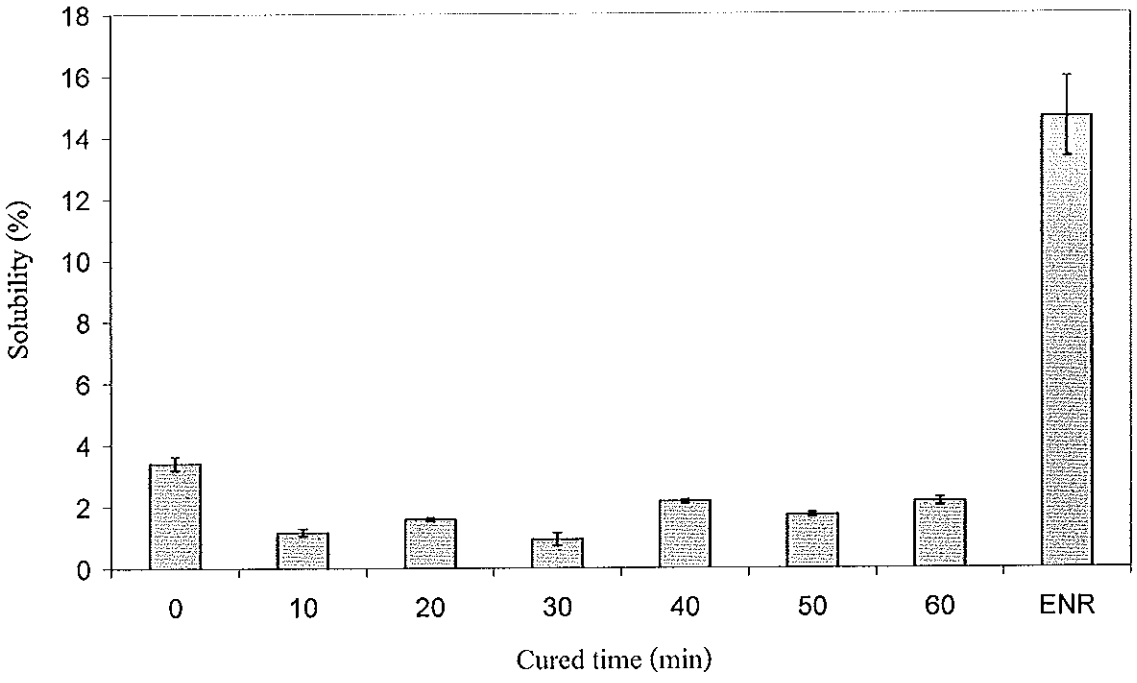
รูปที่ 4.63 ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-60 % และยาง ENR ก่อนและหลังเชื่อมขวาง

การทดสอบการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนในรูปที่ 4.64 และ 4.65 เป็นการทดสอบโดยการแปรระยะเวลาในการเชื่อมขวาง 0-60 นาที พบว่าระยะเวลาในการเชื่อมขวางไม่มีผลต่อการบวมตัวและการละลายในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA

กล่าวคือการบวมตัวและการละลายในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีแนวโน้มที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น



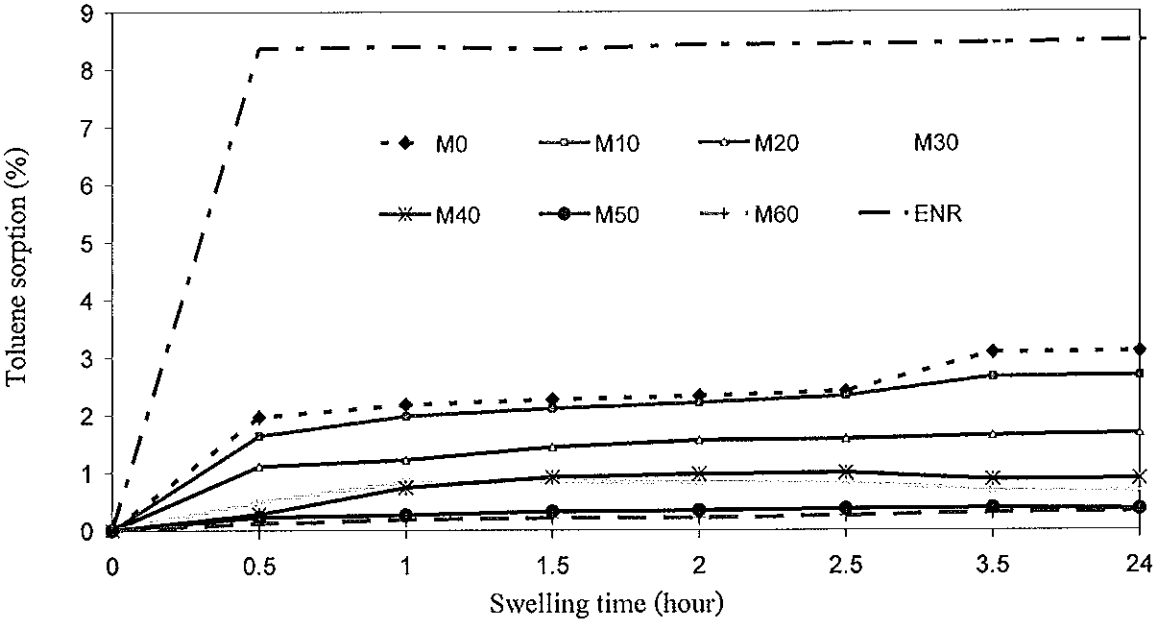
รูปที่ 4.64 การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง 0-60 นาที และยางธรรมชาติอิพอกไซด์



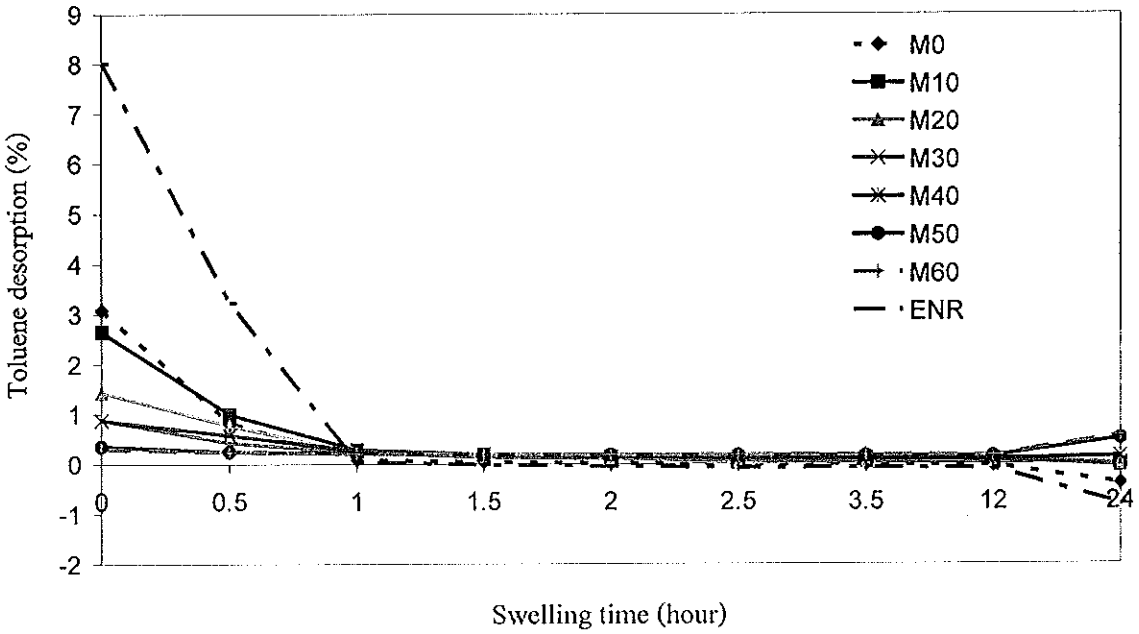
รูปที่ 4.65 ความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ระยะเวลาในการเชื่อมขวาง 0-60 นาที และยาง ENR

4.2.3.3 การทดสอบการดูดซับ (sorbtion) และการคายออก (desorbtion) ในน้ำและโทลูอีนที่อุณหภูมิห้อง

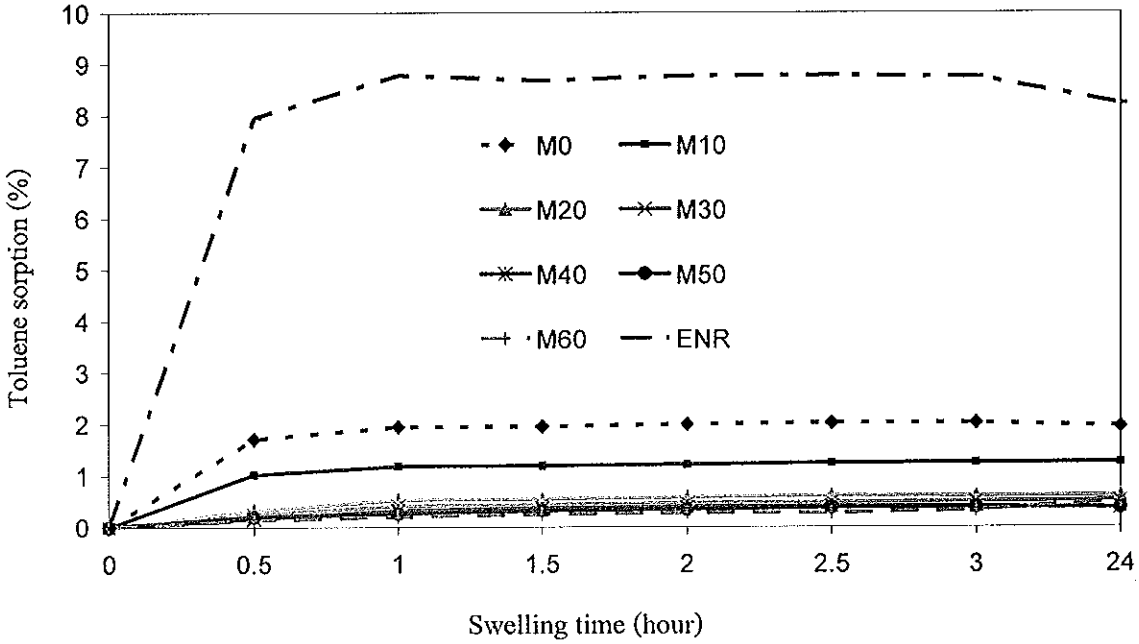
การดูดซับและการคายออกของโทลูอีนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังเชื่อมขวาง แสดงดังรูปที่ 4.66-4.69 เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังเชื่อมขวางพบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังเชื่อมขวางมีแนวโน้มการดูดซับของโทลูอีนที่ลดลง และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังเชื่อมขวางที่ปริมาณกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับของโทลูอีนลดลงเช่นกัน โดยปริมาณการดูดซับโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังเชื่อมขวางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาการดูดซับ 1 ชั่วโมงหลังจากนั้นปริมาณการดูดซับจึงค่อยๆคงที่ สำหรับการทดสอบการคายออกโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดังรูปที่ 4.67 และ 4.69 ก่อนและหลังเชื่อมขวาง พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการคายออกอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาการคายออก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ คงที่โดยสูตรยาง ENR และสูตรพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางจะเห็นว่าค่าการคายออกมีค่าเป็นลบเนื่องจากมีส่วนของยาง ENR ที่ละลายออกไป แต่เมื่อใช้กรดมาลีอิคเชื่อมขวางในปริมาณ 10-60% พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีส่วนที่ละลายออกลดลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความทนทานต่อโทลูอีนมากขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น



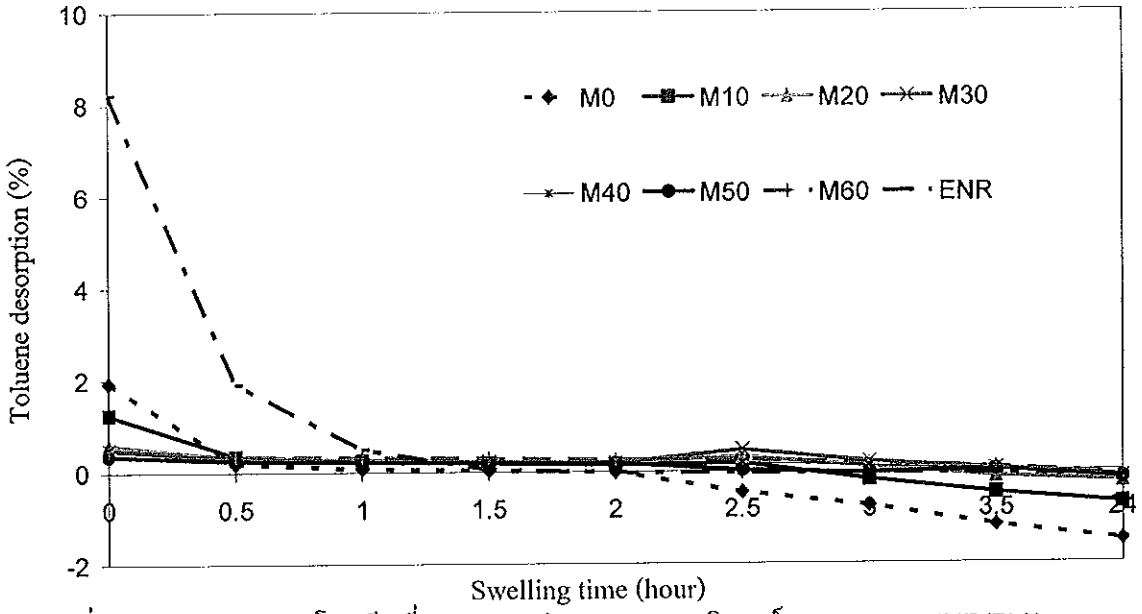
รูปที่ 4.66 การดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม Uncured ENR/PVA



รูปที่ 4.67 การคายออกโทลูอีนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม Uncured ENR/PVA

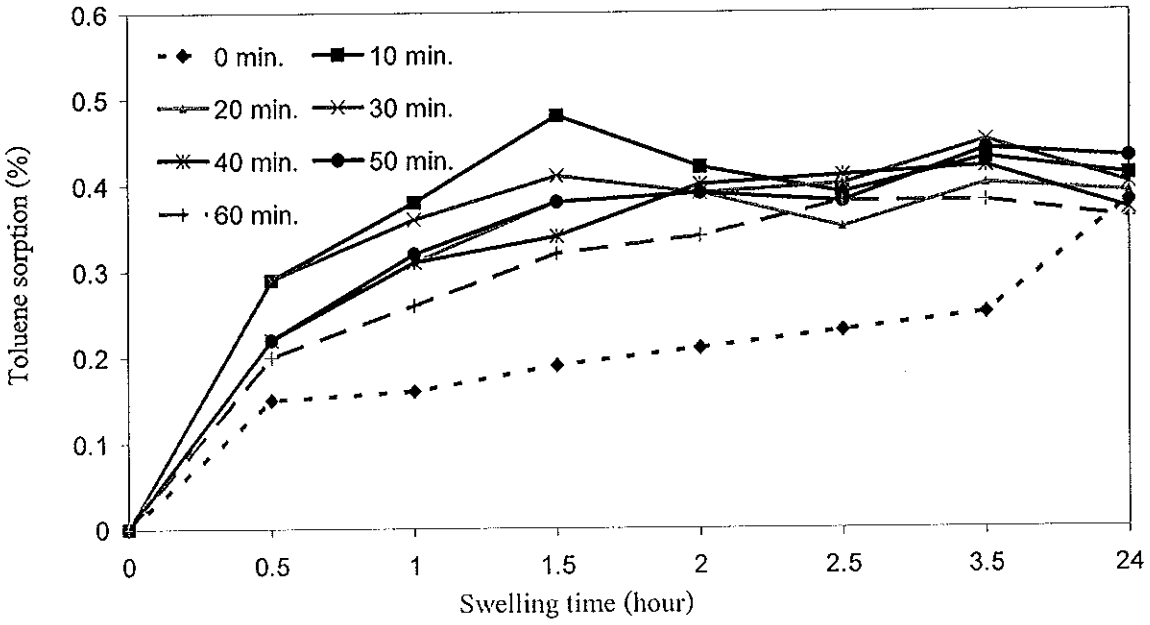


รูปที่ 4.68 การดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA

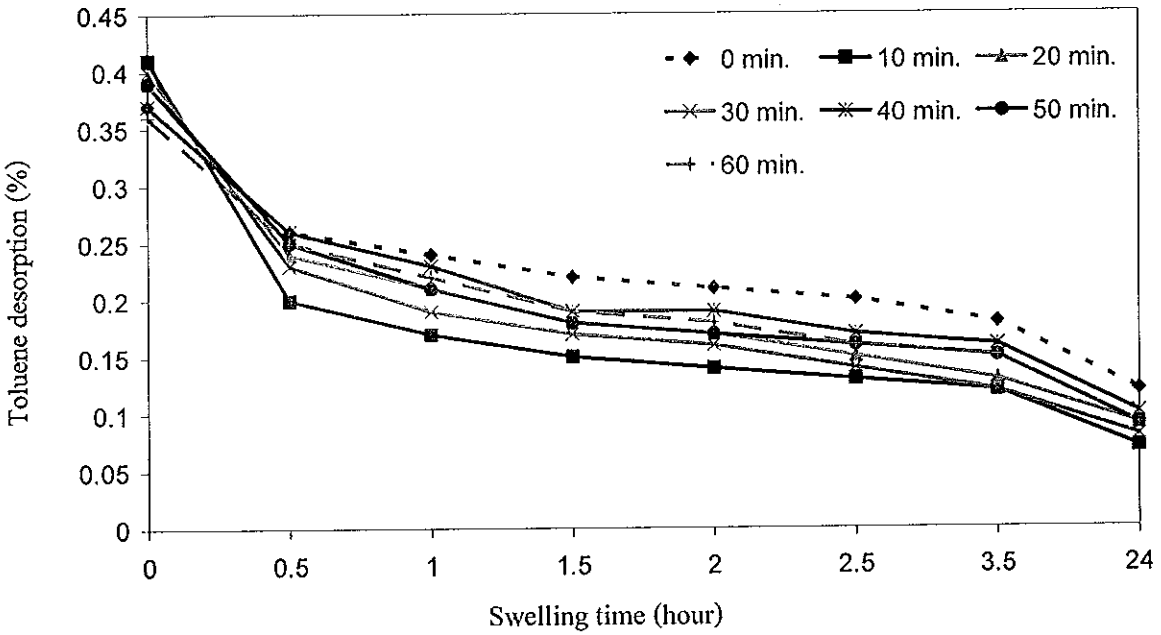


รูปที่ 4.69 การคายออกโทลูอีนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA

การดูดซับและการคายออกของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ระยะเวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.70 และ 4.71 พบว่าการดูดซับของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการดูดซับของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น

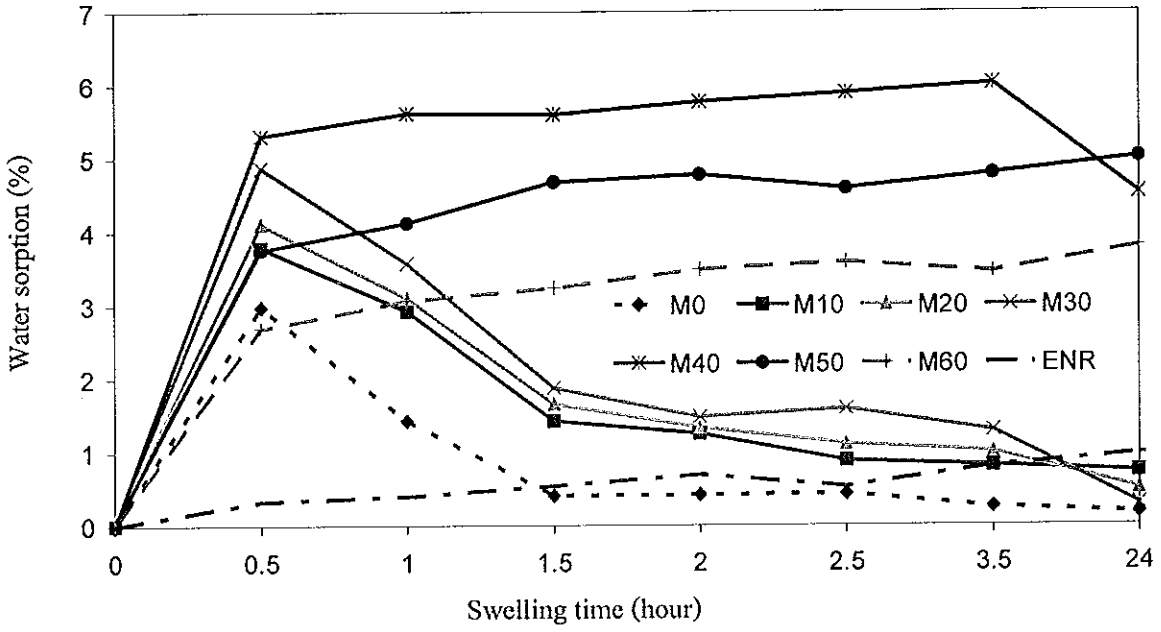


รูปที่ 4.70 การดูดซับโทลูอีนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA ที่ระยะเวลาการเชื่อมขวางต่างๆ

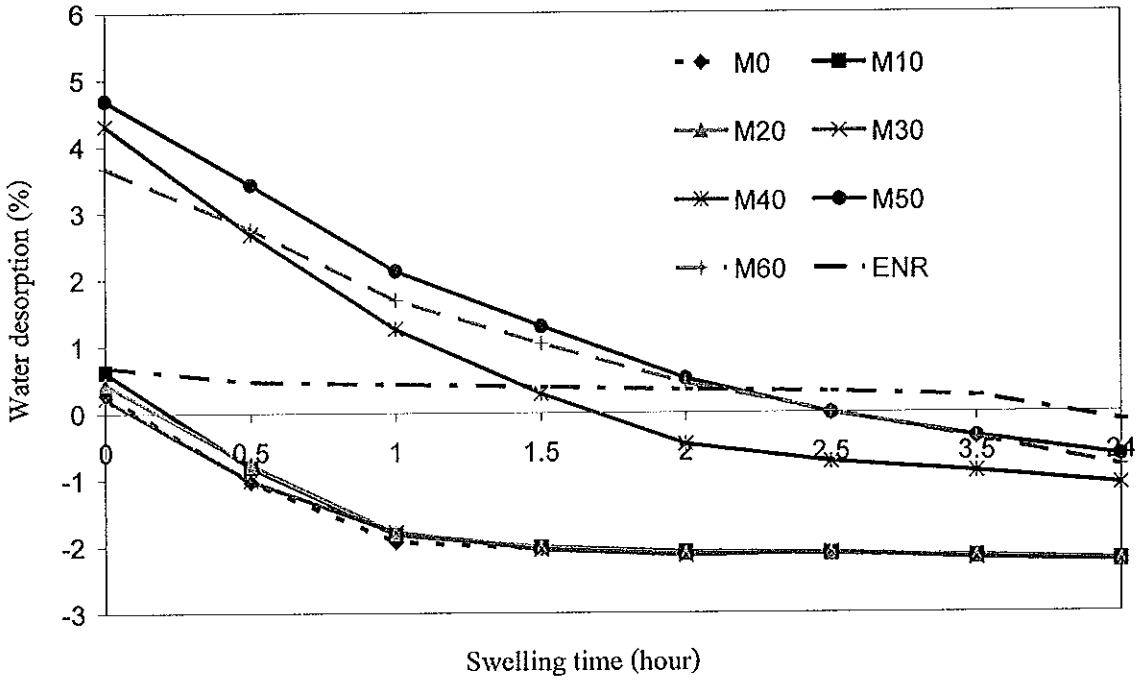


รูปที่ 4.71 การคายออกโทลูอีนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA ที่ระยะเวลาการเชื่อมขวางต่าง ๆ

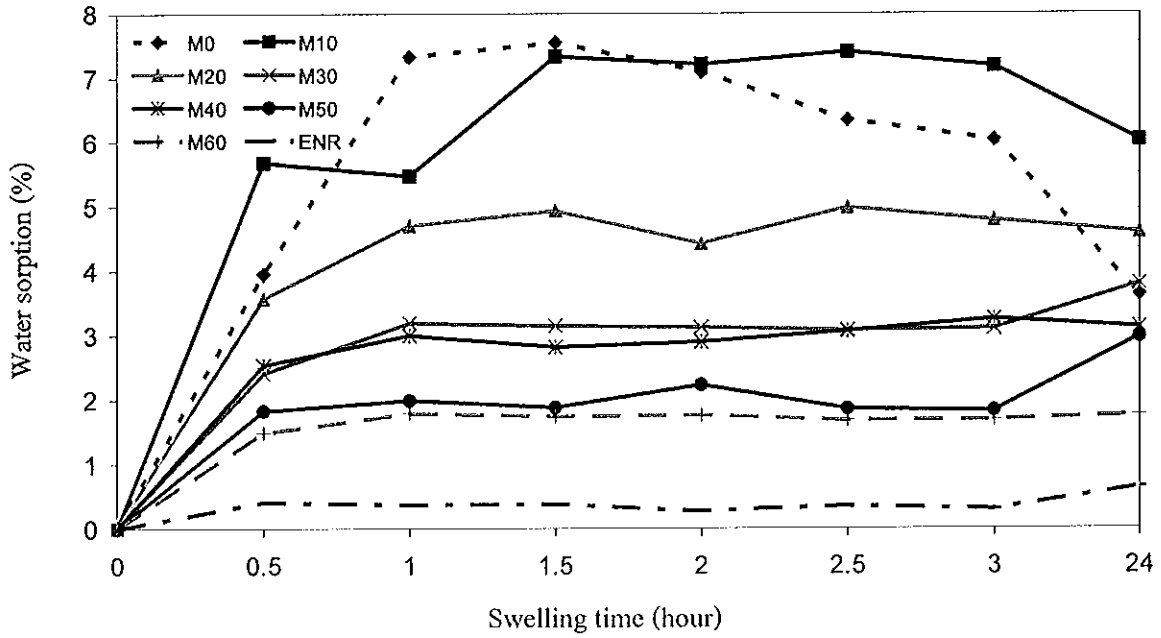
การดูดซับและการคายออกของน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังเชื่อมขวาง แดงดังรูปที่ 4.72-4.75 โดยพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-30 มีแนวโน้มการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (1/2 ชั่วโมง) และหลังจากนั้นที่ระยะเวลาการดูดซับ 1 ชั่วโมงค่าการดูดซับน้ำมีค่าลดลงเนื่องจากมีส่วนของ PVA ละลายออกไปแต่หลังจากเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางเป็น 40-60% ค่าการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยไม่มีการลดลง สำหรับการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการเชื่อมขวางที่ปริมาณกรดมาลีอิคที่ใช้เพิ่มขึ้นพบว่าการดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการคายออกของโทลูอีนก่อนและหลังเชื่อมขวาง พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าการคายออกของน้ำที่ติดลบแสดงว่ามีส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ละลายออกไป แต่หลังจากเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิคพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีส่วนที่ละลายลดลงเมื่อปริมาณกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้น



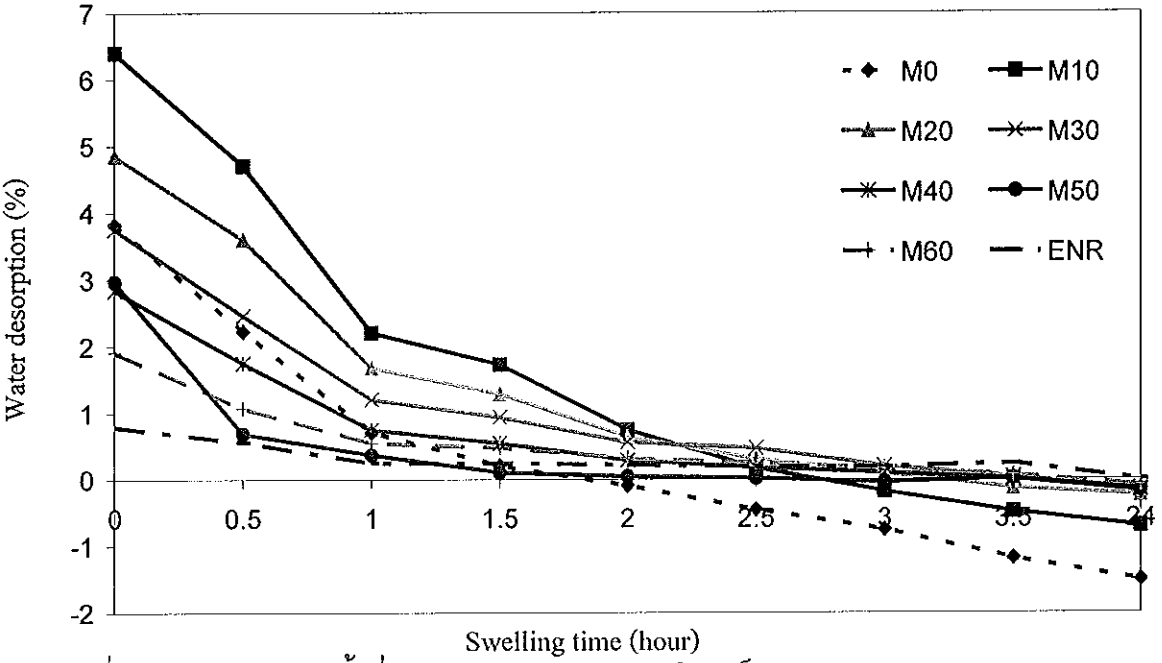
รูปที่ 4.72 การดูดซับน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม Uncured ENR/PVA



รูปที่ 4.73 การคายออกน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม Uncured ENR/PVA



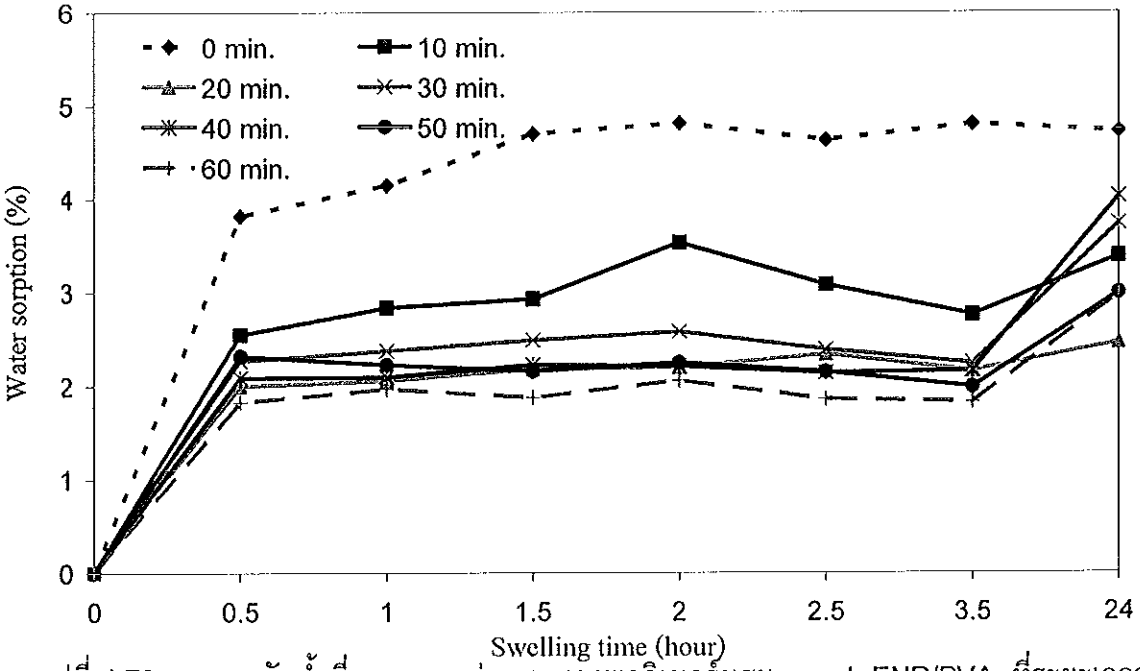
รูปที่ 4.74 การดูดซับน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA



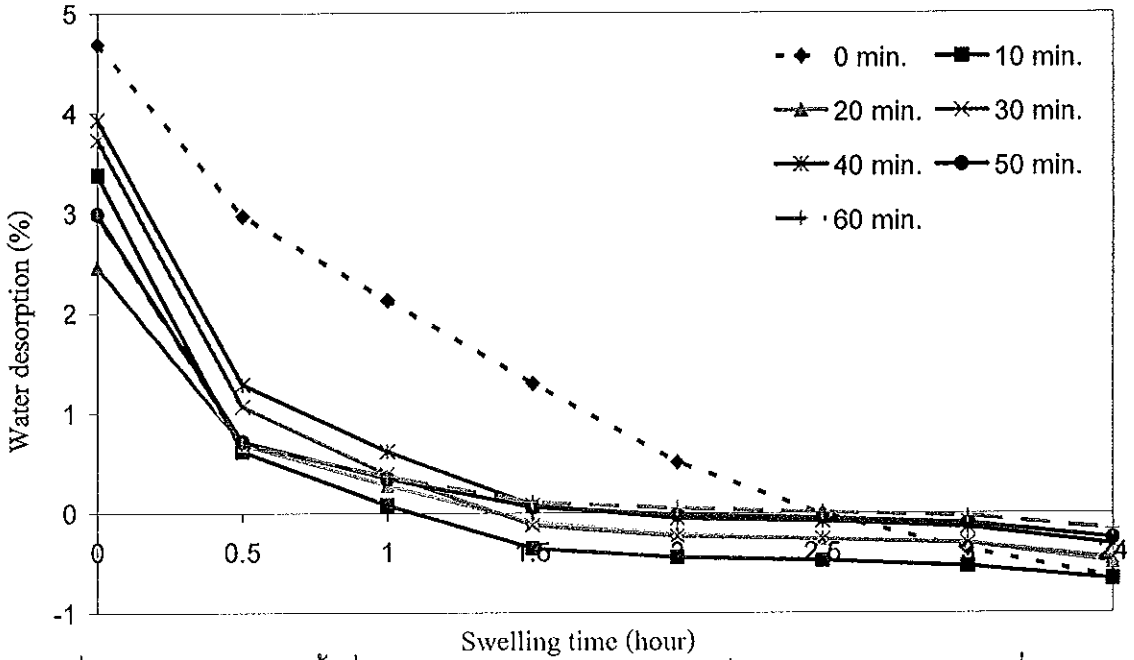
รูปที่ 4.75 การคายออกน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA

จากรูปที่ 4.76 และ 4.77 การดูดซับและการคายออกน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่าเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าการดูดซับน้ำที่ลดลงเนื่องจากการเชื่อมขวางของ PVA กับกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการ

เชื่อมขวางเพิ่มขึ้น สำหรับการคายออกของน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าเป็นลบเมื่อระยะเวลาการคายออกเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ละลายออกไป แต่เมื่อระยะเวลาการคายออกเพิ่มขึ้นพอลิเมอร์มีค่าติดลบลดลงคือการมีส่วนที่ละลายลดลง



รูปที่ 4.76 การดูดซับน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA ที่ระยะเวลาการเชื่อมขวางต่าง ๆ



รูปที่ 4.77 การคายออกน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสม cured ENR/PVA ที่ระยะเวลาการเชื่อมขวางต่าง ๆ

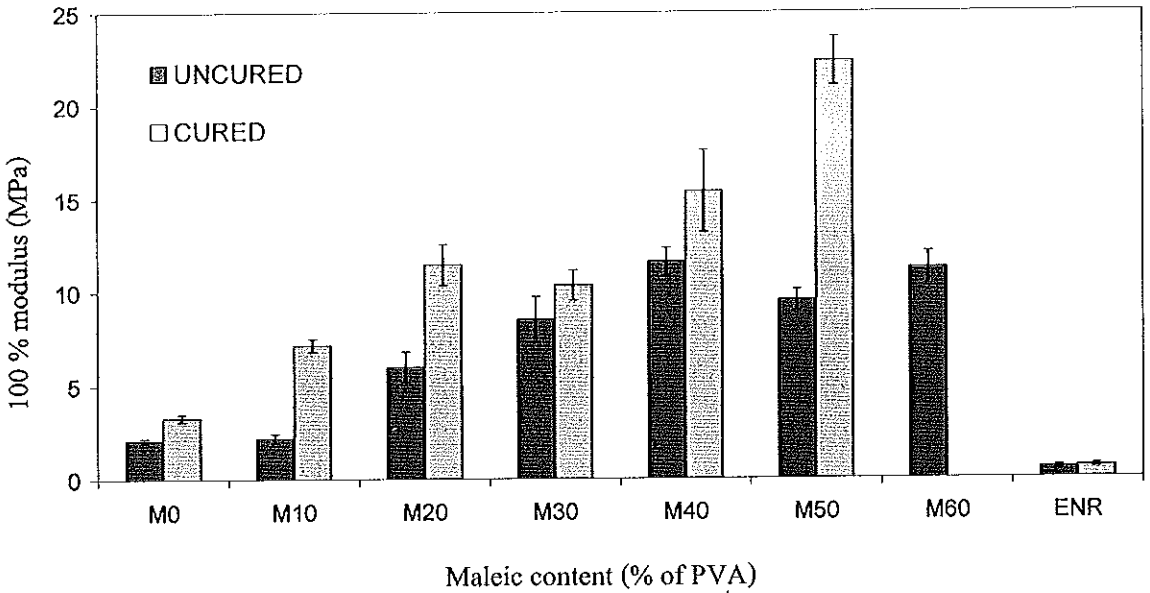
4.2.4 ศึกษาการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน เพราะโดยทั่วไปเราไม่สามารถทำนายสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ได้โดยอาศัยความรู้จากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีได้อย่างแม่นยำ เช่น การคำนวณความแข็งแรงโดยอาศัยความรู้พื้นฐานจากความแข็งแรงของพันธะ และแรงระหว่างโมเลกุล เพราะฉะนั้นการทดสอบสมบัติเชิงกลจึงเป็นวิธีการที่ดีที่จะศึกษาถึงสมบัติและความเป็นไปได้ในการนำเอาพอลิเมอร์ผสมไปใช้งาน

4.2.4.1 100 % มอดุลัส

ทำการทดสอบค่า 100 % มอดุลัส ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ด้วยเครื่องเทนโซมิเตอร์ ที่อัตราดึง 500 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.78

การทดสอบค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.78 เมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการเชื่อมขวาง พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% เพิ่มขึ้นภายหลังการเชื่อมขวาง และการใช้ปริมาณกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% จะเพิ่มขึ้นมากที่สุดจนถึงปริมาณการใช้กรดมาลีอิค 50% หลังจากนั้นที่ปริมาณการใช้กรดมาลีอิค 50% ไม่สามารถหาค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ได้เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ขาดก่อนที่จะถึงระยะยืด 100% สำหรับการใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางในปริมาณมากขึ้นจึงทำให้ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% เพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.49

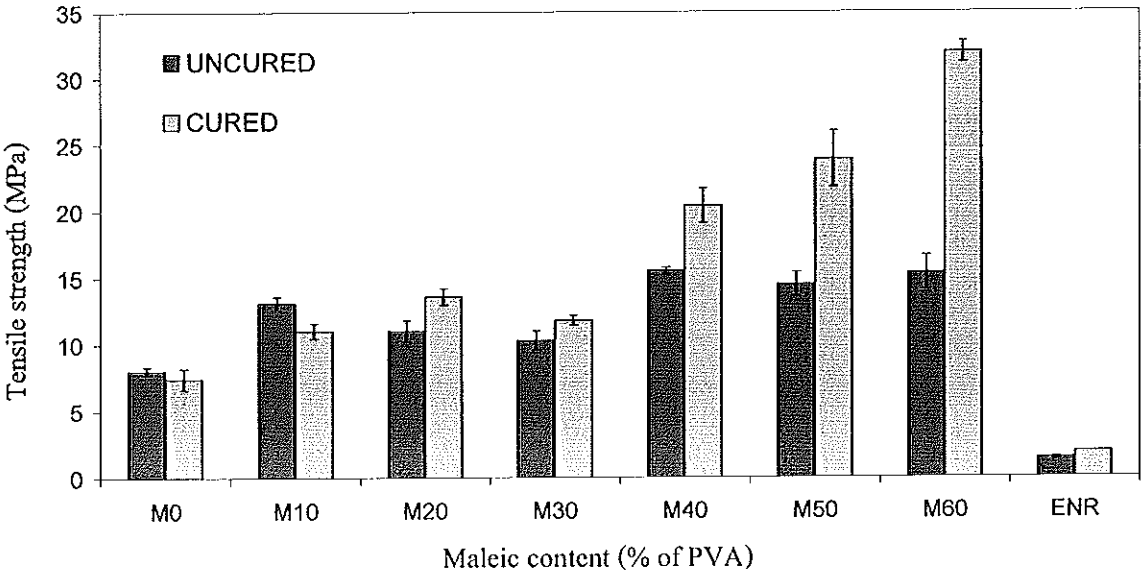


รูปที่ 4.78 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่าง ๆ ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง

4.2.4.2 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

ทำการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ด้วยเครื่องเทนโซมิเตอร์ ที่อัตราดึง 500 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.79

จากการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงดังรูปที่ 4.79 พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นภายหลังการเชื่อมขวาง และการใช้ปริมาณกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง เพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นลักษณะแนวโน้มเดียวกันกับค่าระยะยืดที่ 100% โดยพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ใช้ปริมาณกรดมาลีอิค 60% หลังจากเชื่อมขวางแล้วมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงถึง 32 MPa ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการบวมตัว และยืนยันได้ด้วยปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.49



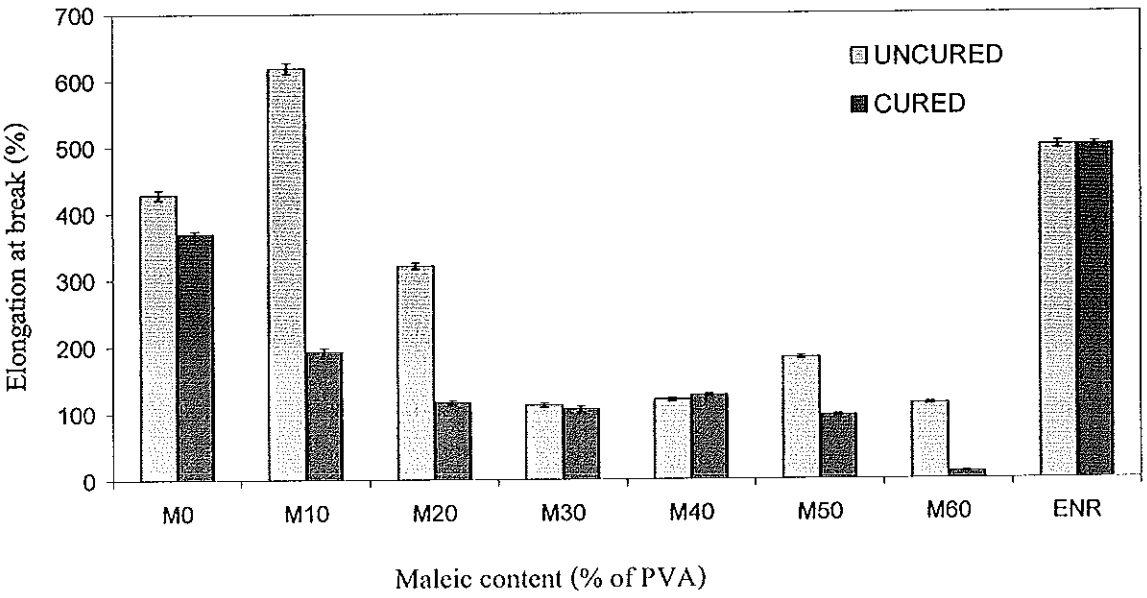
รูปที่ 4.79 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆ ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง

4.2.4.3 สมบัติด้านความสามารถในการยืด

ทำการทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง ด้วยเครื่องเทนโซมิเตอร์ ที่อัตราดึง 500 มิลลิเมตรต่อวินาที วิธีการทดสอบดังในหัวข้อที่ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.80

จากรูปที่ 4.80 พบว่าค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังจากการเชื่อมขวางมีค่าลดลง และปริมาณกรดมาลีอิคมากขึ้นก็ทำให้ค่าความสามารถในการยืดพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับค่า 100% มอดุลัสและค่า

ความต้านทานต่อแรงดึง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค (Gohil *et al.*, 2006) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.80 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่าง ๆ ก่อนและหลังการเชื่อมขวาง

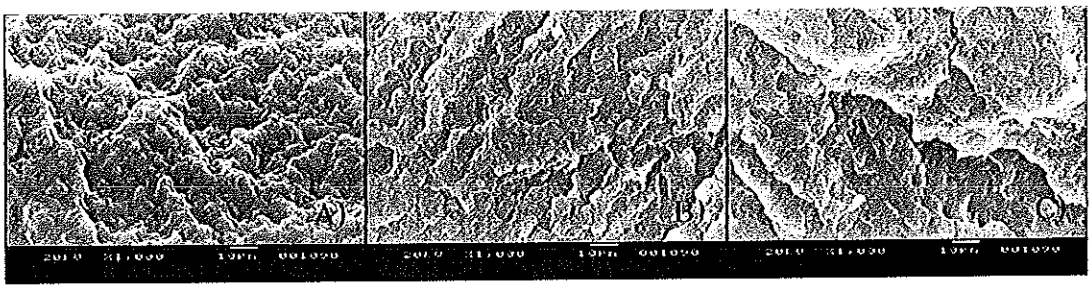
4.2.5 ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA เพื่อเป็นการตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด โดยในงานวิจัยครั้งนี้มีเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA อยู่ 3 วิธีคือ 1) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM 2) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย AFM และ 3) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM โดยมีผลการทดลองจากเทคนิคต่างๆดังต่อไปนี้

4.2.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM

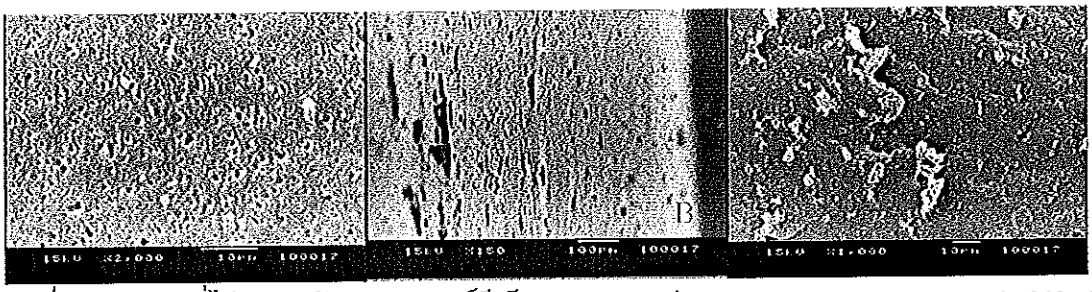
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA โดยแปรปริมาณกรด มาลีอิคที่ใช้เป็น 0 20 และ 40% ทำการทดสอบเปรียบเทียบผล ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีน (ชิ้นตัวอย่างหลังจากการทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีนมาอบแห้งก่อนนำมาตรวจดูลักษณะทางสัณฐานวิทยา) โดยใช้เครื่อง JSM JEOL 2000 ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นตัวอย่างมาทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจน พื้นผิวที่ผ่านการทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจนแล้วมาทำการเคลือบด้วยทองก่อนที่จะนำมาทดสอบ

จากรูปที่ 4.81 เป็นภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ของ ENR/PVA โดยแปรปริมาณกรด มาลีอิคที่ใช้เป็น 0 20 และ 40% ของ PVA โดยเชื่อมขวางที่ 120 ° C เป็นเวลา60 นาที ที่กำลังขยาย 1000 พบว่า ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันหรือเป็นเฟสที่ต่อเนื่องกันไม่มีการแยกเฟส การใช้ปริมาณของมาลีอิคเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ความขรุขระเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกัน ซึ่งความขรุขระที่เพิ่มมากขึ้นนี้ เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเชื่อมโยงของ PVAโดยมาลีอิค (Gohil *et al.*, 2002) โดยจากรูปการเชื่อมขวางของ PVA ที่เกิดขึ้นจะมีการแจกแจง และกระจายอย่างสม่ำเสมอในเฟสของ ENR ซึ่ง PVA ที่เกิดการเชื่อมโยงจะสังเกตได้จากลักษณะที่นูนขึ้นจากภาพที่ได้



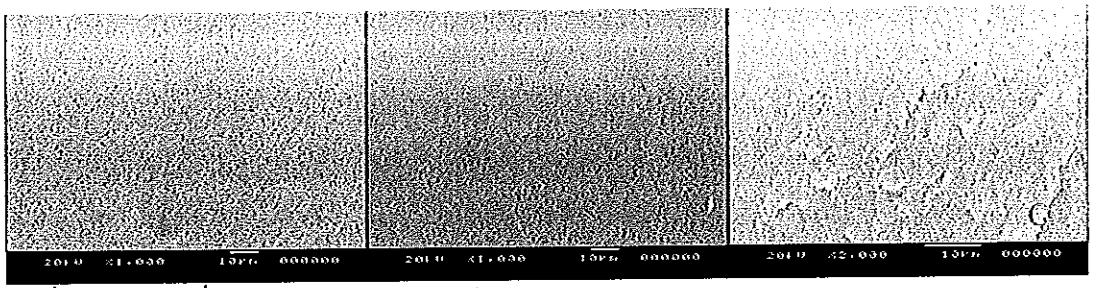
รูปที่ 4.81 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของ ENR/PVA A) M0 B) M20 C) M40 เชื่อมขวางที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

รูปที่ 4.82 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากเครื่อง SEM ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% หลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ พบว่า พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีการใช้กรดมาลีอิคจะเห็นว่ามีลักษณะทางสัณฐานวิทยาขรุขระเป็นหลุมๆกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งน่าจะเป็นส่วนของ PVA ที่ถูกสกัดออกไปหลังจากการทดสอบการบวมตัวในน้ำ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีลักษณะแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวในระดับโมเลกุล (immiscible blend) โดยมีเฟสของ ENR ที่เป็นเฟสต่อเนื่อง และมีเฟสของ PVA กระจายอย่างสม่ำเสมอในเฟสของยางธรรมชาติ แต่หลังจากที่มีการเพิ่มปริมาณกรดมาลีอิคเป็น 20 และ 40% พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีลักษณะที่สามารถผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวได้บางส่วนในระดับโมเลกุล (partially miscible blend) ซึ่งสามารถมองเห็นเป็นวัฏภาคเดียวกัน



รูปที่ 4.82 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของ ENR/PVA A) M0 B) M20 C) M40 เชื่อมขวางที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที หลังทดสอบการบวมตัวในน้ำ ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

รูปที่ 4.83 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากเครื่อง SEM ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% หลังการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน พบว่า พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีการใช้กรดมาลีอิคจะเห็นว่ามีลักษณะทางสัณฐานวิทยาขรุขระเป็นหลุมๆกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งน่าจะเป็นส่วนของ ENR ที่ถูกสกัดออกไปด้วยโทลูอีน แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีลักษณะแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวในระดับโมเลกุล (immiscible blend) หลังจากที่มีการเพิ่มปริมาณกรดมาลีอิคเป็น 20 จะยังมีบางส่วนของ ENR ที่ถูกสกัดออกไปด้วยโทลูอีน แต่ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีลักษณะที่สามารถผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวได้บางส่วนในระดับโมเลกุล (partially miscible blend) ซึ่งสามารถมองเห็นเป็นวัฏภาคเดียวกัน เนื่องมาจากการเชื่อมขวางของ PVA ด้วยกรดมาลีอิคทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดเป็น semi-IPN ดังแผนภาพในรูปที่ 4.50



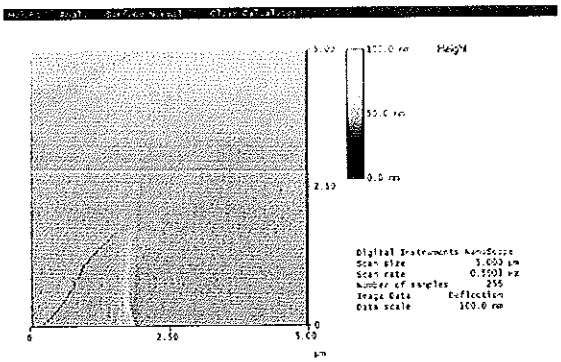
รูปที่ 4.83 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของ ENR/PVA A) M0 B) M20 C) M40 เชื่อมขวางที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย AFM

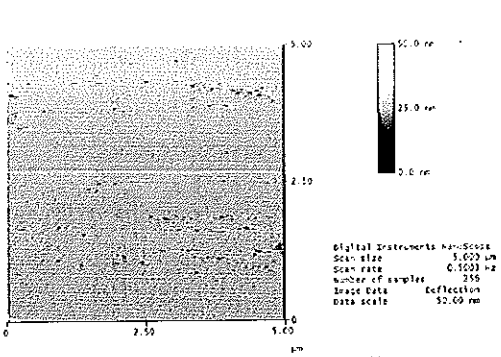
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA โดยแปรปริมาณกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 0 และ 40% ทำการทดสอบเปรียบเทียบผล ก่อนและหลังการ

ทดสอบการบวมตัวในน้ำ ทำการทดสอบด้วยเครื่อง AFM โหมดที่ใช้ในการทดสอบมี 2 โหมดคือ ทดสอบแบบ deflection และทดสอบแบบ height และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่พื้นผิว (edge) กับภายในตัวอย่าง (middle)

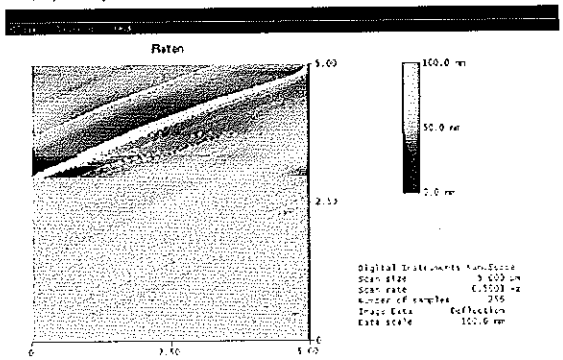
จากรูปที่ 4.84 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M0 จากเครื่อง AFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M0 การทดสอบแบบ deflection ของตรงกลางและขอบตัวอย่างก่อนทดสอบบวมตัวในน้ำที่เหมือนกันกล่าวคือแรงในแต่ละตำแหน่งของพื้นผิวของตัวอย่างแต่ละตำแหน่งมีค่าแรงใกล้เคียงกันไม่แตกต่างต่างกันมากแต่หลังจากทดสอบการบวมตัวในน้ำจะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมมีการสะท้อนของแรงในแต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกันเนื่องจากมีบางส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ละลายออกไปนั่นเอง



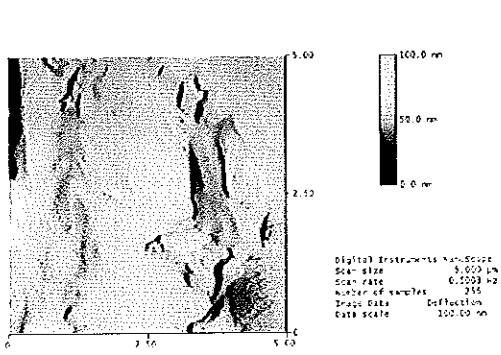
ENR-PVA-edge-before swell



ENR-PVA-middle-before swell



ENR-PVA-edge-after swell

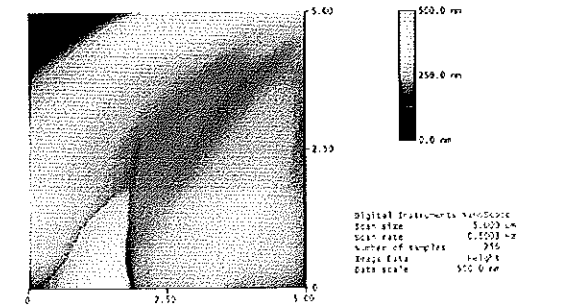


ENR-PVA-middle-after swell

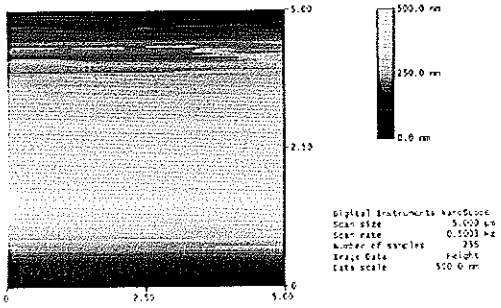
รูปที่ 4.84 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M0 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

จากรูปที่ 4.85 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M0 จากเครื่อง AFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ การทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีระดับความสูงของแต่ละตำแหน่ง

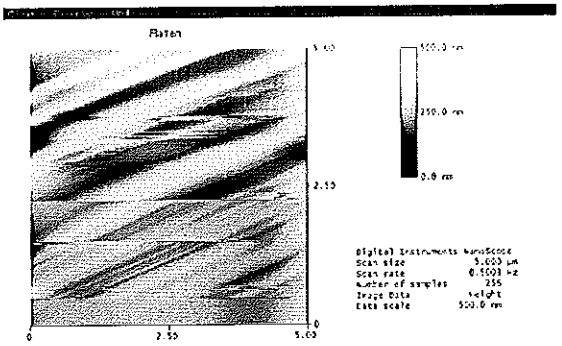
บนชิ้นงาน (height) ขอบตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบบวมตัวในน้ำที่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบตรงกลางและขอบของชิ้นตัวอย่างเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำพบว่าชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีกรดมาลีอิคก่อนและหลังการละลายน้ำจะเห็นว่ามีความสูงที่แตกต่างกันมาก โดยเฉพาะตรงกลางของชิ้นตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำจะเห็นได้ว่าชิ้นตัวอย่างมีความสูงแตกต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่ามีส่วนที่ละลายออกไปมากซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแบบ deflection



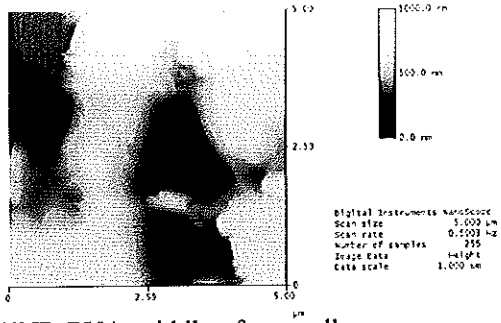
ENR-PVA-edge-before swell



ENR-PVA-middle-before swell



ENR-PVA-edge-after swell

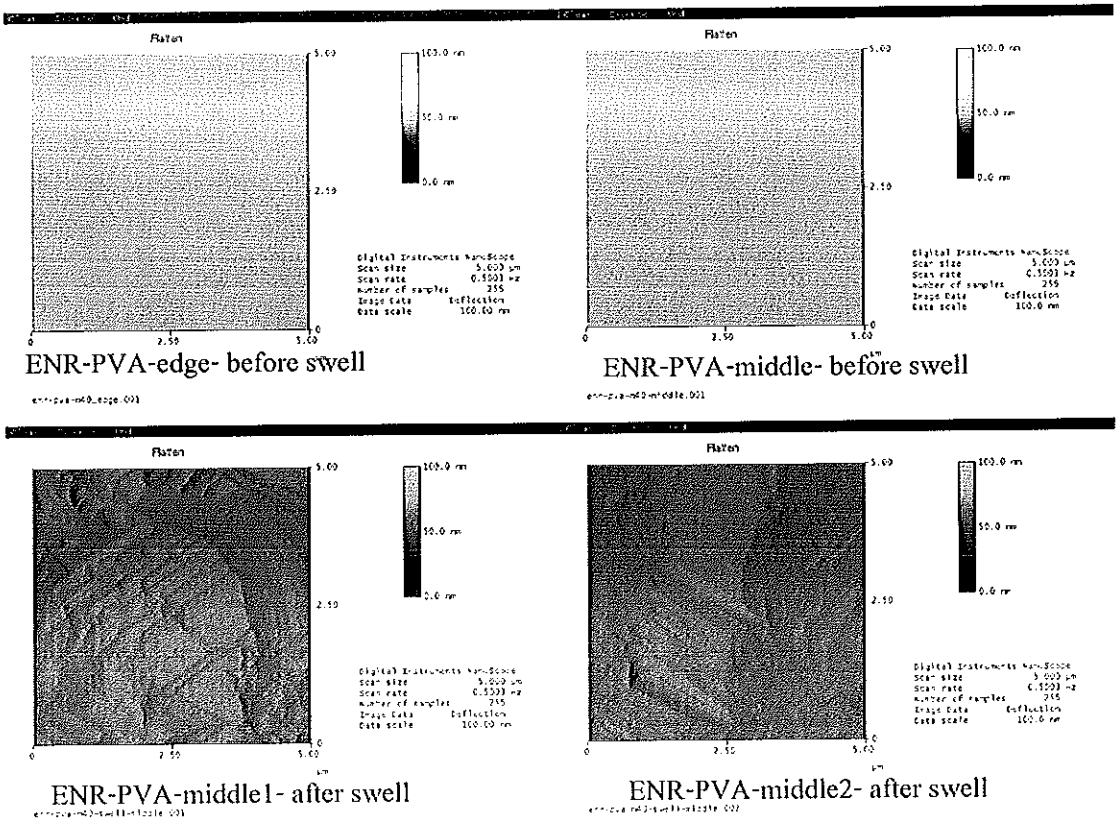


ENR-PVA-middle-after swell

รูปที่ 4.85 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M0 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

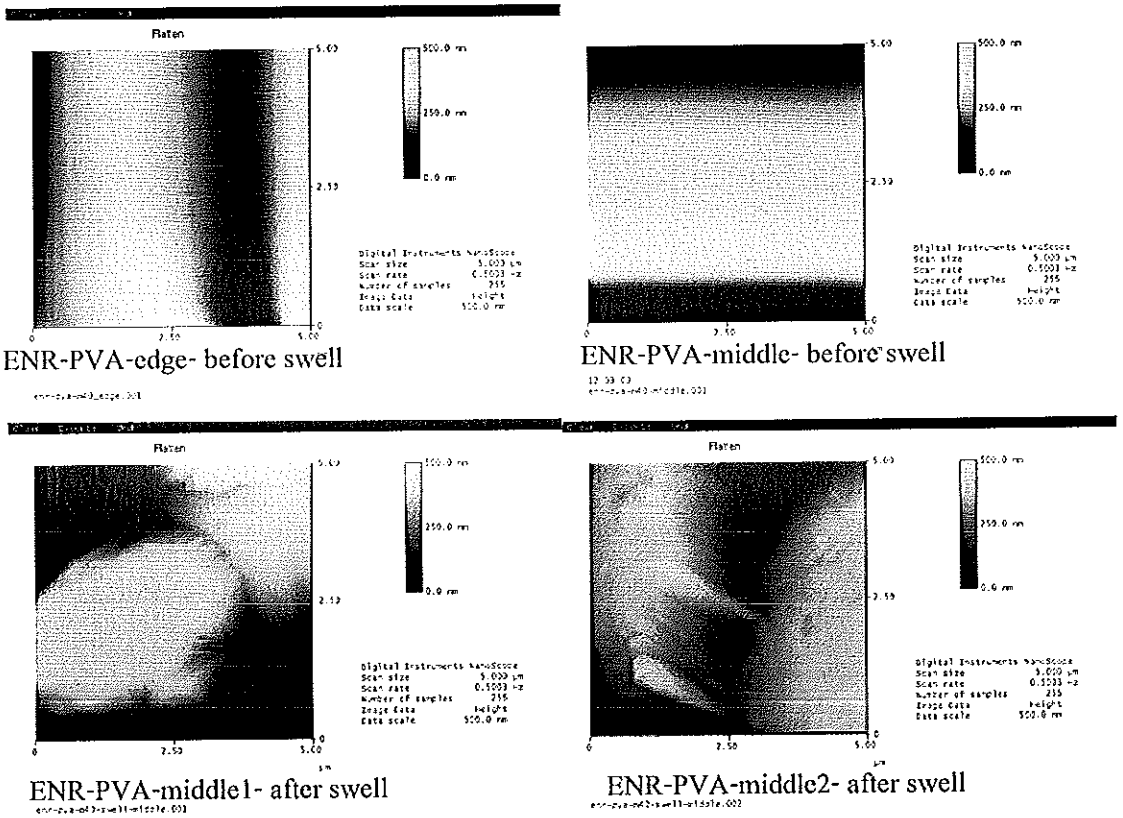
จากรูปที่ 4.86 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M0 การทดสอบแบบ deflection ของตรงกลางและขอบตัวอย่างก่อนทดสอบบวมตัวในน้ำที่เหมือนกันกล่าวคือผลจากการทดสอบเป็นการบ่งบอกแรงในแต่ละตำแหน่งของพื้นผิวของตัวอย่างโดยแต่ละตำแหน่งมีค่าแรงใกล้เคียงกันไม่แตกต่างต่างกันมากแต่หลังจากทดสอบการบวมตัวในน้ำจะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมมีการสะท้อนของแรงในแต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกัน เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีส่วนของยาง ENR และส่วนของ PVA ที่มีความแข็งแรง

แตกต่างกัน โดยส่วนของ PVA ที่มีความแข็งแรงมากกว่าจะแสดงลักษณะสีที่อ่อนกว่าและยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีการผสมเข้ากันได้ดีโดยสังเกตจากลักษณะสีที่มีการกระจายสูงต่ำอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.86 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

จากรูปที่ 4.87 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ การทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีระดับความสูงของแต่ละตำแหน่งบนชิ้นงาน (height) ขอบตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบบวมตัวในน้ำที่แตกต่างกัน กล่าวคือระดับความสูงของแต่ละตำแหน่งบนชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบตรงกลางและขอบของชิ้นตัวอย่างเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำพบว่าชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังการละลายน้ำจะเห็นว่ามีความสูงที่แตกต่างกันมาก โดยเฉพาะตรงกลางของชิ้นตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำจะเห็นได้ว่าชิ้นตัวอย่างมีความสูงแตกต่างกันและมีลักษณะคล้ายกลุ่มก้อนสีขาวซึ่งแสดงถึงส่วนของ PVA ที่ถูกเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิค



รูปที่ 4.87 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

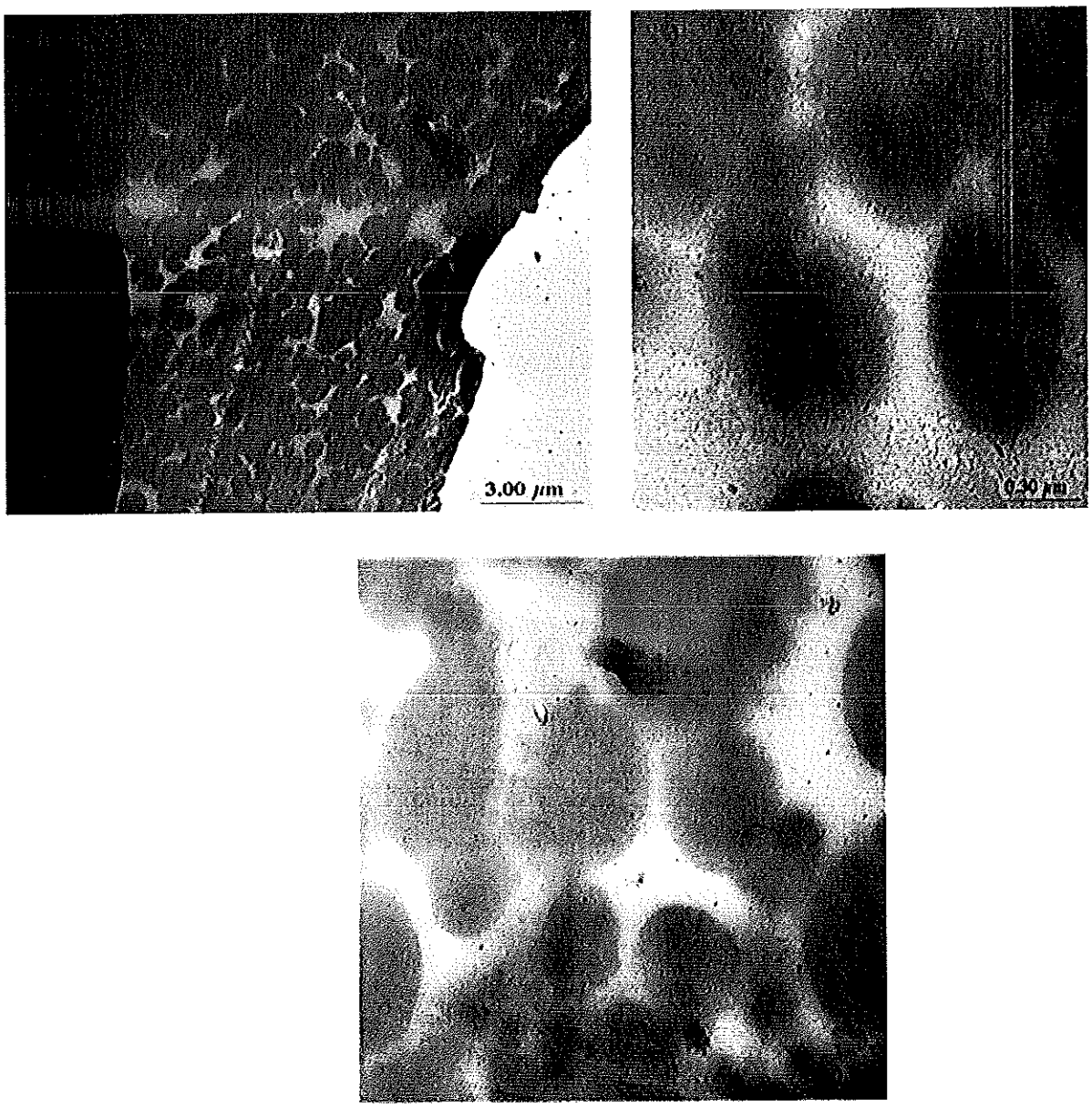
จากตารางที่ 4.8 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ พบว่า พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% มีค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างในระดับต่ำ แต่พบว่าค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับภายในตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น และหลังจากการทดสอบการบวมตัวในน้ำพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% มีค่าแรงยึดติดเพิ่มขึ้นเนื่องจากส่วนที่ชอบน้ำคือพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อยู่ภายในภายหลังการทดสอบการบวมตัวมีการออกมาอยู่บริเวณผิวตัวอย่างมากขึ้น

ตารางที่ 4.8 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ

Sample	Adhesion force (N.m)			
	EDGE		MIDDLE	
	Before swelling	After swelling	Before swelling	After swelling
ENR/PVA M0	6.11	4.38	166.22	168
ENR/PVA M40	0.19	1.61	36.41	117.88

4.2.5.3 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย TEM

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40 แสดงดังรูปที่ 4.88 ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ผสมจะปรากฏคล้าย ๆ จุดสีดำซึ่งแสดงถึงส่วนของอนุภาคยางและมีส่วนของสีขาว ๆ เข้าไปในจุดสีดำแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการผสมเข้าถึงระดับโมเลกุลโดยอนุภาคของ PVA สามารถเข้าไปภายในอนุภาคของยาง ENR ได้บางส่วน



รูปที่ 4.88 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จากเทคนิค TEM ที่กำลังขยายต่าง ๆ

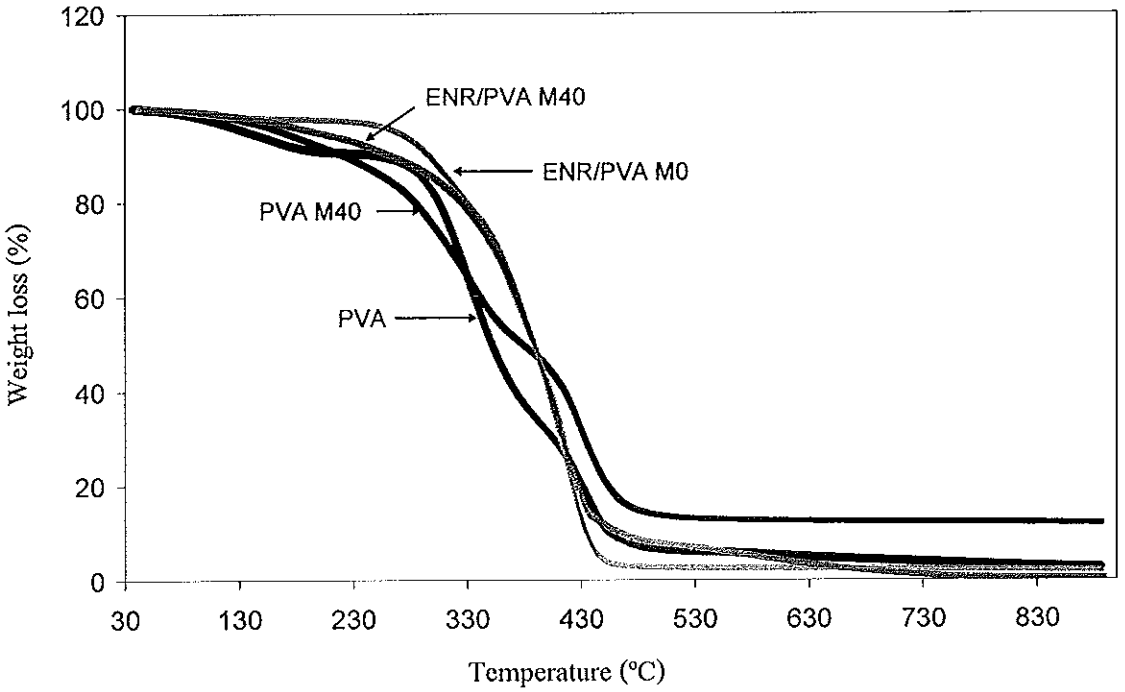
4.2.6 ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA เพื่อตรวจดูความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ในงานวิจัยครั้งนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 เทคนิคคือ 1) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA 2) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA และ3) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.2.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA

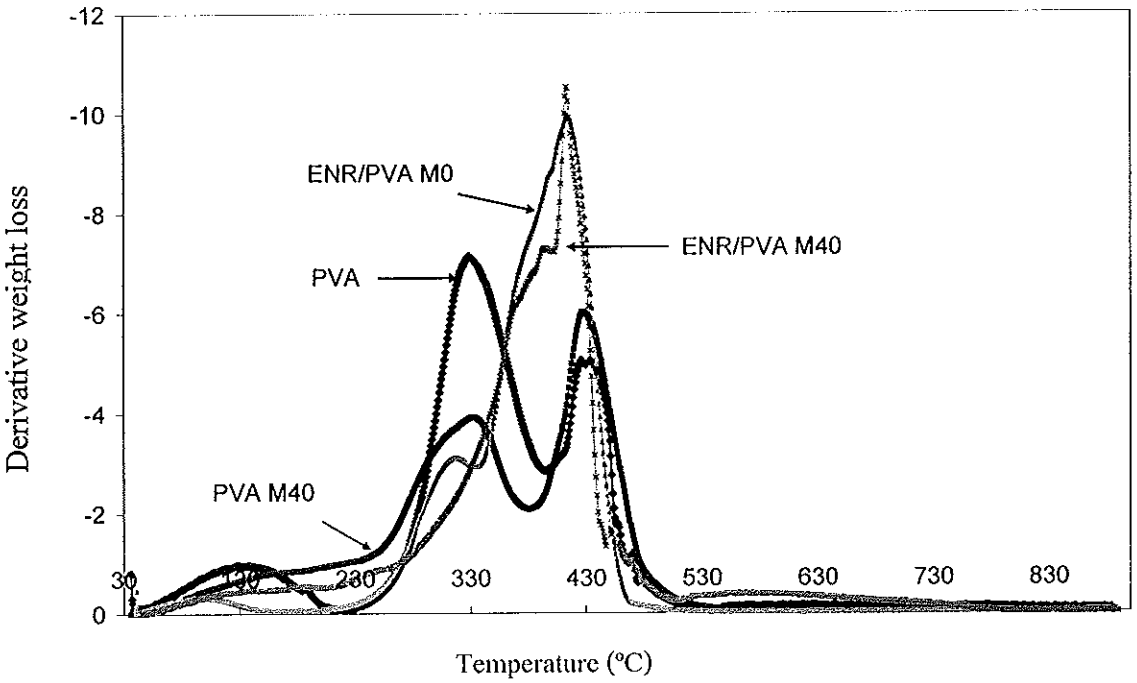
เทคนิคนี้เป็นการใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA โดยวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปจากการให้ความร้อนหรือจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA เกิดการสูญเสียน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากตัวอย่างของพอลิเมอร์เกิดการสูญเสียน้ำ (dehydration) การแตกออกของส่วนต่างๆ (decomposition) หรือออกซิเดชัน (oxidation) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบคือภายใต้บรรยากาศ ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 30 – 600 °C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600 – 800°C และอัตราการให้ความร้อนที่ใช้ในการทดสอบคือ 10°C/min

จากรูปที่ 4.89 เป็นการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40 และ PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40 พบว่า PVA ที่มีการเชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิคมีความเสถียรทางความร้อนดีที่สุด โดยอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการสลายตัวแบ่งออกเป็น 3 ช่วงซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักทั้งหมด การสูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 90 ถึง 120 °C ซึ่งเป็นการหลุดออกของน้ำ สำหรับการสูญเสียน้ำหนักในช่วงที่ 2 อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 300 ถึง 400 °C เป็นการหลุดออกของโซ่กิ่งของ PVA และสายโซ่หลักของยาง ENR การสูญเสียน้ำหนักในช่วงสุดท้ายอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 400 ถึง 550 °C ซึ่งเป็นการหลุดออกของสายโซ่หลักออก PVA และส่วนของโมเลกุลยาง ENR ที่เหลือ สำหรับพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีอุณหภูมิการสลายตัวแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จากการใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางสังเกตจากอุณหภูมิสูงสุดที่มีการสลายตัวหมด ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดที่มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางอยู่ 20 °C โดยอุณหภูมิการสลายตัวทั้ง 4 ช่วงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 อันได้แก่การสลายตัวในช่วงแรกที่อุณหภูมิระหว่าง 100 ถึง 130 °C เกิดขึ้นเนื่องจากการระเหยของไอน้ำ ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิระหว่าง 130 ถึง 180 °C เกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวของกรดมาลีอิคที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา (จุดหลอมเหลวของกรดมาลีอิคอยู่ในช่วง 130 ถึง 139 °C) (Riyajan *et al.*, 2009) ช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิระหว่าง 200 ถึง 450 °C และช่วงที่ 4 ที่อุณหภูมิระหว่าง 450 ถึง 550 °C เกิดขึ้นจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม semi-IPN เนื่องจากการสลายตัวโดยการออกซิไดซ์ด้วยความร้อน (themo oxidative)



รูปที่ 4.89 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40 และ PVA ที่ปริมาณเกรดมาลีอิค 0 และ 40

จากรูป 4.90 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการผสมเข้ากันได้ดี เนื่องจากช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักปริมาณมากพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA แสดงลักษณะเป็นพีคเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับ PVA M0 และ M40 จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ในระดับเดียวกัน นั่นเป็นการแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มีคุณสมบัติทางความร้อนเทียบเท่ากับ PVA นั่นเอง



รูปที่ 4.90 Derivative weight เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40 และ PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40

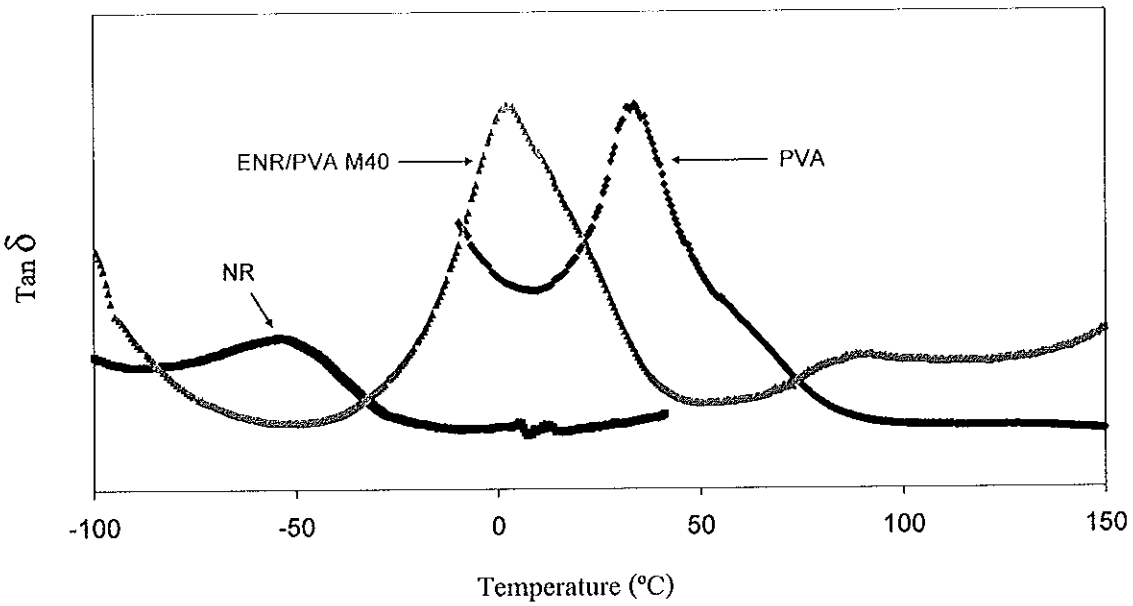
4.2.6.2 การวิเคราะห์ด้วย DMTA

การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.10 เป็นอีกเทคนิคที่สามารถตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA การศึกษาหาสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ ใช้การทดสอบแบบดึง (tension) ด้วยความถี่ 1 Hz เปอร์เซ็นต์การยืดถูกควบคุมไว้ที่ (strain control) 0.1% ช่วงอุณหภูมิการทดสอบ -100°C ถึง 250°C และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 2°C/min

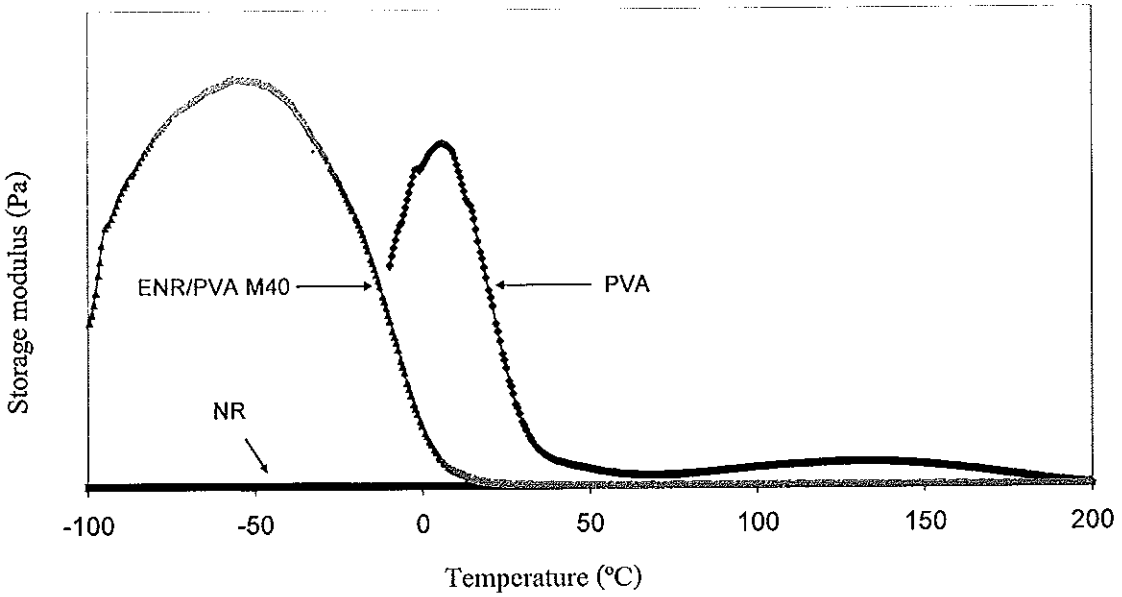
จากรูป 4.91 การเปรียบเทียบค่า Tan δ ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 NR และ PVA พบว่ายาง NR จะมี T_g ที่ประมาณ -60 °C PVA จะมี T_g ที่ประมาณ 35 °C ส่วนพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มี T_g ที่ประมาณ 0 °C เห็นได้ว่าสามารถผสมพอลิเมอร์ระหว่าง ENR กับ PVA เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 จะแสดง T_g เพียงค่าเดียวที่ประมาณ 0 °C

จากรูปที่ 4.92 ค่ามอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 NR และ PVA พบว่าค่ามอดุลัสสะสมของยาง NR มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ PVA แต่หลังจากทำเป็นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA โดยใช้ปริมาณกรดมาลีอิค 40% จะได้พอลิเมอร์ผสมที่มีค่ามอดุลัสสะสมมากกว่า PVA แสดงให้เห็นการผสมเข้ากันที่ดีเนื่องจากมีการเชื่อมขวางของ PVA กับกรด

มาลีอิค ตามปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.49 แต่ผลการทดลองนี้ถูกยืนยันด้วยเทคนิค DSC ตามหัวข้อ 4.2.6.3



รูปที่ 4.91 Tan δ กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 NR และ PVA

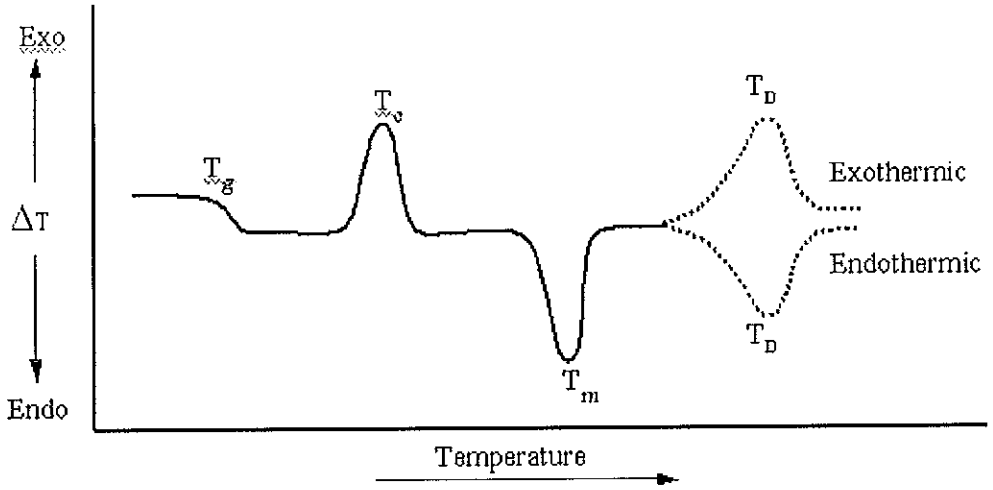


รูปที่ 4.92 มอดุลัสสะสมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 NR และ PVA

4.2.6.3 การวิเคราะห์ด้วย DSC

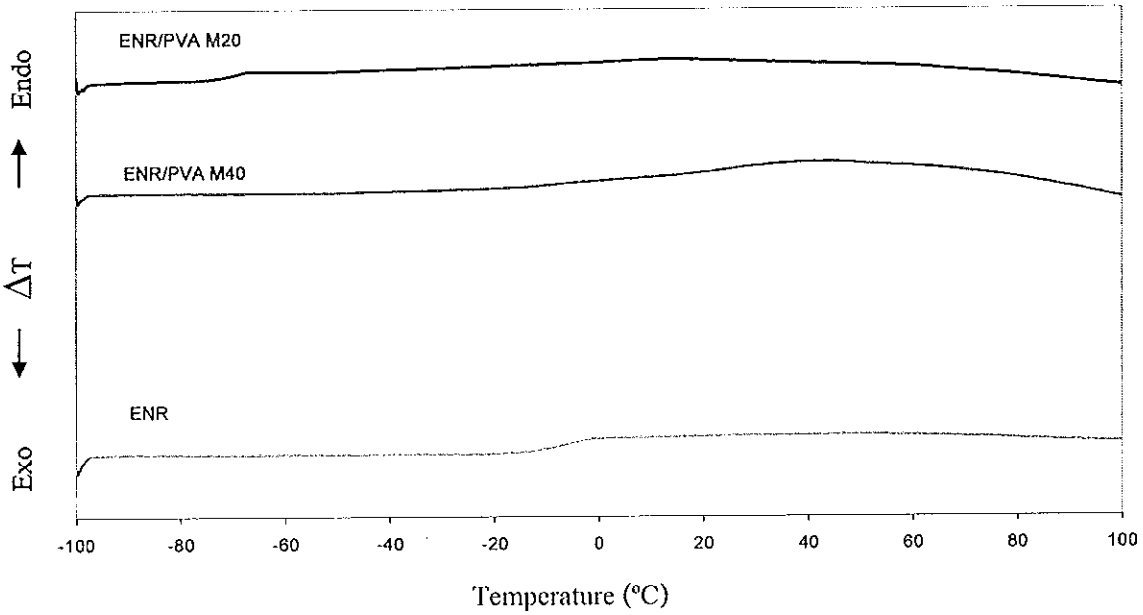
การทดสอบดังหัวข้อ 4.4.12 เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม สำหรับเทคนิค DSC สารตัวอย่าง และ สารอ้างอิงจะถูก

ให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานสองแหล่งที่แยกกัน ค่าพลังงานความร้อน ($d\Delta Q/dt$) ที่ใช้ในการรักษาอุณหภูมิของตัวอย่าง และ สารอ้างอิงให้เท่ากันจะถูกบันทึกไว้ ข้อมูลที่ถูกนำมาพลอตกราฟกับอุณหภูมิ คือ $d\Delta Q/dt$ กราฟที่ได้เรียกว่า เทอร์โมแกรม (thermogram) ข้อดีของเทคนิค DSC คือ พื้นที่ใต้พีคจะสัมพันธ์โดยตรงกับเอนทาลปี (enthalpy) หรือการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความจุความร้อน ความร้อนของการหลอมเหลว หรือเอนทาลปีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ตัวอย่างของเทอร์โมแกรมที่ได้จาก DSC แสดงดังรูปที่ 4.93



รูปที่ 4.93 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC
(http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_2.html, 2004)

จากรูปที่ 4.94 เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M20 และ M40 เปรียบเทียบกับ ENR เพื่อตรวจดูอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g)ของพอลิเมอร์ผสม พบว่า ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 20% แสดง T_g ที่ประมาณ -67 °C เปรียบเทียบกับ ENR ที่มี T_g ที่ประมาณ -8 °C แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M20 ยังคงแสดงสมบัติความเป็นยางอยู่ สำหรับพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ไม่อาจวิเคราะห์ค่า T_g จากเทคนิคนี้ได้ เนื่องจากไม่อาจเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่สามารถสังเกตได้ แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA ค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีค่าประมาณ 0 °C แสดงให้เห็นว่า ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% แสดงสมบัติเป็นพลาสติกมากกว่า ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 20%



รูปที่ 4.94 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M20 และ M40 เปรียบเทียบกับ ENR

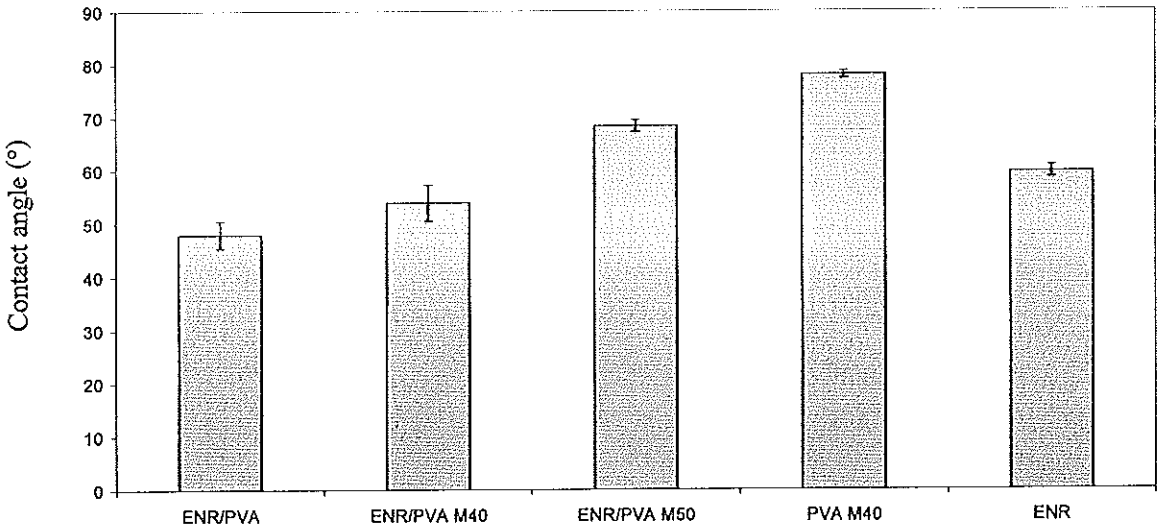
4.2.7 การวัดมุมสัมผัส

การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.13 ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.95

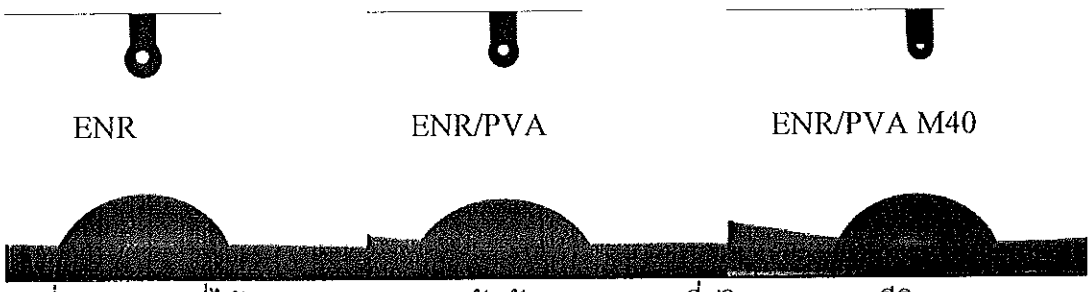
จากรูปที่ 4.95 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 ENR และPVA M40 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จะมีค่ามุมสัมผัสน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่น ๆ โดยค่ามุมสัมผัสน้อยเป็นการแสดงถึงชอบน้ำมาก ดังนั้นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จึงชอบน้ำมากกว่าสูตรอื่น ๆ สำหรับการเปรียบปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณกรดมาลีอิคเชื่อมขวางในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงเนื่องจากว่าปริมาณกรดมาลิอิคมากขึ้นทำให้การเชื่อมขวางระหว่าง PVA มีมากขึ้น ทำให้ปริมาณของหมู่ไดรอกซิลภายใน PVA ลดลง ความชอบน้ำจึงลดลง สำหรับ PVA จากรูปมีค่ามุมสัมผัสสูงนั่นเพราะ PVA มีการเชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิคปริมาณ 40 phr ทำให้ความชอบน้ำจึงลดลงเนื่องจากการเชื่อมโยงของกรดมาลีอิคจะทำให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ภายใน PVA ลดลง

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 ENR และPVA M40

No.	Formula	Contact angle (°)			
		1	2	3	Average
1	PVA M40	78.2	78.4	77.5	78.03
2	ENR	61.1	59.8	58	59.63
3	ENR/PVA	44.2	50.2	49.5	47.96
4	ENR/PVA M40	48.9	54.5	58.4	53.93
5	ENR/PVA M50	69.5	69	66.5	68.33



รูปที่ 4.95 เปรียบเทียบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50 ENR และ PVA M40



รูปที่ 4.96 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40 และ ENR

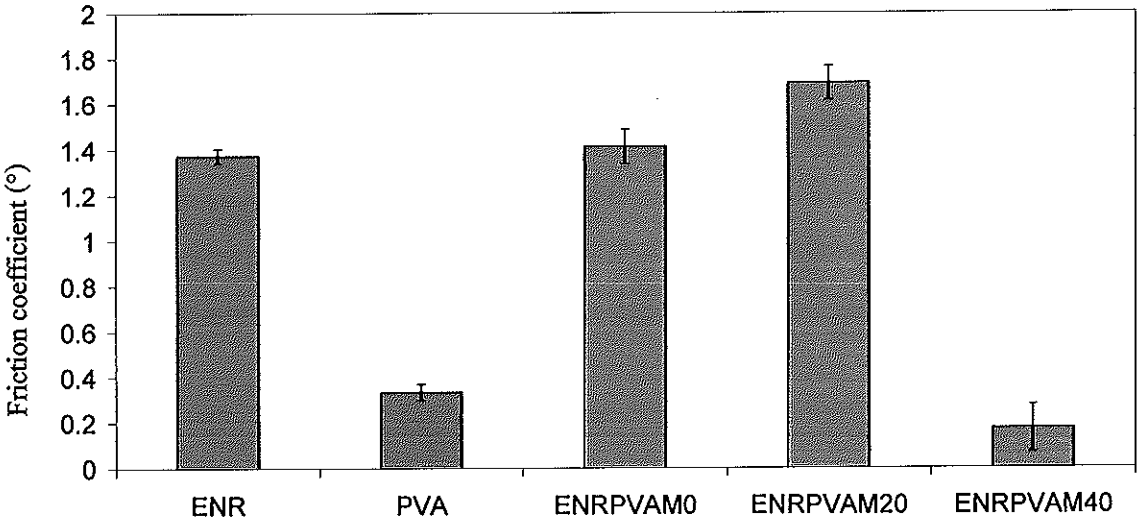
4.2.8 การวัดความเสียดทานของพื้นผิว

การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.14 ทำการวัดความเสียดทานของพื้นผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสม มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.97

จากรูปที่ 4.97 เปรียบเทียบความเสียดทานของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ENR และPVA ก่อนและหลังเชื่อมขวาง พบว่ายาง ENR มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในระดับที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับ PVA (UPVA และ CPVA) เมื่อผสมพอลิเมอร์ ENR/PVA พบว่าในช่วงแรกที่ปริมาณการใช้กรดมาลีอิค 0 และ 20% ยังคงแสดงสมบัติของยาง ENR คือมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในระดับที่สูง แต่หลังจากเพิ่มปริมาณกรดมาลีอิคเป็น 40% ในพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงเป็นอย่างมาก โดยอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า PVA (UPVA และ CPVA) เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค ทำให้พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA แสดงสมบัติเป็น IPN

ตารางที่ 4.10 ความเสียดทานของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ENR และPVA ก่อนและหลังเชื่อมขวาง

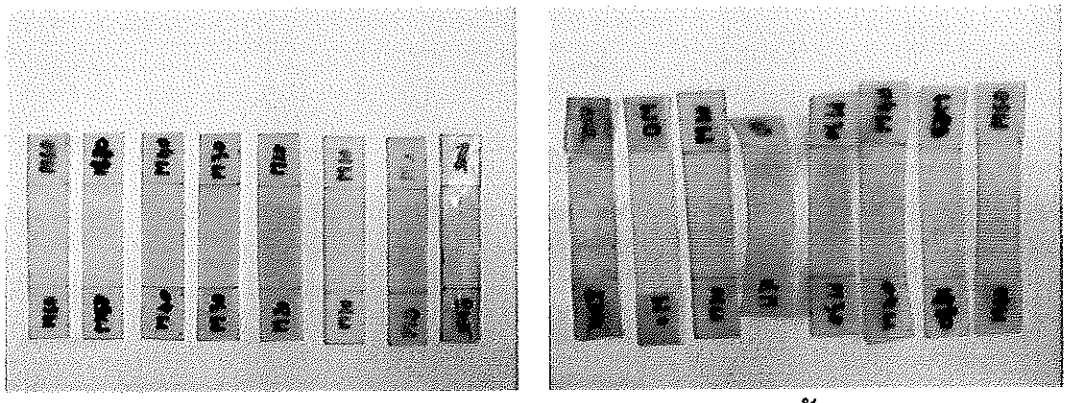
No.	Formula	Friction Coefficient			
		1	2	3	Average
1	ENR	1.3458	1.3565	1.4217	1.37
2	Uncured PVA	0.3824	0.325	0.2813	0.32
3	Cured PVA	0.3053	0.4475	0.2515	0.33
4	ENR/PVAM0	1.5207	1.3942	1.3238	1.41
5	ENR/PVAM20	1.5381	1.7121	1.8246	1.69
6	ENR/PVAM40	0.1733	0.1676	0.1783	0.17



รูปที่ 4.97 เปรียบเทียบความเสียดทานของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ENR และPVA ก่อนและหลังเชื่อมขวาง

4.2.9 ศึกษาการทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม

ทำการทดสอบโอโซนเพื่อศึกษาลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบที่ความเข้มโอโซนที่ 50 ± 5 pphm อุณหภูมิที่ใช้ 40 ± 2 °C และยืดตัวอย่างไว้ 20% ใส่ในตู้โอโซนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จึงนำมาตรวจรอยแตก ได้ผลการทดลองดังนี้ รูปที่ 4.98 แสดงลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบโอโซน



ก่อน หลัง

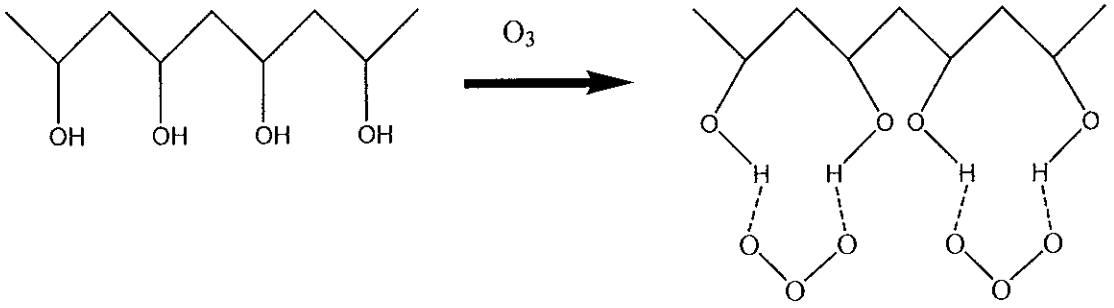
รูปที่ 4.98 ลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบโอโซน

จากผลการทดลองที่ได้ ตารางที่ 4.10 พบว่า ลักษณะของชิ้นตัวอย่างยาง ENR สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน โดยมีจำนวนรอยแตกต่อพื้นที่

เท่ากับ 7 รอยแตก และความยาวเฉลี่ยของรอยแตกเท่ากับ 1.85 มิลลิเมตร สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นรอยแตกได้เลย แต่มีการเปลี่ยนแปลงสีและชิ้นตัวอย่างมีการบิดเบี้ยวไปจากเดิมเล็กน้อย สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในสูตร ENR/PVA M0 โดยมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองไปเป็นสีขาวซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับโอโซน ดังในรูปที่ 4.99 จากการทดสอบความทนทานต่อโอโซนแสดงให้เห็นว่าการผสมระหว่าง ENR/PVA ทำให้ยาง ENR ที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความทนทานต่อโอโซนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างยาง ENR เพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบโอโซน รอยแตกที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า จำนวนรอยแตกต่อพื้นที่และความยาวเฉลี่ยของรอยแตก

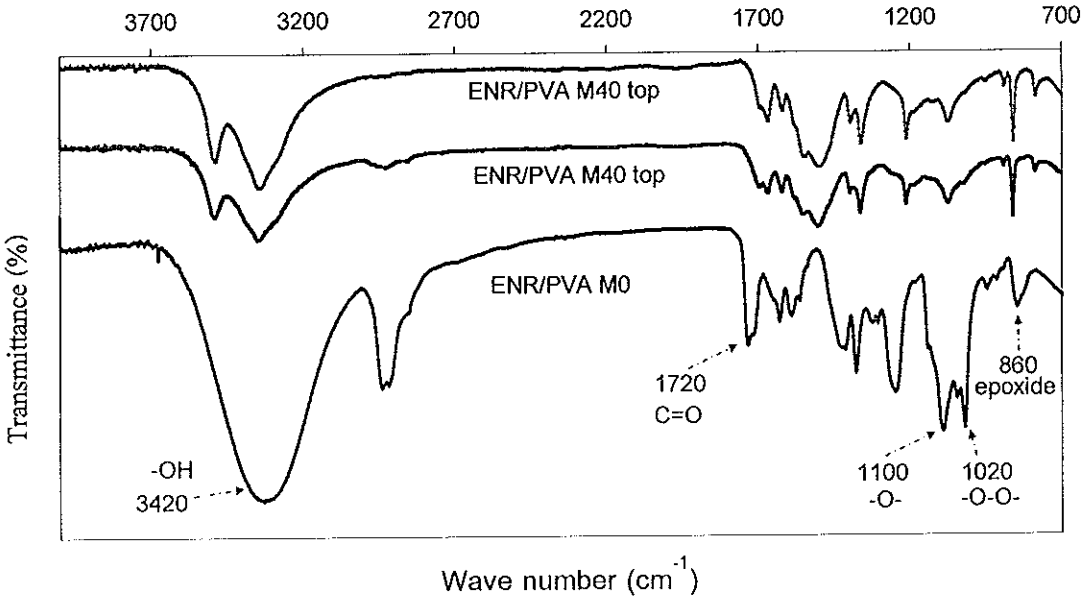
Formulation	Observation	Crack number /area	Average Length crack (mm)
1.ENR	appearance	7	1.85
2.M0	appearance	-	-
3.M10	none	-	-
4.M20	none	-	-
5.M30	none	-	-
6.M40	none	-	-
7.M50	none	-	-
8.M60	none	-	-



รูปที่ 4.99 ปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับโอโซน (Cataldo and Angelini, 2006)

สำหรับรูปที่ 4.100 เปรียบเทียบสเปคตราของ ENR/PVA M0 และ ENR/PVA M40 หลังการทดสอบโอโซน พอลิเมอร์ผสมจะแสดงพีคที่เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 1720 เป็นของหมู่คาร์บอนิล และ 3420 เป็นของหมู่ ไฮดรอกซิล และที่ตำแหน่ง 835 เป็นตำแหน่งพันธะคู่ของยางธรรมชาติจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นพีคที่ตำแหน่ง 860 1020 และ 1100 ซึ่งเป็น

พีคของ epoxide –O-O- และ –O- ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการที่โอโซนเข้าไปทำปฏิกิริยาในพอลิเมอร์ผสม (H.M. Nor and J.R. Ebdon, 2000) โดยลักษณะพีคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโอโซนเข้าไปทำปฏิกิริยาจะสังเกตได้อย่างชัดเจนในพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมโยง แต่เมื่อใช้สารเชื่อมขวาง พีคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโอโซนเข้าไปทำปฏิกิริยามีค่าลดลง



รูปที่ 4.100 สเปคตราอินฟราเรดของ ENR/PVA M 0 และ40 หลังการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน

4.2.10 สรุปผลการทดลองตอนที่ 2

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA .ในขั้นต้นเป็นการศึกษาความทนทานต่อตัวทำละลายโทลูอีน โดยพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีความทนทานต่อตัวทำละลายโทลูอีนได้ดีเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมขวาง 20% ขึ้นไป ส่วนระยะเวลาไม่ค่อยมีผลต่อการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอีน ซึ่งยืนยันโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิค ATR-FTIR เทคนิค XRD และเทคนิค NMR กล่าวคือ สามารถประสบความสำเร็จในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ โดยพบพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของหมู่อิพอกไซด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 และ 1240 cm^{-1} จากเทคนิค ATR-FTIR ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ C=O ที่ 1663 cm^{-1} คือ O-H ที่ 1293 cm^{-1} และคือ C-O-C ที่ 1152 cm^{-1} การลดลงของความเข้มของพลังงานที่ 2-Theta เท่ากับ 40° จากเทคนิค XRD แสดงถึงการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค และการปรากฏสัญญาณที่ 172.0 ppm ซึ่งเป็นสัญญาณของ C=O ซึ่งจะปรากฏ

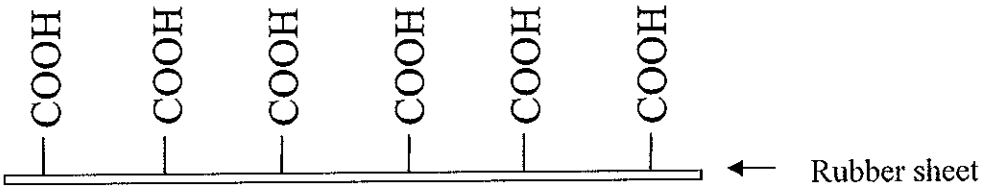
เช่นเดียวกันใน รูปที่ 4.56 b ที่ตำแหน่ง 173.3 ppm แต่สำหรับในส่วนของ ENR/PVA M40 4.56 c ที่มีการใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางมีสัญญาณในตำแหน่งนี้ลดลง โดยไปปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่ง 24.1 ppm แสดงถึงการเกิดการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิคจากเทคนิค NMR การลดลงของสัญญาน ^{13}C ตำแหน่งที่ 70 74 และ 63 ของ C-OH เนื่องจากการเชื่อมโยงระหว่างกรดมาลีอิกและ PVAการศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลายโดยการบวมตัวและความสามารถในการละลายในน้ำและโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าลดลงหลังการเชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิคและปริมาณสารเชื่อมขวางคือกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้นทำให้การบวมตัวและความสามารถในการละลายในน้ำและโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าลดลง สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้นหลังจากการเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิค การศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA โดยเฟสของ PVA ที่เกิดขึ้นมีการแจกแจง และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเฟสของยาง ENR ซึ่ง PVA ที่เกิดการเชื่อมขวางจะสังเกตได้จากลักษณะที่นูนขึ้นจากภาพที่ได้จากเทคนิค SEM และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจะมีลักษณะเป็นหลุมๆ ซึ่งเป็นส่วนของยาง ENR ที่ถูกสกัดออกไป หลังจากที่เพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางจะสังเกตส่วนที่เป็นหลุดๆได้ยากขึ้น และที่ปริมาณสารเชื่อมขวาง 40% ไม่พบลักษณะที่เป็นหลุมอีก แสดงถึงความทนทานต่อตัวทำละลายโทลูอีนที่ดี สำหรับการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA พบว่ามีความทนทานต่อความร้อนมากถึง 400°C และมีความทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น จากเทคนิค TGA สำหรับการตรวจสอบสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ด้วยเทคนิค DMTA พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สามารถเข้ากันได้ดีโดยแสดง T_g ค่าเดียวที่ประมาณ 0 °C (ยาง NR จะมี T_g ที่ประมาณ -60 °C PVA จะมี T_g ที่ประมาณ 35 °C) การวัดมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความชอบน้ำลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางคือกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้น การวัดความเสียดทานของพื้นผิว พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น กล่าวคือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ยาง ENR > ENR/PVA> EPVA การทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA พบว่าสามารถทนทานต่อโอโซนได้ดี กล่าวคือไม่มีรอยแตกเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยาง ENR ที่มีรอยแตกเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

4.3ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค

การเตรียมยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค (NR-g-ACC และ ENR-g-ACC) เป็นการดัดแปรผิวของยาง NR และ ENR โดยการใช้แสงยูวีเพื่อให้พื้นผิวสามารถทำปฏิกิริยากับกรดอะคริลิคดังรูปที่ 4.101 เพื่อทำให้สามารถนำไปดัดแปรต่อดังหัวข้อที่ 4.5 โดยมีรายละเอียดสำหรับผลการทดลองที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้

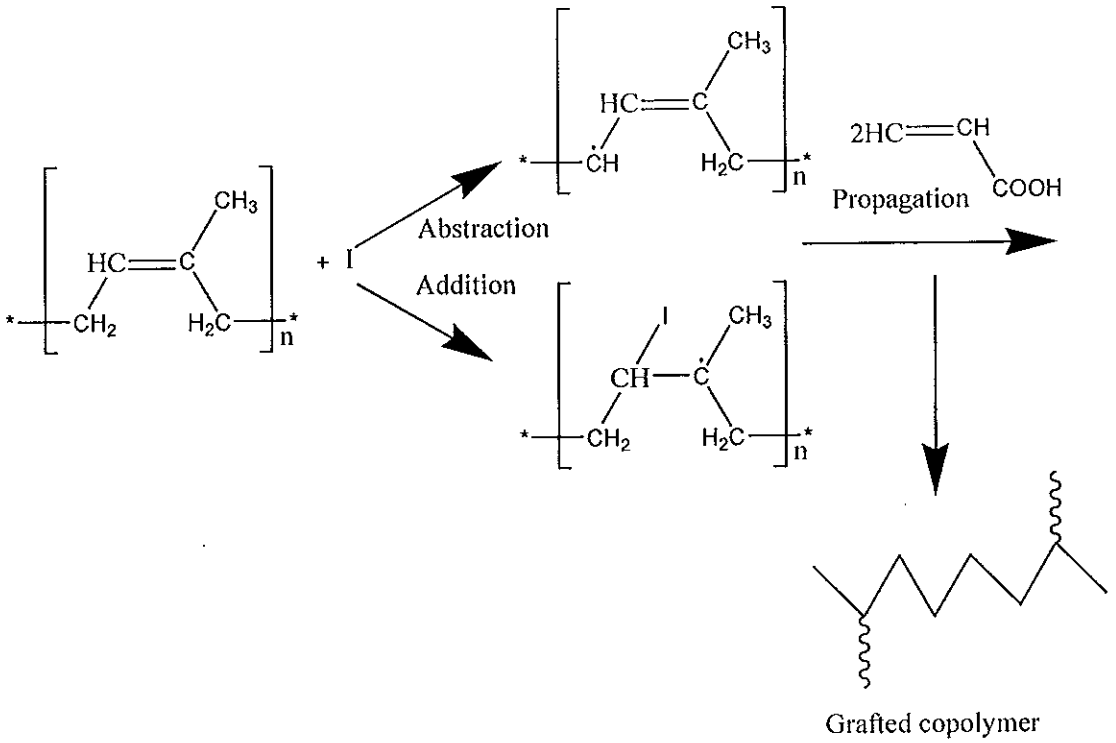
4.3.1 ศึกษาการเตรียมการกราฟต์

วิธีการทดสอบดังหัวข้อ 3.4.3 ทำการกราฟต์ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC โดยใช้รังสียูวีเพื่อให้เกิดการกราฟต์ โดยใช้เบนโซอิล เปอร์ออกไซด์เป็นตัวรับแสง เพื่อให้ได้มาซึ่งแผ่นยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิคที่ดีที่สุด จึงจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการการกราฟต์ ซึ่งก็คือ ระยะเวลาในการกราฟต์ (การให้รังสียูวี) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิวยางกับกรดอะคริลิคสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.101 และ 4.102



รูปที่ 4.101 แบบจำลองปฏิกิริยาที่เกิดการกราฟต์บนแผ่นยางด้วยกรดอะคริลิค

กลไกการกราฟต์บนแผ่นยางด้วยกรดอะคริลิคเกิดขึ้นเมื่อสารตัวริเริ่ม เบนโซอิล เปอร์ออกไซด์ ได้รับแสงยูวี ถูกกระตุ้นให้อยู่ในรูป แรดดิคอล สารริเริ่มนี้ไปกระตุ้นให้โมเลกุลยางเกิดหมู่อนุมูลอิสระดังรูปที่ 4.102 ตำแหน่งอัลดิลของโมเลกุลยางธรรมชาติ จากนั้นโมเลกุลของกรดอะคริลิค ไปกราฟต์บนพื้นผิวของยางธรรมชาติ



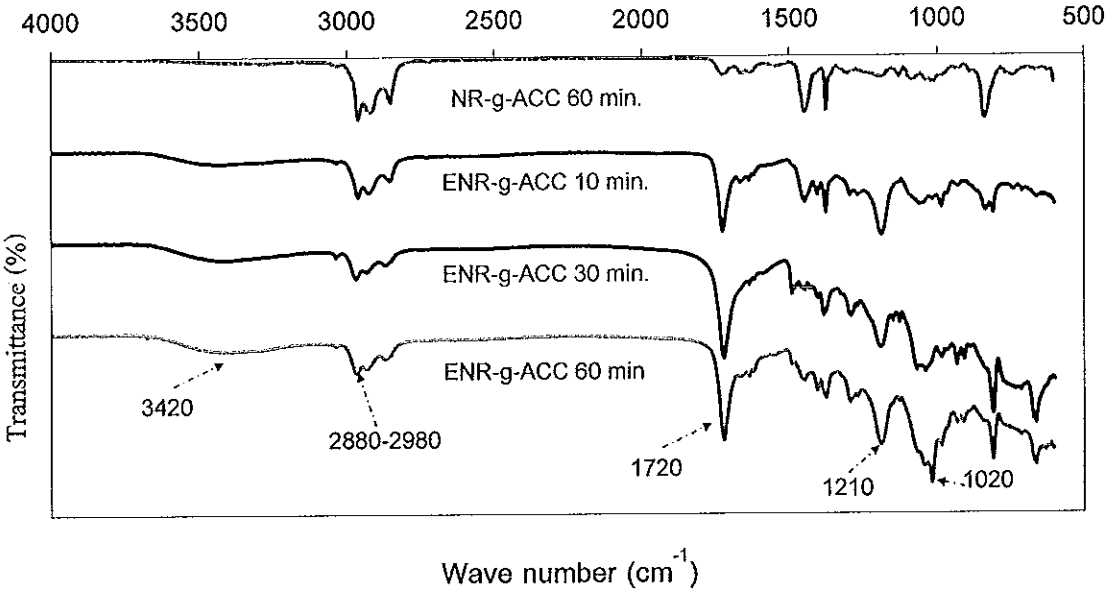
รูปที่ 4.102 ปฏิกิริยาระหว่างอะคริลิคกับยางธรรมชาติ (Oliveira *et al.*, 2005)

4.3.2 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม

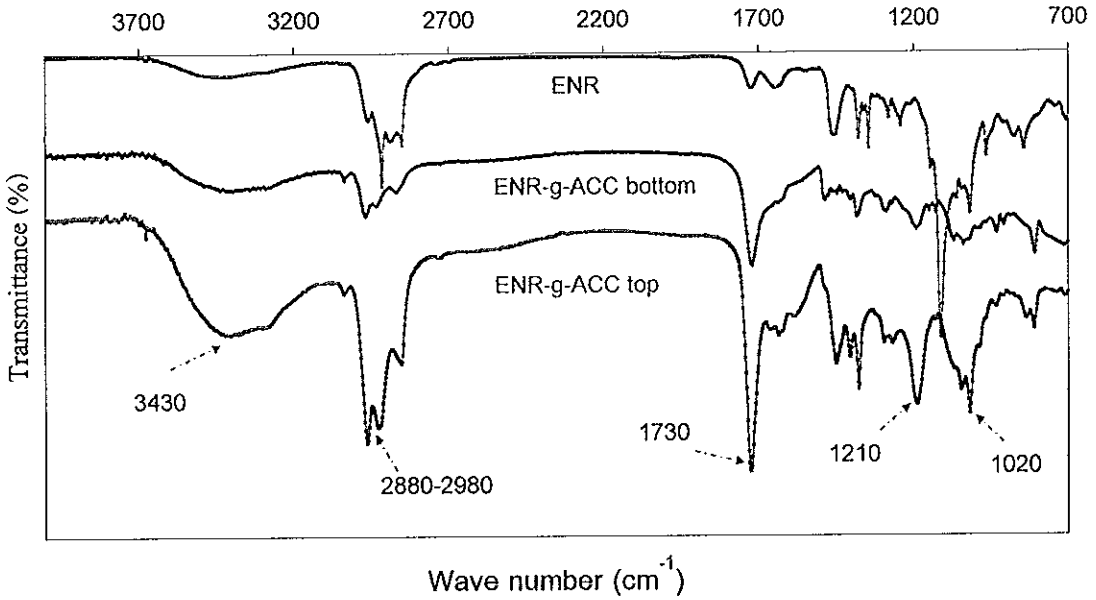
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีหลังจากการกราฟต์ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC สามารถตรวจสอบโดยใช้ ATR-FTIR

การเปรียบเทียบสเปคตราของ NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 60 นาที และ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 10 30 และ 60 นาที แสดงดังรูปที่ 4.103 โดยสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน 2 ตำแหน่ง คาร์บอนิลที่ 1720 และไฮดรอกซิลที่ 3420 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันโดยแสงยูวีของแผ่นยาง NR และแผ่นยาง ENR (Abu Bakar et al., 2010) 102 เห็นได้ว่าระยะเวลาในการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้นสเปคตราที่ของหมู่คาร์บอนิลที่ 1720 และหมู่ไฮดรอกซิลที่ 3420 cm^{-1} จะเพิ่มมากขึ้นแสดงให้เห็นถึงการประสบผลสำเร็จจากการกราฟต์ซึ่งยืนยันได้ด้วยปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.102

สำหรับรูปที่ 4.104 เปรียบเทียบสเปคตราของแผ่นยาง ENR กับ ENR-g-ACC ด้านที่โดนแสงโดยตรงและด้านที่ไม่โดนแสงโดยตรง เมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีเท่ากับ 60 นาที เห็นได้ว่าสเปคตราของแผ่นยาง ENR-g-ACC ด้านที่โดนแสงโดยตรงปรากฏสัญญาณของคาร์บอนิลที่ 1720 และไฮดรอกซิลที่ 3420 cm^{-1} อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่า ENR-g-ACC มีการกราฟต์เกิดขึ้นจริง สำหรับลักษณะสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆของแผ่นยาง NR และ ENR หลังจากการให้แสงยูวีแสดงดังตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.103 เปรียบเทียบสเปคตราของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC



รูปที่ 4.104 เปรียบเทียบสเปคตราของ ENR-g-ACC bottom ENR-g-ACC top และ ENR

ตารางที่ 4.12 ลักษณะสเปคตราที่สำคัญ ของแผ่นยาง NR และ ENR หลังจากการให้แสงยูวี

Component	Signal (cm^{-1})	Assignment
NR	3345	O-H stretching
(K.A.M.dosSantos *et al.*,	1766	C=O stretching (carboxylic acid)
2005)	1715	C=O stretching (ketone)
	1665	C=C stretching
	1166	C-O stretching (carboxylic acid)
	1077	CCO asymmetric stretching
	1021	CCO asymmetric stretching
	888	O-O stretching (peroxide and hydroperoxide)
ACC	1715	C=O
(Shyh-Dar Lee *et al.*,	3200-3500	COOH
1996)		

4.3.3 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย

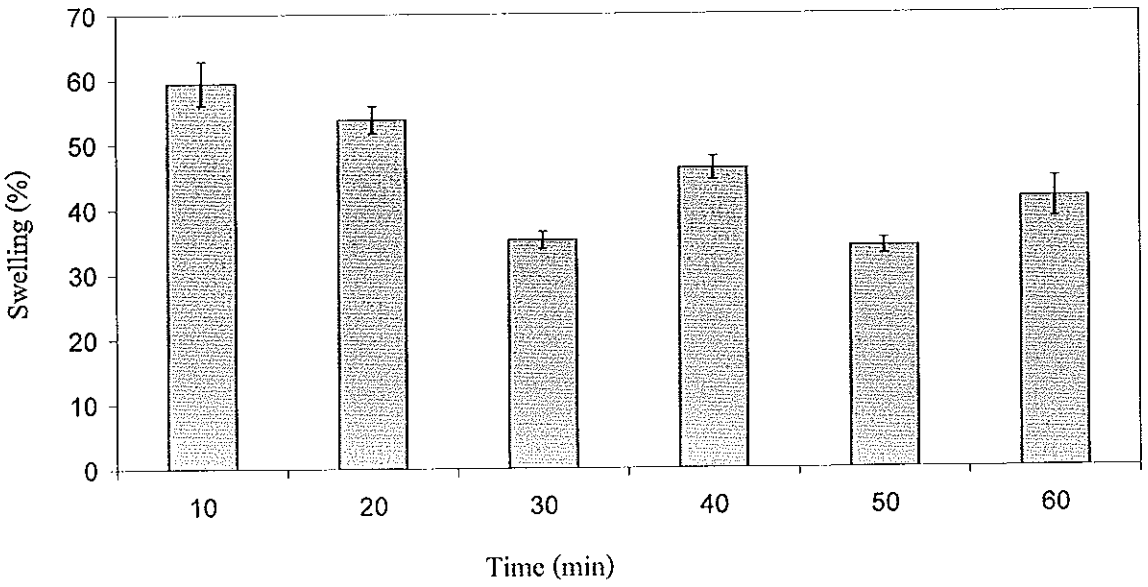
การศึกษาสมบัติทางด้านความทนทานต่อตัวทำละลาย เพื่อเป็นการตรวจสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการดัดแปร โดยทำการศึกษาในตัวทำละลาย คือ น้ำและโทลูอีน ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองต่างๆ ดังหัวข้อต่างๆ ต่อไปนี้

4.3.3.1 การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำ

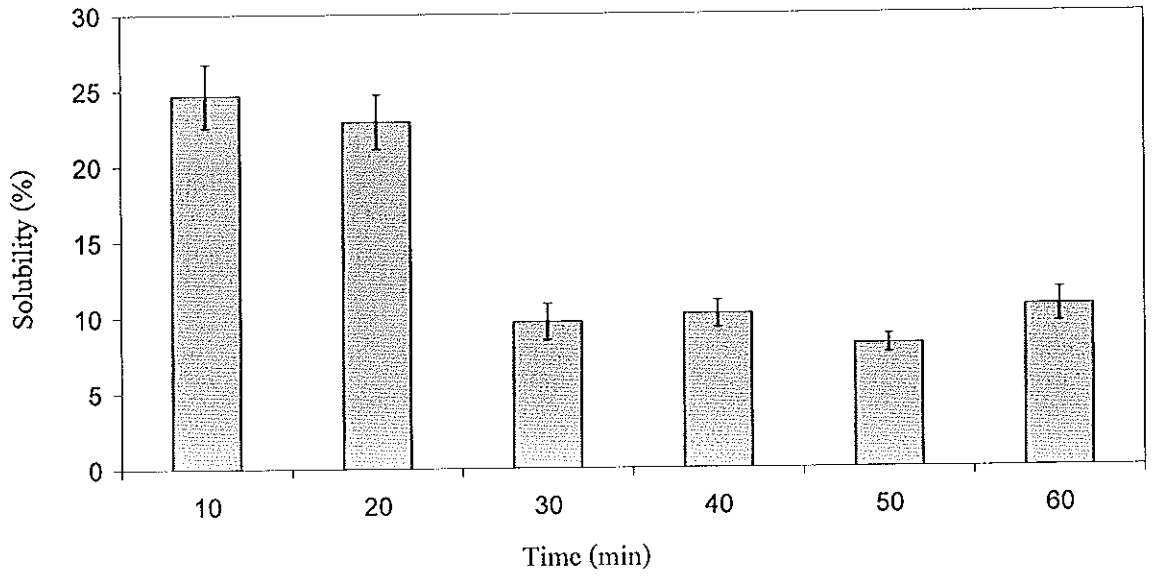
ทำการศึกษาการบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำของ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้รังสียูวี 0-60 นาที ซึ่งมีผลการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.105 และ 4.106

การบวมตัวในน้ำของ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้รังสียูวีต่างๆ ดังรูปที่ 4.105 พบว่าการบวมตัวในน้ำของ ENR-g-ACC มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น

ความสามารถในการละลายน้ำของ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้รังสียูวีต่างๆ ดังรูปที่ 4.106 พบว่าความสามารถในการละลายน้ำของ ENR-g-ACC มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีน้อยๆ มีความสามารถในการละลายน้ำที่สูงกว่าที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีนานเนื่องจากที่ระเวลาการให้แสงยูวีน้อยทำให้ส่วนของกรดอะคริลิคที่ไม่เกิดปฏิกิริยาละลายออกไป



รูปที่ 4.105 การบวมตัวในน้ำของ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้รังสียูวีต่าง ๆ



รูปที่ 4.106 ความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิคที่ระยะเวลาการให้รังสียูวีต่าง ๆ

4.3.3.2 การบวมตัวในโทลูอีนความสามารถในการละลายโทลูอีน

จากการศึกษาการบวมตัวในโทลูอีนไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้เนื่องจากชิ้นทดสอบมีการบวมตัวในระดับที่สูงมากและบางส่วนเกิดการละลาย เป็นการบ่งบอกได้ว่าการกราฟต์นั้นเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของตัวอย่างเท่านั้น

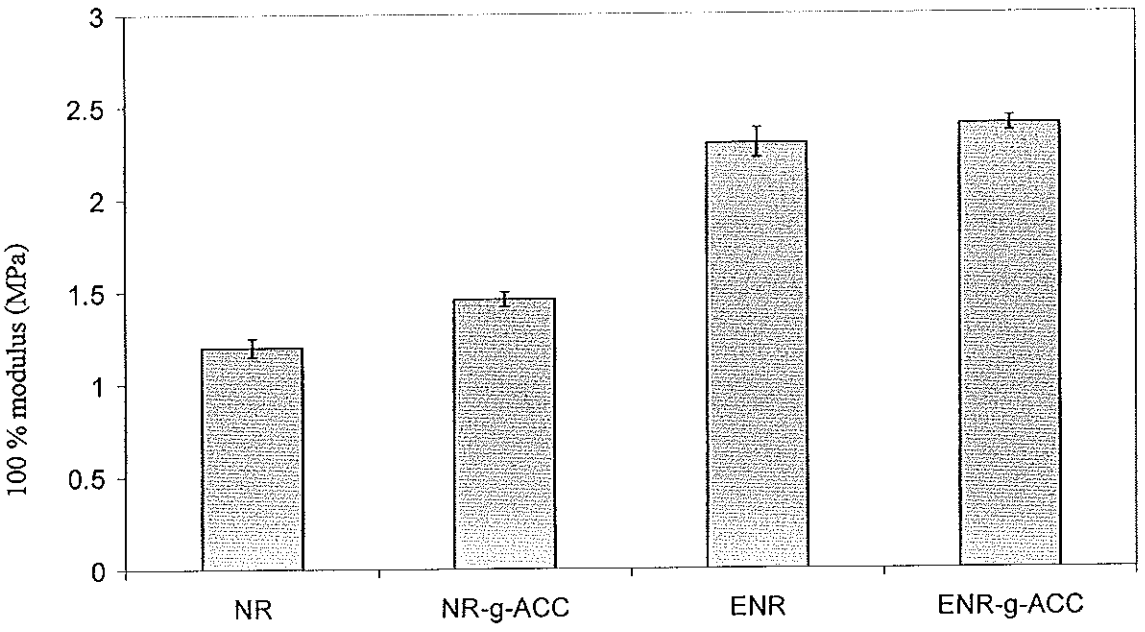
4.3.4 ศึกษาการทดสอบสมบัติเชิงกล

การศึกษาสมบัติเชิงกลเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน เพราะโดยทั่วไปเราไม่สามารถทำนายสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ได้โดยอาศัยความรู้จากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีได้อย่างแม่นยำ เช่น การคำนวณความแข็งแรงโดยอาศัยความรู้พื้นฐานจากความแข็งแรงของพันธะ และแรงระหว่างโมเลกุล เพราะฉะนั้นการทดสอบสมบัติเชิงกลจึงเป็นวิธีการที่ดีที่จะศึกษาถึงสมบัติและความเป็นไปได้ในการนำเอาพอลิเมอร์ผสมไปใช้งาน

4.3.4.1 100 % โมดูลัส

ทำการทดสอบค่า 100 % มอดุลัส ของแผ่นยาง NR และ ENR ก่อนและหลังการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิคด้วยเครื่องเทนโซมิเตอร์ ที่อัตราดึง 500 มิลลิเมตรต่อวินาที วิธีการทดสอบดังในหัวข้อที่ 3.4.6 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.106

ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของ NR และ ENR ก่อนและหลังการให้แสงยูวี แสดงดังรูปที่ 4.107 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง NR และยาง ENR พบว่ายาง ENR มีค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % สูงกว่ายาง NR และจากการให้แสงยูวีพบว่าค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยค่ามอดุลัสของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีค่า 1.46 และ 2.4 MPa ตามลำดับ

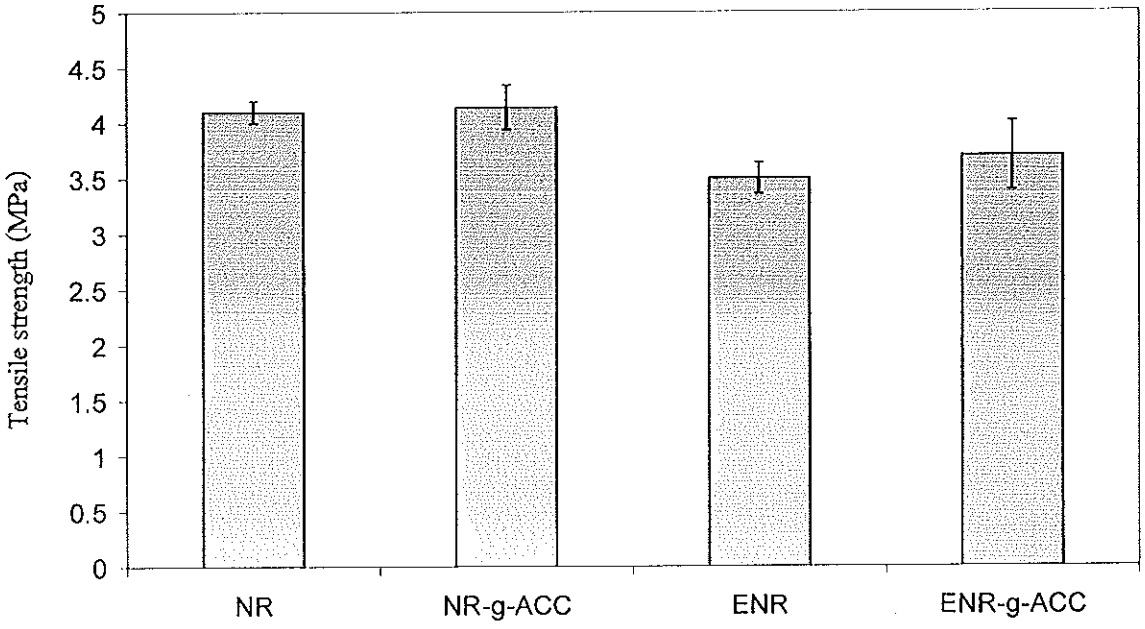


รูปที่ 4.107 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของ NR และ ENR ก่อนและหลังการให้แสงยูวี

4.3.4.2 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

ทำการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นยาง NR และ ENR ก่อนและหลังการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิคด้วยเครื่องเทนโซมิเตอร์ ที่อัตราดึง 500 มิลลิเมตรต่อวินาที วิธีการทดสอบดังในหัวข้อที่ 3.4.6 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.107

ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของ NR และ ENR ก่อนและหลังการให้แสงยูวี แสดงดังรูปที่ 4.108 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง NR และยาง ENR พบว่ายาง NR มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง สูงกว่ายาง ENR และจากการให้แสงยูวีพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกิริยาเกิดขึ้นจากการให้แสงยูวี โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีค่า 4.14 และ 3.7 MPa ตามลำดับ



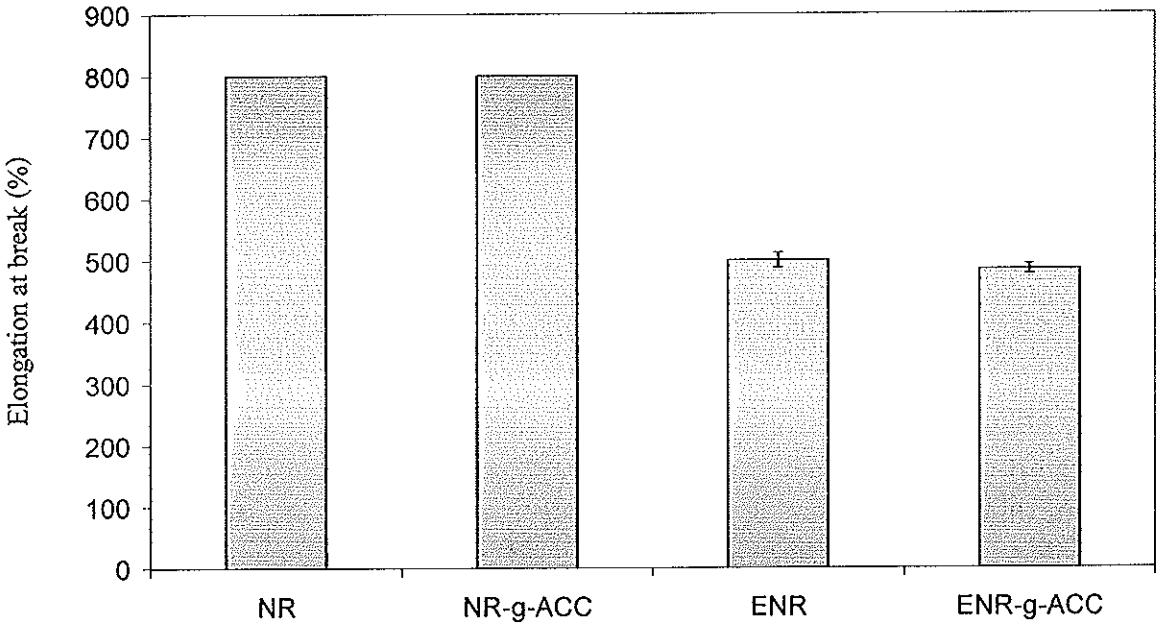
รูปที่ 4.108 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของ NR และ ENR ก่อนและหลังการให้แสงยูวี

4.3.4.3 สมบัติด้านความสามารถในการยืด

ทำการทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการยืดของแผ่นยาง NR และ ENR ก่อนและหลังการกราฟต์ด้วยเครื่องเทนโซมิเตอร์ ที่อัตราดึง 500 มิลลิเมตรต่อวินาที วิธีการทดสอบดังในหัวข้อที่ 3.4.6 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.109

ค่าความสามารถในการยืด (%) ของ NR และ ENR ก่อนและหลังการให้แสงยูวี แสดงดังรูปที่ 4.109 พบว่าค่าความสามารถในการยืดของยาง NR สูงกว่า ENR จากการเปรียบเทียบก่อนและหลังการให้แสงยูวีพบว่าค่าความสามารถในการยืดค่อนข้างใกล้เคียงก่อนการให้แสงยูวี

แสดงว่าการให้แสงยูวีไม่ค่อยมีผลต่อค่าความสามารถในการยืดของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีค่า 800 และ 485% ตามลำดับ



รูปที่ 4.109 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของ NR และ ENR ก่อนและหลังการให้แสงยูวี

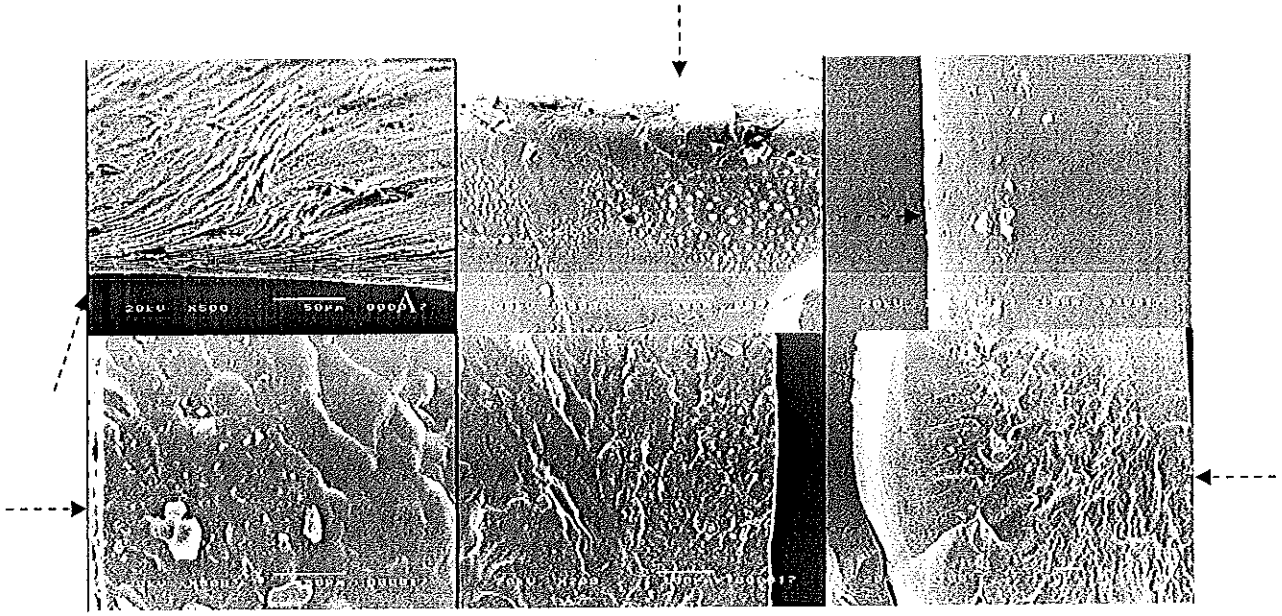
4.3.5 ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC เพื่อเป็นการตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด โดยในงานวิจัยครั้งนี้มีเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC อยู่ 2 วิธีคือ 1) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM และ 2) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย AFM

4.3.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC เมื่อแปรระยะเวลาในการให้แสงยูวีเป็น 0-60 นาที โดยใช้เครื่อง JSM JEOL 2000 ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นตัวอย่างมาทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจน พื้นผิวที่ผ่านการทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจนแล้วมาทำการเคลือบด้วยทองก่อนที่จะนำมาทดสอบ ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.110

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีแตกต่างกัน โดยทำการถ่ายภาพชิ้นตัวอย่างตามขวางจากการหักภายใต้ไนโตรเจนเหลว ตำแหน่งของลูกศรจะเป็นการบ่งบอกถึงด้านที่เป็นผิวของตัวอย่าง จากรูปที่ 4.110 เมื่อสังเกตจะเห็นได้ว่าจากผิวตัวอย่างเข้าสู่ภายในยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จะมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จะมีเฟสที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง NR กับ ENR หลังจากการให้แสงยูวีพบว่ายาง ENR จะมีเฟสที่มีความขรุขระมากกว่ายาง NR เฟสขรุขระที่มากกว่าแสดงให้เห็นว่า ACC สามารถซึมเข้าไปภายในยาง ENR ได้มากกว่ายาง NR เนื่องมาจากยาง ENR มีหมู่อิพอกไซด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับ ACC



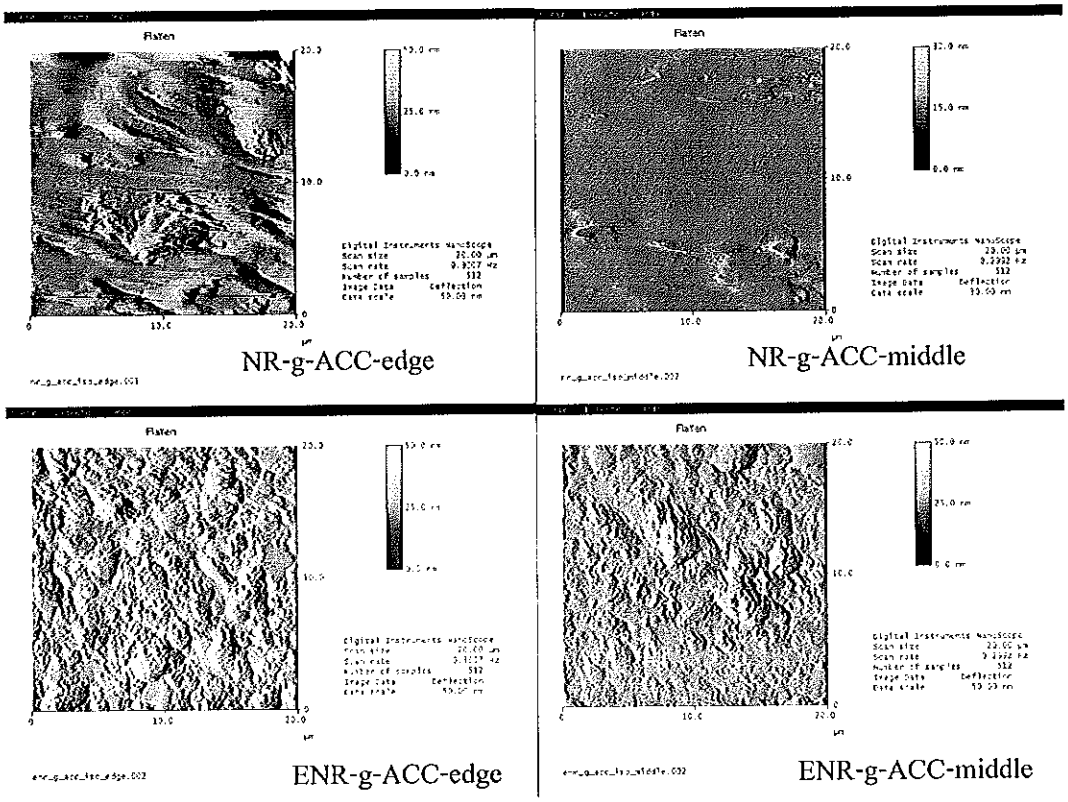
รูปที่ 4.110 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของ NR-g-ACC ที่ระยะการให้แสงยูวีต่างๆ A) 0 B) 30 และC) 60 นาที และ ENR-g-ACC C) 0 D) 30 และE) 60 นาที

4.3.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC เมื่อแปรระยะเวลาในการให้แสงยูวีเป็น 0-60 นาที โดยมีโหมดที่ใช้ในการทดสอบมี 2 โหมดคือ ทดสอบแบบ deflection และทดสอบแบบ height และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่พื้นผิว (edge) กับภายในตัวอย่าง (middle)

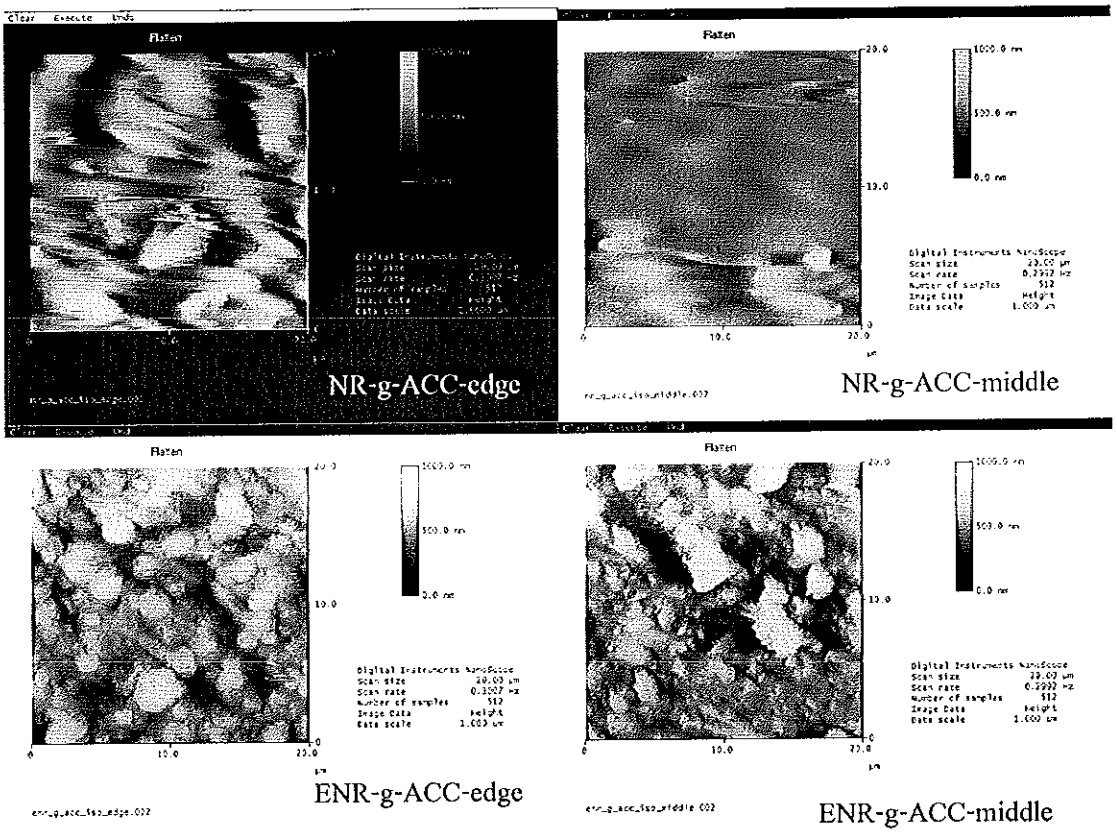
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.111 สำหรับการทดสอบแบบ

deflection เป็นการบ่งบอกค่าแรงของแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ จากการทดลองพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จะมีลักษณะคล้ายพื้นผิวที่มีความขรุขระซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงหลังจากการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค โดย ENR-g-ACC จะมีลักษณะเฟสที่ขรุขระสังเกตได้ชัดเจนกว่า NR-g-ACC แสดงว่าการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยาง ENR เกิดได้ดีกว่ายาง NR



รูปที่ 4.111 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 4.112สำหรับการทดสอบแบบ height เป็นการบ่งบอกระดับความสูงของแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ จากการทดลองพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จะมีลักษณะคล้ายพื้นผิวที่มีความขรุขระซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงหลังจากการกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิคโดย ENR-g-ACC จะมีลักษณะเฟสที่ขรุขระสังเกตได้ชัดเจนกว่า NR-g-ACC แสดงว่าการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยาง ENR เกิดได้ดีกว่ายาง NR ซึ่งมีผลการทดลองสอดคล้องกับการทดสอบในโหมด deflection



\

รูปที่ 4.112 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง

.

จากตารางที่ 4.13 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่าค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับตัวอย่างของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีค่าใกล้เคียงกันโดยแผ่น NR-g-ACC มีค่าแรงค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับตัวอย่างสูงกว่าแผ่น ENR-g-ACC เล็กน้อย โดยเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งบริเวณผิวตัวอย่างทั้งแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีค่าแรงยึดติดมากกว่าบริเวณภายในของตัวอย่าง แสดงถึงการกราฟต์เกิดขึ้นมากตรงบริเวณผิวตัวอย่าง

ตารางที่ 4.13 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของ NR-g-ACC และENR-g-ACC

Sample		Adhesion force (N.m)			
		1	2	3	Average
NR-g-ACC	EDGE	49.69	50.36	49.65	49.9
	MIDDLE	36.76	38.35	39.47	39.19
ENR-g-ACC	EDGE	28.57	28.95	29.94	28.82
	MIDDLE	9.51	10.19	9.54	9.75

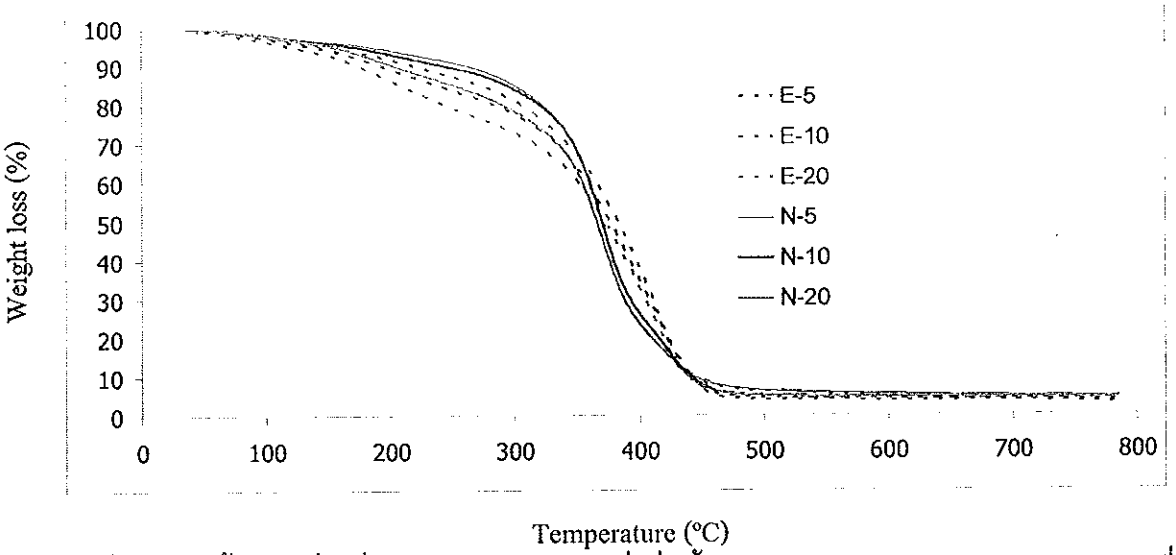
4.3.6 ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อน

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC เพื่อตรวจดูความเข้ากัน ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ในงานวิจัยครั้งนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 เทคนิคคือ 1) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA และ 2) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.3.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริก

ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีต่างๆ ภายใต้บรรยากาศ ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 0 – 600˚C ภายใต้บรรยากาศ ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600 – 800˚C และอัตราการให้ความร้อนที่ใช้ในการทดสอบคือ 10˚C/min

จากรูปที่ 4.113 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีต่างๆ พบว่าENR-g-ACC มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่า NR-g-ACC เนื่องจากมีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า สำหรับระยะเวลาในการให้รังสีเพิ่มขึ้นไม่ค่อยมีผลต่อสมบัติทางความร้อนเนื่องจากระยะเวลาในการให้รังสีเพิ่มขึ้น มีการสลายตัวที่อุณหภูมิค่อนข้างใกล้เคียงกัน

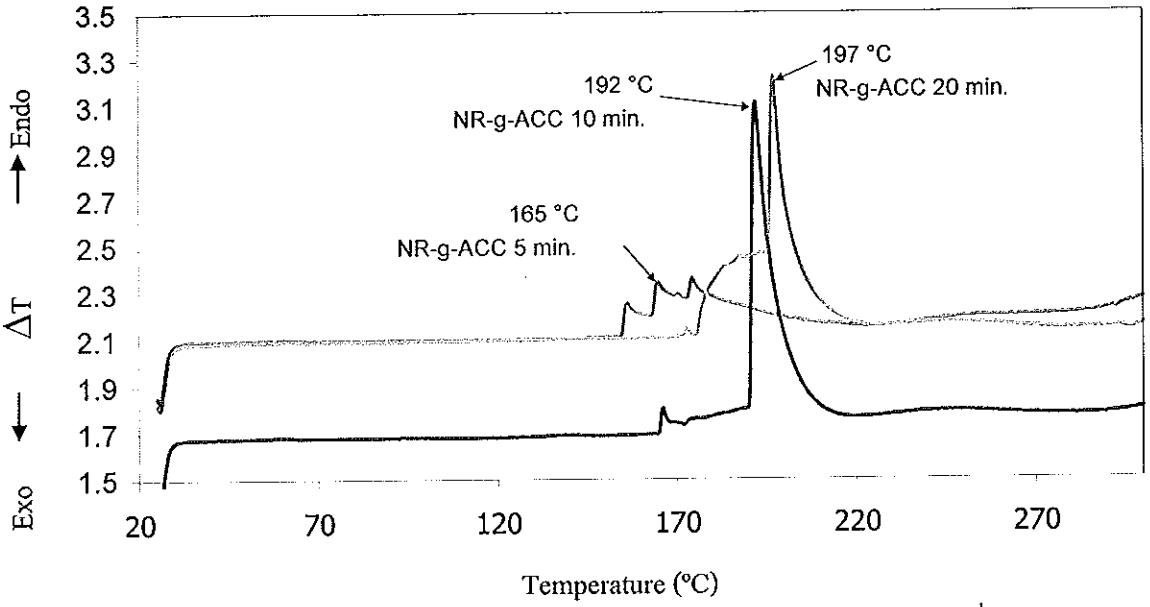


รูปที่ 4.113 น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีต่างๆ

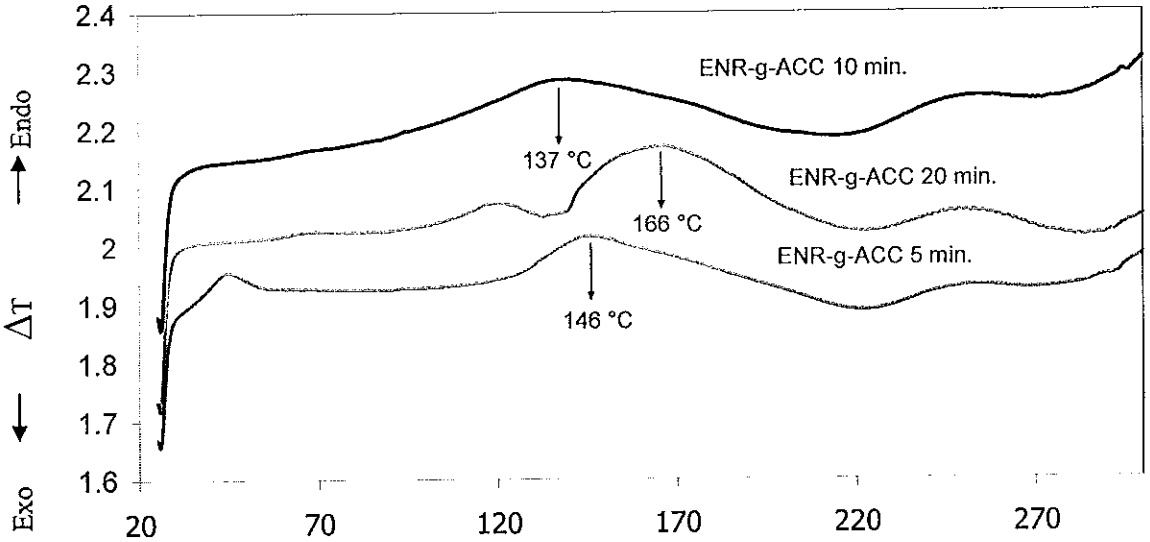
4.3.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC สำหรับเทคนิค DSC สารตัวอย่าง และ สารอ้างอิงจะถูกให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานสองแหล่งที่แยกกัน ค่าพลังงานความร้อน ($d\Delta Q/dt$) ที่ใช้ในการรักษาอุณหภูมิของตัวอย่าง และ สารอ้างอิงให้เท่ากันจะถูกบันทึกไว้ ข้อมูลที่ถูกนำมาพลอตกราฟกับอุณหภูมิ คือ $d\Delta Q/dt$ กราฟที่ได้เรียกว่า เทอร์โมแกรม (thermogram)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย DSC ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีต่าง ๆ จากรูปที่ 4.114 พบว่า NR-g-ACC สามารถสังเกตอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ได้อย่างชัดเจน โดย NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 20 นาทีมีค่า T_m เท่ากับ 179 ^{o}C ซึ่งระยะเวลาในการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น NR-g-ACC จะมี T_m สูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเกิดการกราฟต์ของ NR-g-ACC จากรูปที่ 4.115 ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 20 นาทีสามารถสังเกต T_m ได้ที่ตำแหน่ง 166°C ซึ่งมีค่าต่ำกว่า NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 20 นาที



รูปที่ 4.114 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของ NR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีต่าง ๆ



รูปที่ 4.115 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของ ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาในการให้แสงยูวีต่าง ๆ

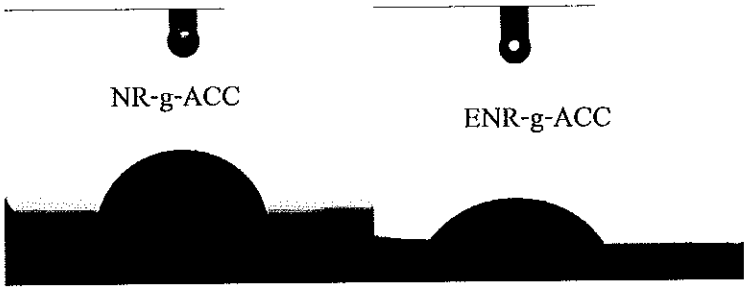
4.3.7 การวัดมุมสัมผัส

การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.13 ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิว NR-g-ACC และ ENR-g-ACC กับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่ให้แสงยูวีเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.116

จากตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบมุมสัมผัส NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่าหลังจากให้แสงยูวีเป็นระยะเวลา 60 นาทีค่ามุมสัมผัสของ NR และ ENR มีค่าลดลง แสดงให้เห็นถึงความชอบน้ำที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ค่ามุมสัมผัสของ ENR-g-ACC มีค่าน้อยกว่า NR-g-ACC เนื่องจากยาง ENR มีหมู่อิพอกไซด์ซึ่งมีความเป็นขั้วจึงชอบน้ำได้มาก ซึ่งมีผลการทดลองสอดคล้องดังรูปที่ 4.116

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบมุมสัมผัส NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

Formulation	Contact angle (°)
NR	78.90
NR-g-ACC	40.40
ENR	59.63
ENR-g-ACC	30.30



รูปที่ 4.116 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัสของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

4.3.8 สรุปผลการทดลองตอนที่ 3

การศึกษาการเตรียมยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC สามารถยืนยันการเกิดการกราฟต์โดยการศึกษาโครงสร้างทางเคมี ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาการการกราฟต์ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ คาร์บอนิลที่ 1740 และไฮดรอกซิลที่ 1210 cm^{-1} การศึกษาสมบัติเชิงกลยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่า ค่า 100% ของ NR และ ENR สูงขึ้นเล็กน้อยหลังจากให้แสงยูวี และค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดของ NR และ ENR สูงขึ้นเล็กน้อยหลังจากให้แสงยูวี ความต้านทานต่อตัวทำละลาย โดยการบวมตัวและความสามารถในการละลายในน้ำ ENR-g-ACC มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น และ ENR-g-ACC มีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่สูงมากทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้ การศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่ายาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีเฟสที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อ

ระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง NR กับ ENR หลังจากการให้แสงยูวีพบว่ายาง ENR จะมีเฟสที่มีความขรุขระมากกว่ายาง NR เฟสขรุขระที่มากกว่าแสดงให้เห็นว่า ACC สามารถซึมเข้าไปภายในยาง ENR ได้มากกว่ายาง NR เนื่องมาจากยาง ENR มีหมู่อิพอกไซด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับ ACC สมบัติทางความร้อนของ ENR-g-ACC ดีกว่า NR-g-ACC การวัดมุมสัมผัสหลังจากให้แสงยูวีเป็นระยะเวลา 60 นาที พบว่าค่ามุมสัมผัสของ NR และ ENR มีค่าลดลง และค่ามุมสัมผัสของ ENR-g-ACC มีค่าน้อยกว่า NR-g-ACC สำหรับสูตรที่ดีที่สุดคือ ENR-g-ACC ที่ฉายแสงยูวีเป็น60 นาที

4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นพอลิเมอร์ผสม

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA รวมไปถึงการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยางธรรมชาติ หลังจากศึกษาปัจจัยต่างๆแล้วนั้นเพื่อให้เห็นผลได้ชัดเจนขึ้นจึงนำสมบัติต่าง ๆ ที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาตั้งแต่ 4.1-4.3 มาเปรียบเทียบผลเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปดัดแปรต่อในหัวข้อที่ 4.5 และ 4.6 ต่อไป

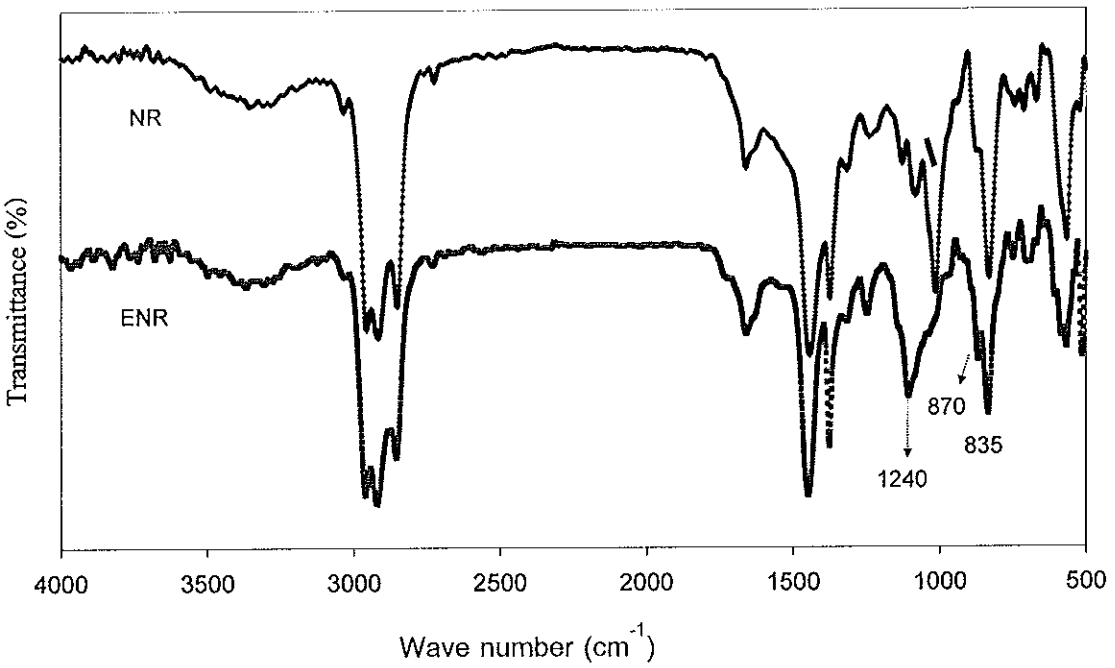
4.4.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมเพื่อเป็นการยืนยันปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้น โดยมีเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างทางเคมี ได้แก่ 1) เทคนิค ATR-FTIR และ 2) เทคนิค XRD โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ต่อไปนี้

4.4.1.1 โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR

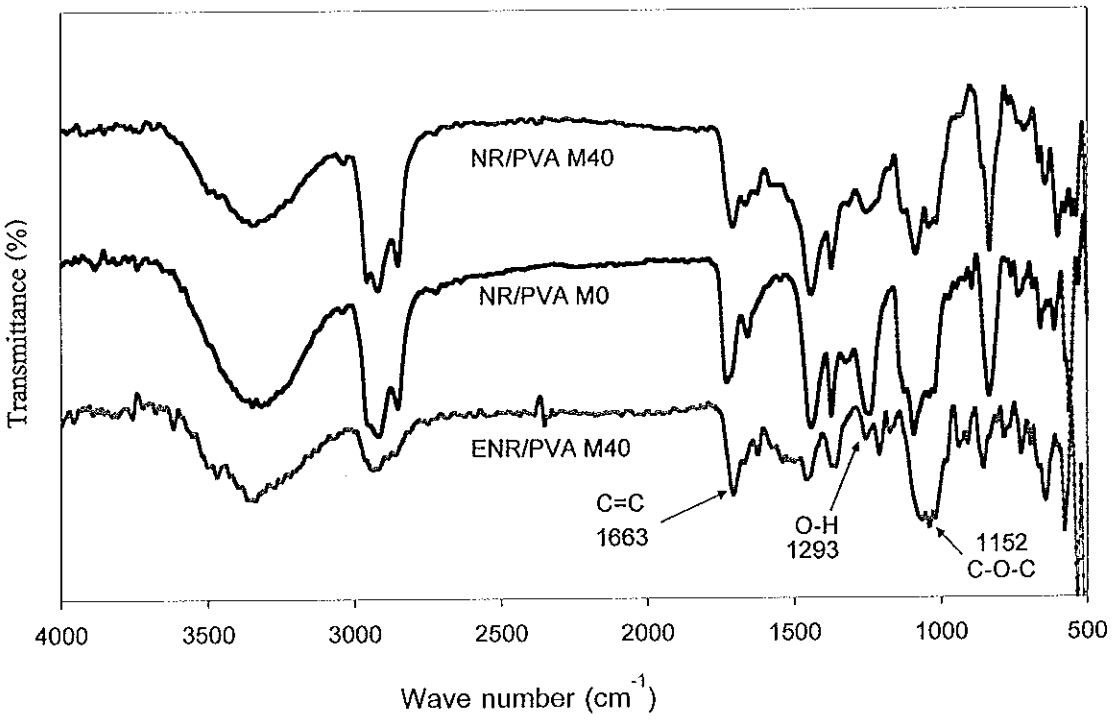
การยืนยันความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีในยาง NR ภายหลังจากการดัดแปรโครงสร้างเป็นยาง ENR สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.117 และการเปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.118

เปรียบเทียบสเปคตราอินฟราเรดของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ดังรูปที่ 4 . 1 17 พบว่าหลังจากดัดแปรยางธรรมชาติเป็นยางธรรมชาติอิพอกไซด์ จะมีพีคปรากฏที่ตำแหน่ง 870 และ 1240 ซึ่งเป็นตำแหน่งวงแหวนออกซิเรนที่เกิดขึ้นมาหลังจากการดัดแปร (Heping Yu *et al.*, 2008) เป็นการยืนยันว่าสามารถเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ได้สำเร็จ



รูปที่ 4.117 เปรียบเทียบสเปคตราของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์

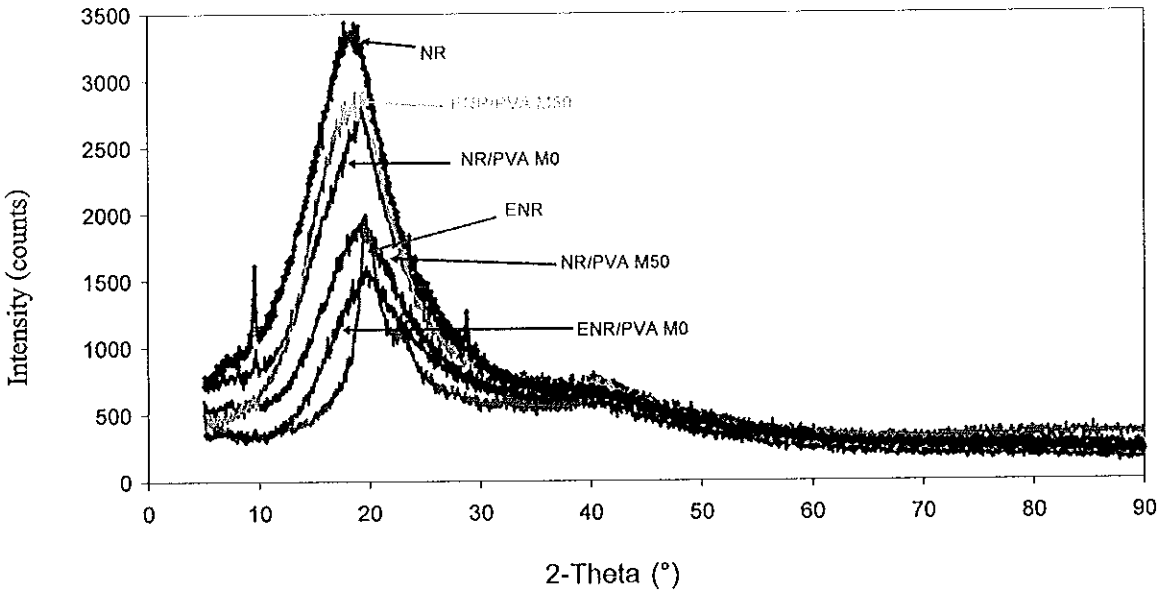
เปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ดังรูปที่ 4.118 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% มีการเกิดขึ้นของหมู่เอสเทอร์ที่ตำแหน่ง 1663 cm^{-1} (C=C stretching of maleic acid ester) และ 1152 cm^{-1} (C-O-C stretching of maleic acid ester) (Majumdar and Adhikari, 2006) ซึ่งเป็นการยืนยันการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นของกรดมาลีอิคกับ PVA และไฮดรอกซิลที่ 1293 cm^{-1} (Gohil *et al.*, 2006) ซึ่งพีคที่ตำแหน่งนี้ของ NR/PVA M0 จะปรากฏเด่นชัดที่สุดเนื่องจากพอลิเมอร์ผสมไม่มีการใส่กรดมาลีอิค สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีพีคที่ตำแหน่งปรากฏอยู่น้อยซึ่งเป็นการยืนยันว่ามีการเชื่อมขวางเกิดขึ้นจริง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.49 ระหว่างกรดมาลีอิคกับ PVA



รูปที่ 4.118 เปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA

4.4.1.2 โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค XRD

เปรียบเทียบความเข้มข้นของพลังงานกับมุม 2-Theta ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ดังรูปที่ 4.119 พบว่ามีผลึกของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 40° ที่ลดลงเนื่องจากการเชื่อมขวางของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับกรดมาลีอิค



รูปที่ 4.119 ผล XRD pattern ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA

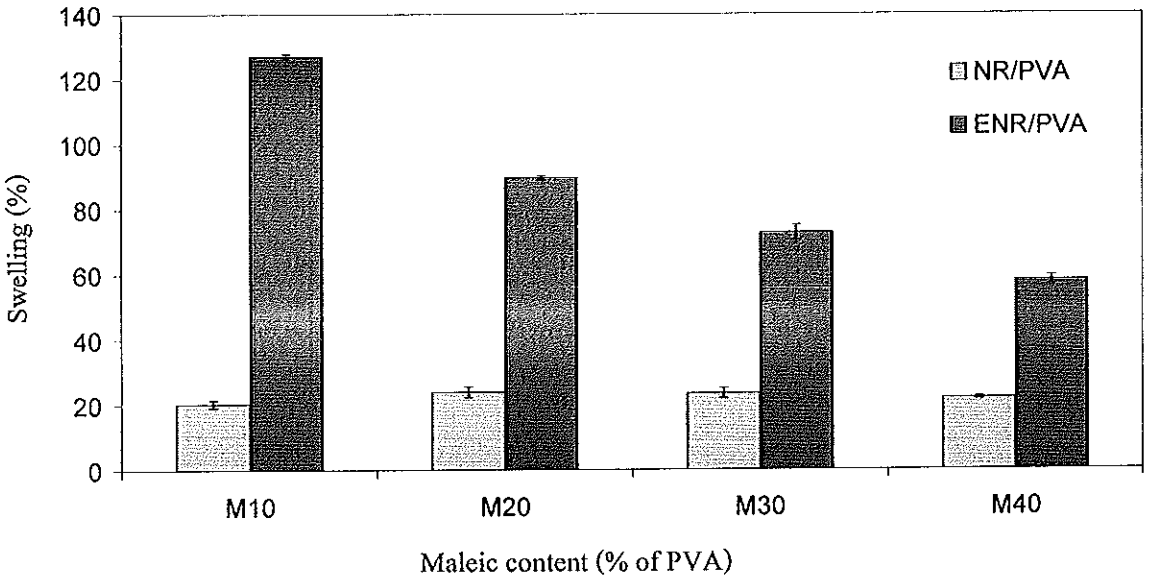
4.4.2 ความต้านทานต่อตัวทำละลาย

การศึกษาสมบัติทางด้านความทนทานต่อตัวทำละลาย เพื่อเป็นการตรวจสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการดัดแปร โดยทำการศึกษาในตัวทำละลาย คือ น้ำและโทลูอีน ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองต่าง ๆ ดังหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.4.2.1 การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำ

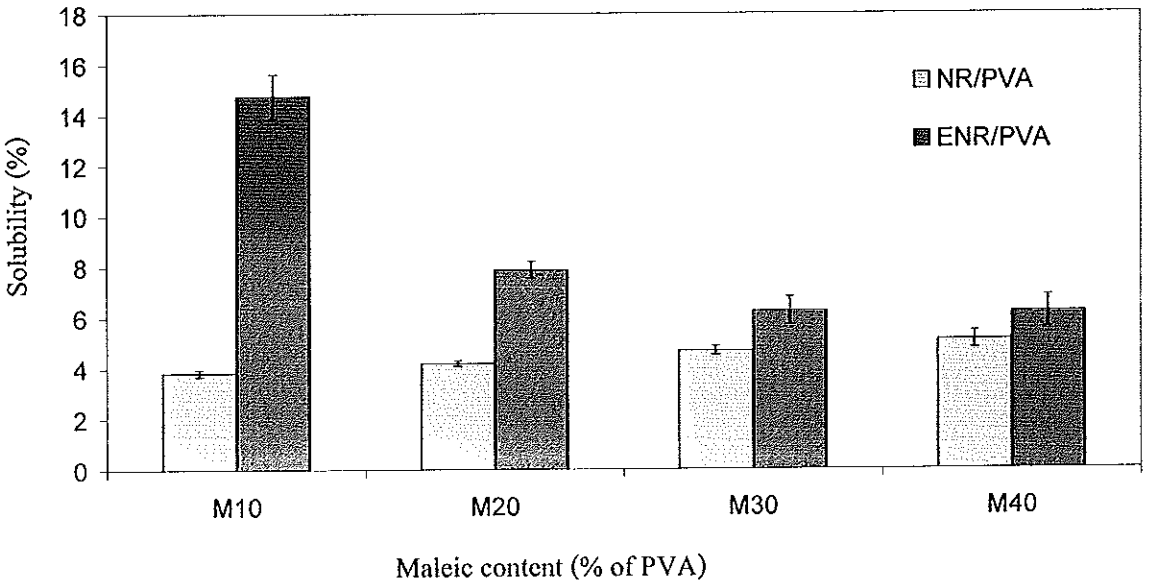
ทำการเปรียบเทียบการบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA โดยการแปรปริมาณกรดมาลีอิคตั้งแต่ 0-40 % ของ PVA หลังการเชื่อมขวาง ซึ่งมีผลการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.120 และ 4.121

การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 % ดังรูปที่ 4.120 พบว่าการบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มากกว่า NR/PVA เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วทั้ง 2 ส่วนคือส่วนของยาง ENR และ PVA จึงมีส่วนที่มีความชอบน้ำมากกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาณกรดมาลีอิคที่เพิ่มขึ้นจะเห็นว่าการบวมตัวในน้ำมีค่าลดลงเนื่องจากการเชื่อมโยงระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิคดังที่กล่าวมาแล้วซึ่งการเชื่อมขวางนี้ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ใน PVA ลดลง



รูปที่ 4.120 การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 %

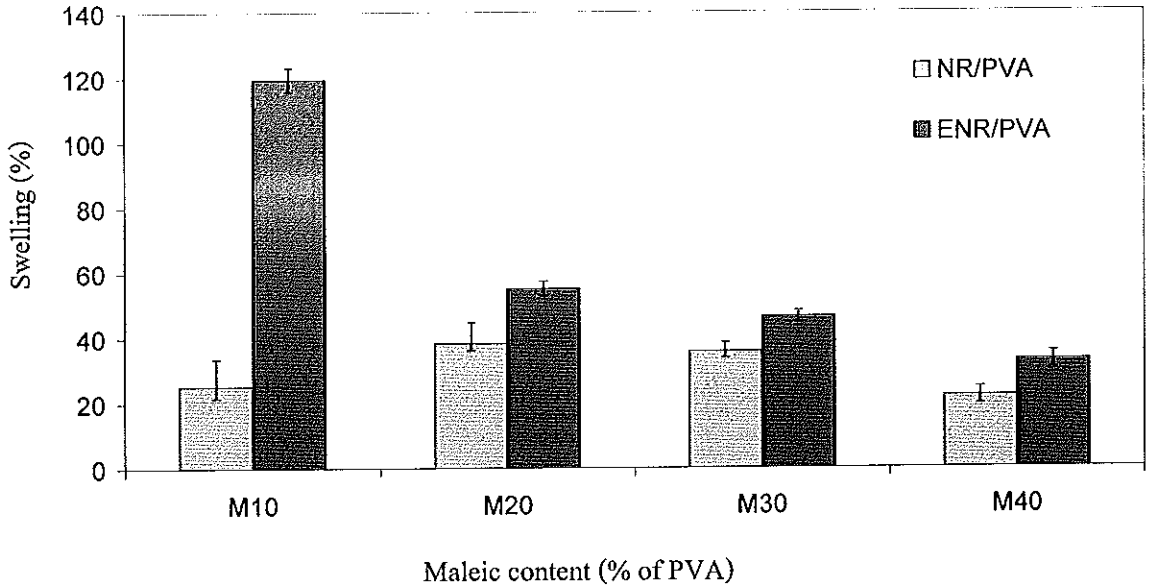
เปรียบเทียบความสามารถในการละลายน้ำของ NR/PVA และENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 – 40 % ซึ่งความสามารถในการละลายน้ำแสดงถึงส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ถูกละลายออกไป ดังรูปที่ 4.121 พบว่าความสามารถในการละลายน้ำของ ENR/PVA มากกว่า NR/PVA และปริมาณกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้นความสามารถในการบวมตัวในน้ำมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.120 กล่าวคือพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการบวมตัวในน้ำมากกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA การบวมตัวในน้ำที่มากกว่าทำให้มีโอกาสที่พอลิมอร์ผสมจะถูกละลายได้มากกว่า



รูปที่ 4.121 ความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 – 40 %

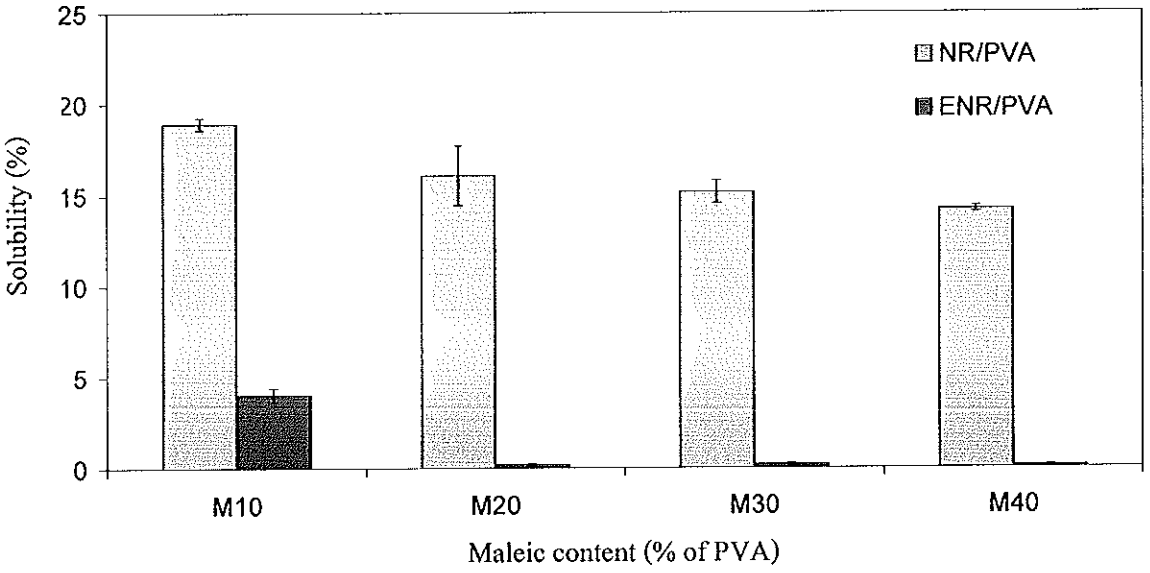
4.4.2.2 การบวมตัวและการละลายในโทลูอีน

ทำการเปรียบเทียบการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และENR/PVA โดยการแปรปริมาณกรดมาลีอิคตั้งแต่ 0-40 % ของ PVA หลังการเชื่อมขวางซึ่งมีผลการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.122-4.123



รูปที่ 4.122 การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 %

จากรูปที่ 4.122 และรูปที่ 4.123 เปรียบเทียบการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีน ได้ผลที่สอดคล้องกัน กล่าวคือในรูปที่ 4.122 พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการบวมตัวในโทลูอีนมากกว่า NR/PVA เนื่องจากส่วนที่สามารถบวมตัวและละลายในโทลูอีนได้คือส่วนของยางที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เมื่อมีการละลายโทลูอีนมาก จึงทำให้มีส่วนที่บวมตัวลดลง

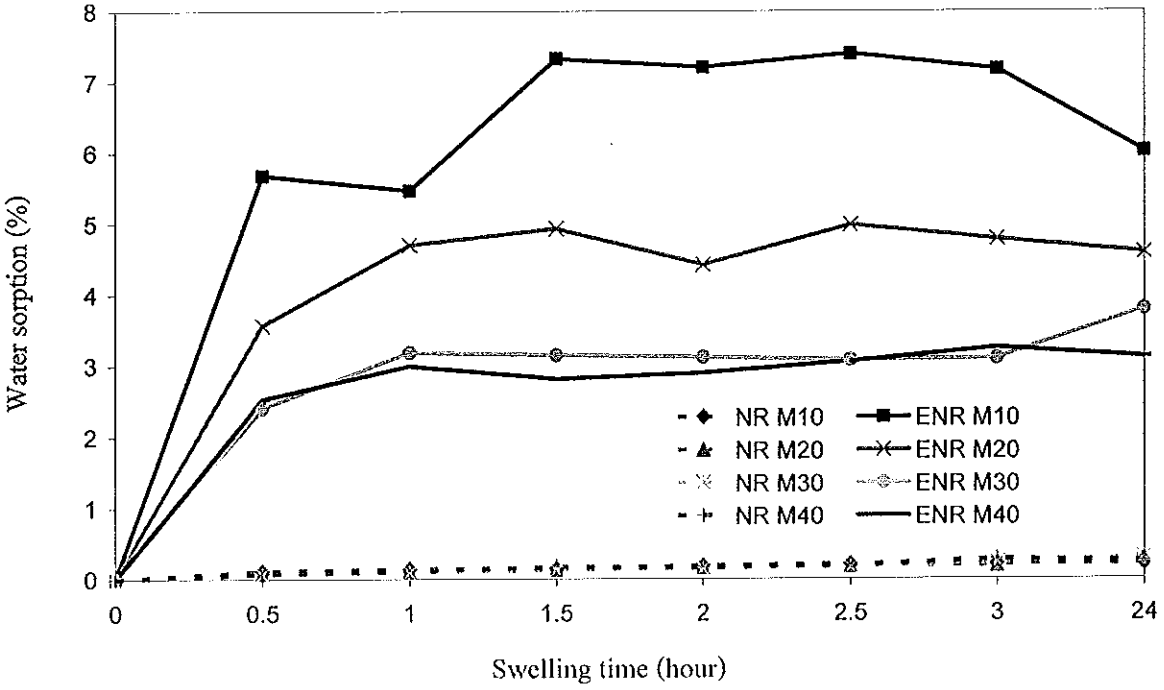


รูปที่ 4.123 ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40 %

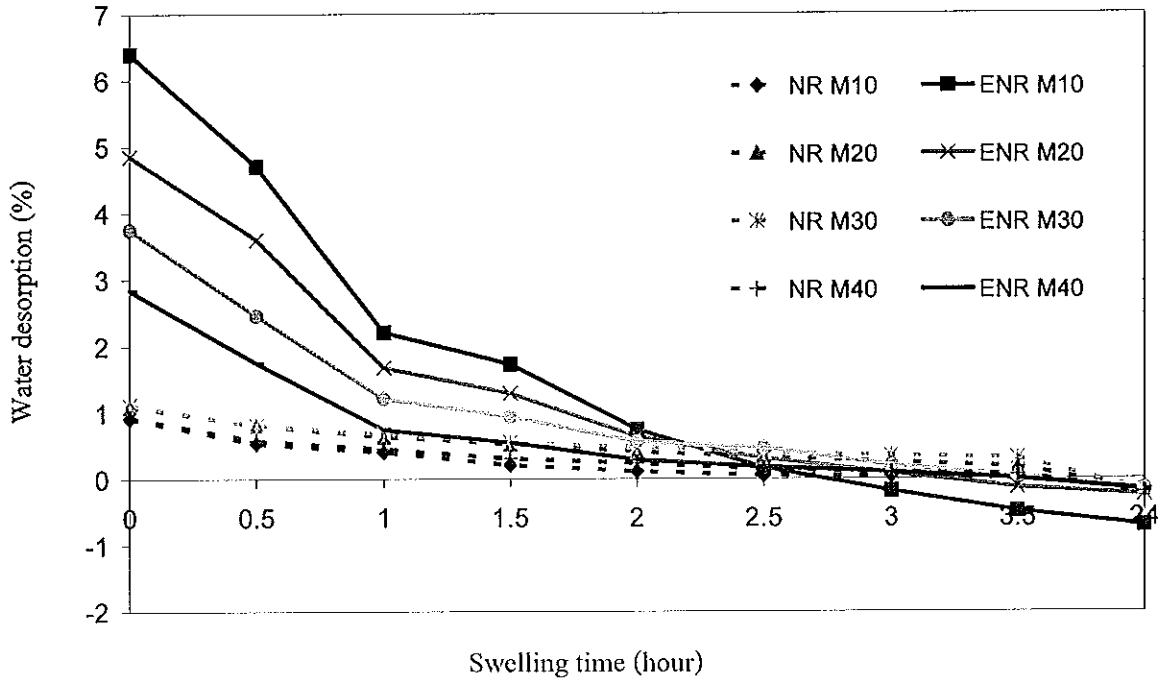
4.4.2.3 การทดสอบการดูดซับ (sorbtion) และการคายออก (desorbtion) ในน้ำและโทลูอีนที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 4.124 และรูปที่ 4.125 เปรียบเทียบการดูดซับและการคายออกของน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 10-40% พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการดูดซับน้ำได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความเป็นขั้วมากกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA (จากการทดสอบวัดมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA เท่ากับ 47.97 และพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เท่ากับ 72.96) และปริมาณการดูดซับน้ำลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น สำหรับการคายออกของน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีการคายออกของน้ำที่เร็วในช่วงแรกโดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่มีการดูดซับน้ำมากจึงมีการคายออกของน้ำที่มากตามไปด้วย และเมื่อระยะเวลาการคายออกของน้ำที่เพิ่มขึ้นพอลิเมอร์ผสมมีค่าติดลบ

เนื่องมาจากมีส่วนที่ละลายออกไป โดยหลังจากที่เพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางมากขึ้นจะเห็นได้ว่า พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีค่าติดลบที่น้อยมาก

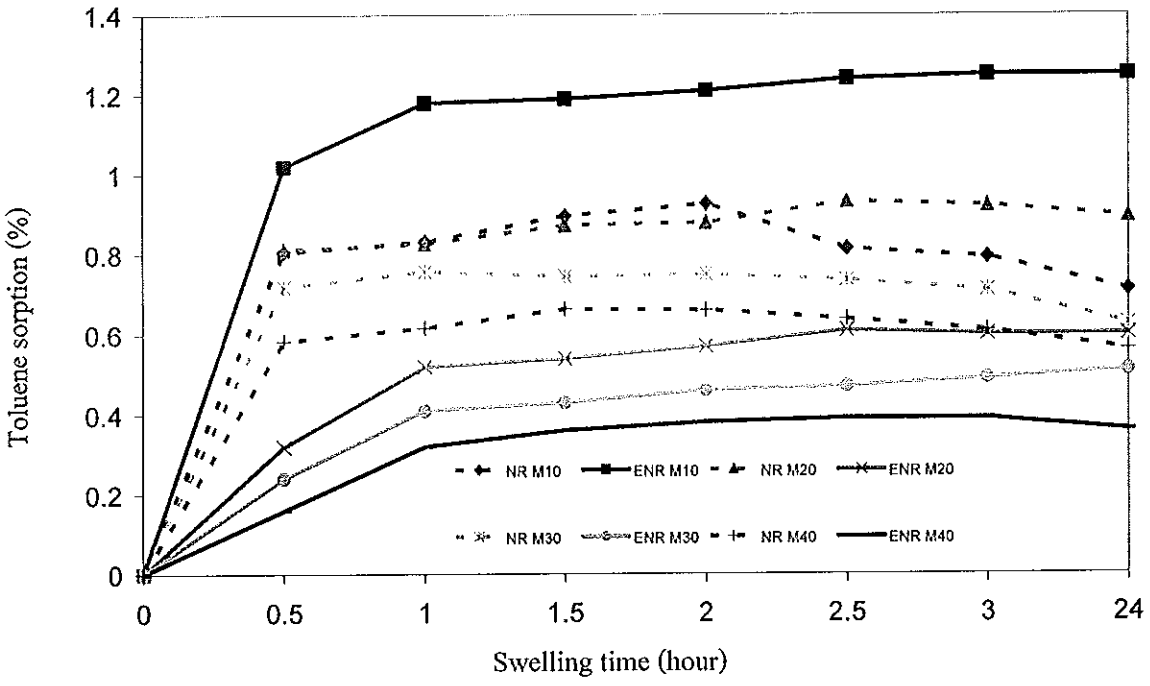


รูปที่ 4.124 การดูดซับของน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA

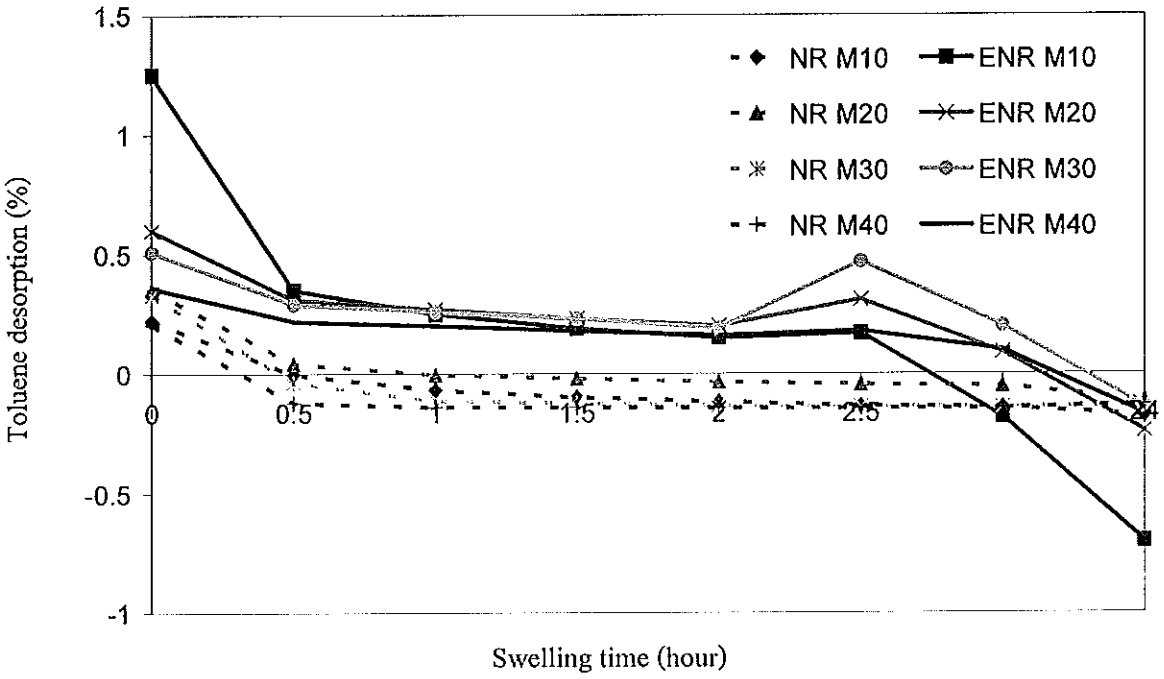


รูปที่ 4.125 การคายออกของน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA

จากรูปที่ 4.126 และ 4.127 เปรียบเทียบการดูดซับและการคายออกของโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 10-40% พบว่าปริมาณการดูดซับโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 10% มีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA แต่หลังจากใช้สารเชื่อมขวางในพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 20% ขึ้นไป จะเห็นว่าค่าการดูดซับโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าลดลงเมื่อปริมาณกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้น สำหรับการทดสอบการคายออกของโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการคายออกที่เร็วกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA สำหรับที่ระยะเวลาการคายออกของโทลูอีนที่ 24 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีค่าการคายออกของโทลูอีนติดลบเป็นการแสดงถึงการมีส่วนที่ละลายออกไปโดยค่าติดลบมากแสดงว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีส่วนที่ละลายออกไปมาก เมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีการติดลบน้อยลงคือการมีส่วนที่ละลายออกไปน้อยลง



รูปที่ 4.126 การดูดซับของโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA



รูปที่ 4.127 การคายออกของโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA

4.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

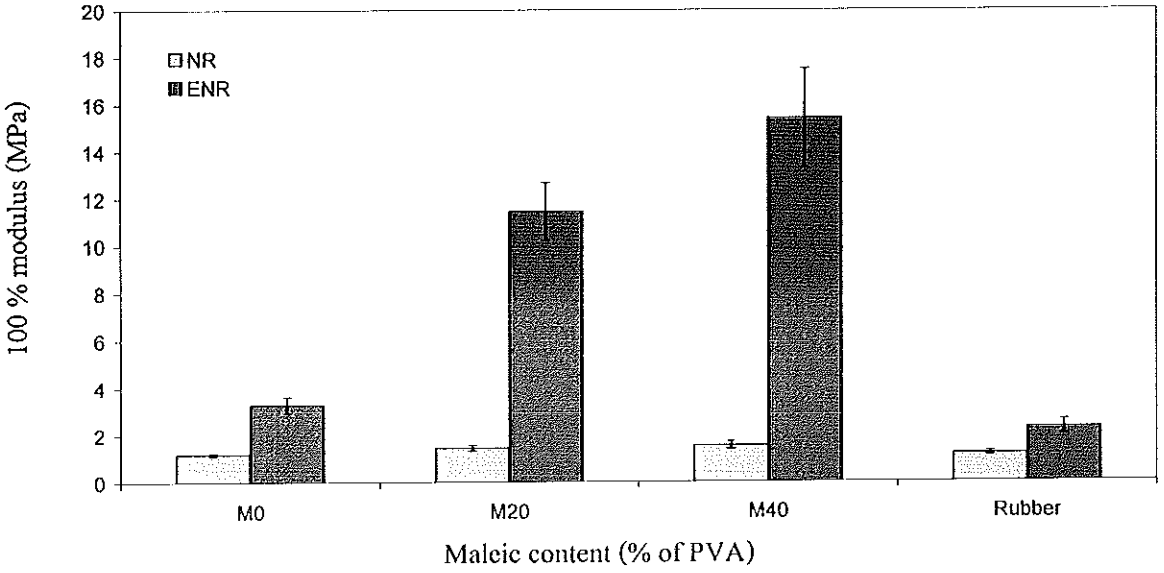
การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน เพราะโดยทั่วไปเราไม่สามารถทำนายสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ได้โดยอาศัยความรู้จากโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีได้อย่างแม่นยำ เช่น การคำนวณความแข็งแรงโดยอาศัยความรู้พื้นฐานจากความแข็งแรงของพันธะ และแรงระหว่างโมเลกุล เพราะฉะนั้นการทดสอบสมบัติเชิงกลจึงเป็นวิธีการที่ดีสำหรับศึกษาถึงสมบัติและความเป็นไปได้ในการนำเอาพอลิเมอร์ผสมไปใช้งาน

4.4.3.1 100 % มอดุลัส

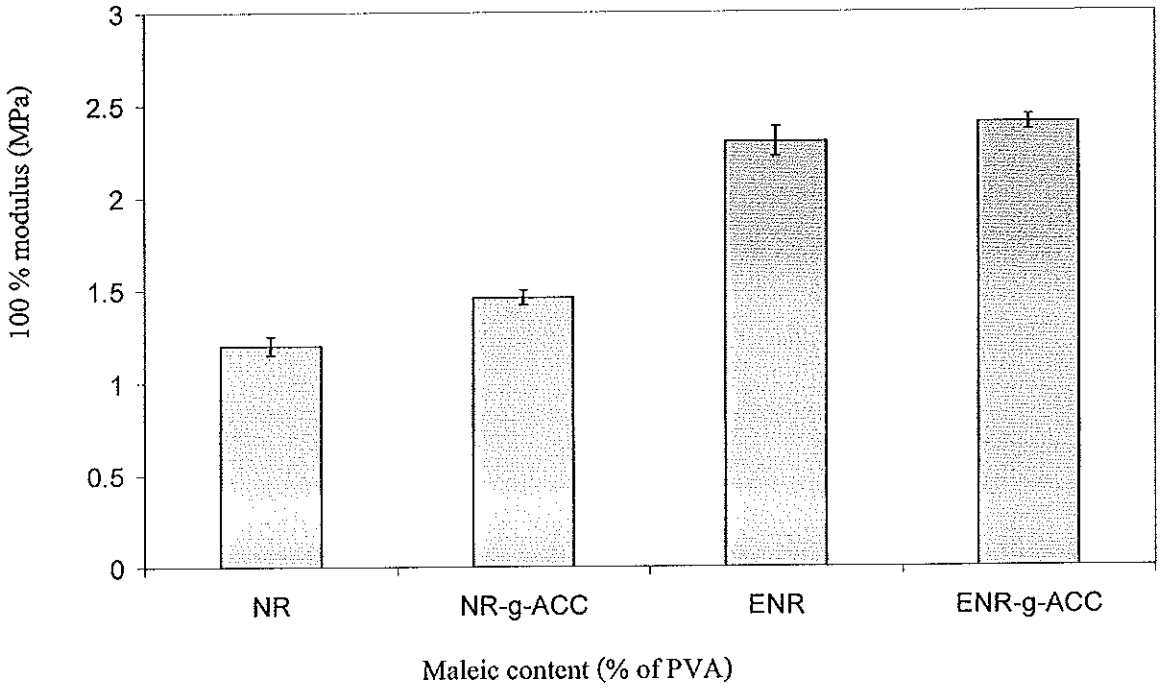
เปรียบเทียบค่า 100 % มอดุลัส ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40% ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.128 ค่า 100 % มอดุลัส ของ NRg-g-ACC และ ENR-g-ACC ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.129

จากรูปที่ 4.128 และรูปที่ 4.129 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เปรียบเทียบกับค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความเข้ากันได้ดี (จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM) และจากความเป็นขั้วของยาง ENR และ PVA ที่ใกล้เคียงกันโดยดูจากการทดสอบวัดมุมสัมผัส (ยาง ENR มีมุมสัมผัสเท่ากับ 59.63 ^{o}C

และ PVA มีมุมสัมผัสเท่ากับ 40 ^{o}C (Nana Li *et al.*, 2010)) สำหรับยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ที่ต่ำและเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหลังจากกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค เนื่องมาจากการกราฟต์เกิดเฉพาะที่ผิว



รูปที่ 4.128 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40%

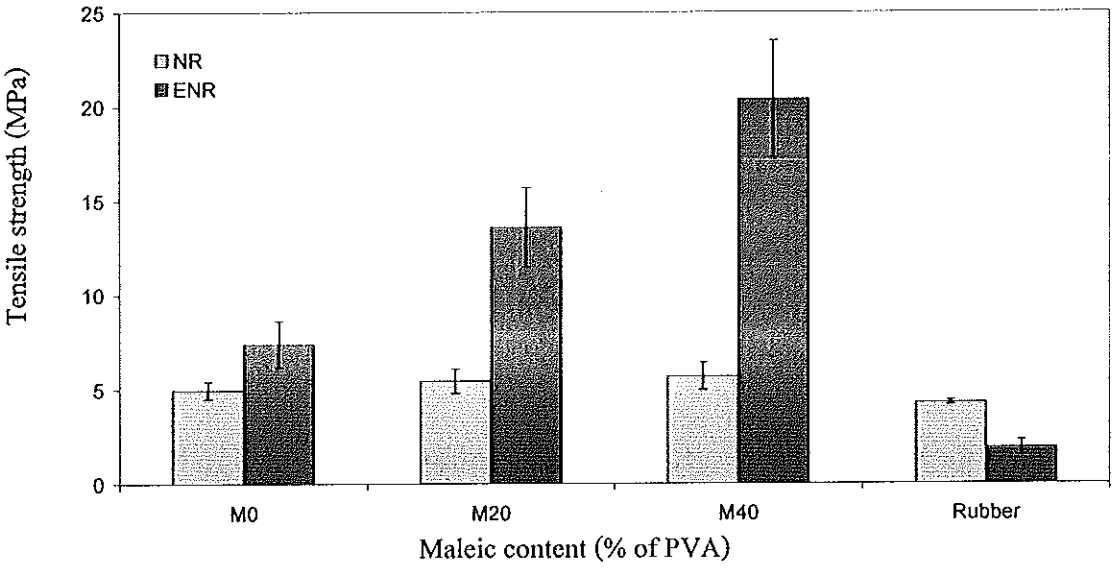


รูปที่ 4.129 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

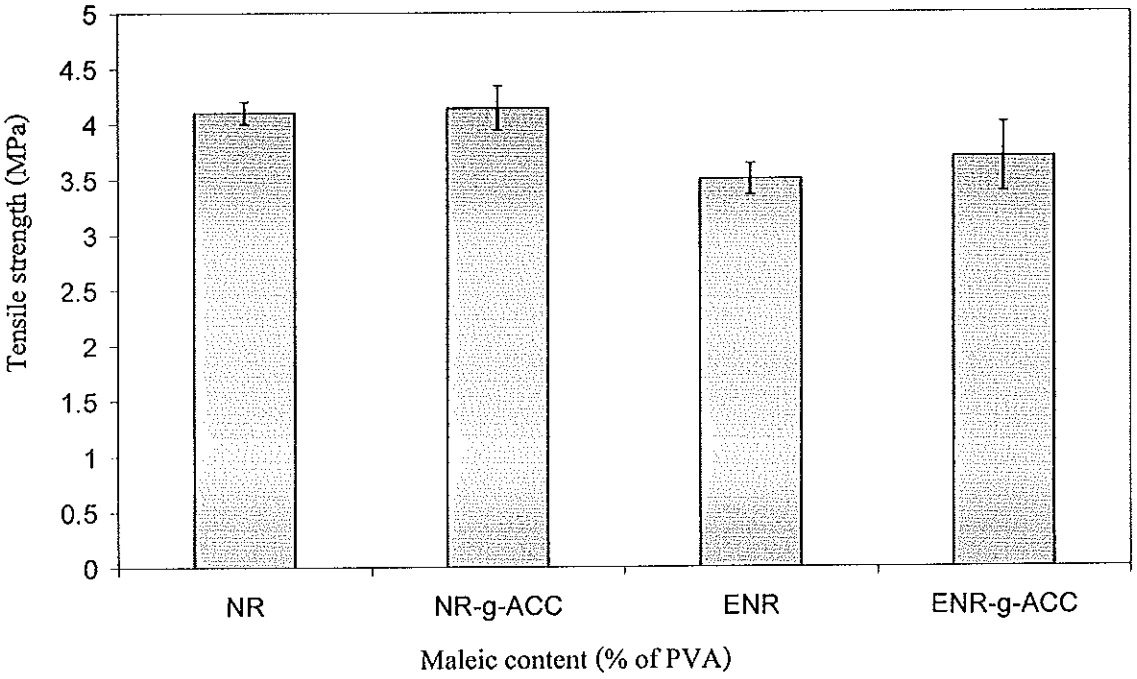
4.4.3.3 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40% ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.130 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.131

จากรูปที่ 4.130 และรูปที่ 4.131 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA กับค่าความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สูงกว่าของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับการทดสอบค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 %ในหัวข้อ 4.4.3.1



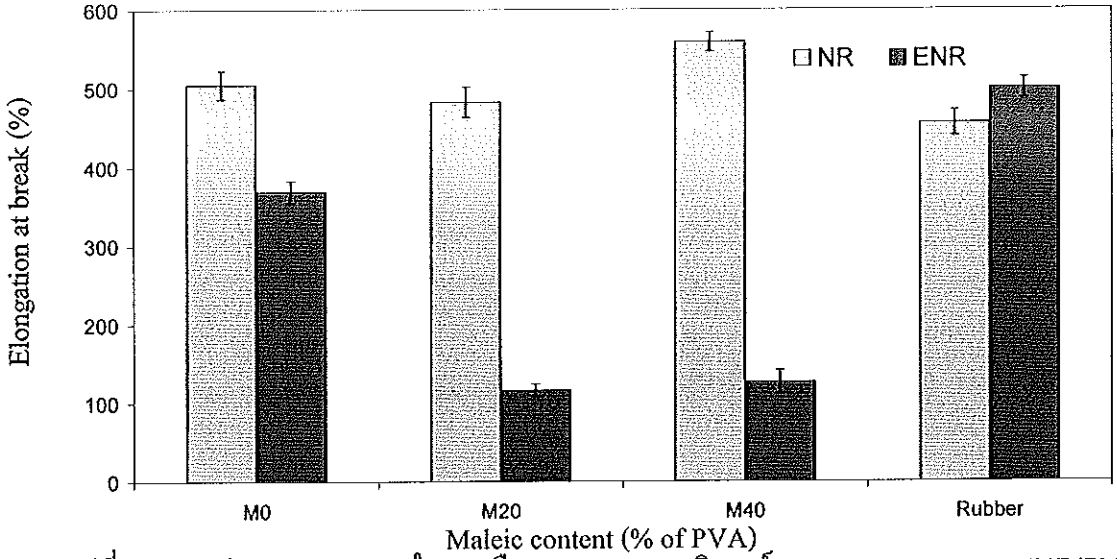
รูปที่ 4.130 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0-40%



รูปที่ 4.131 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

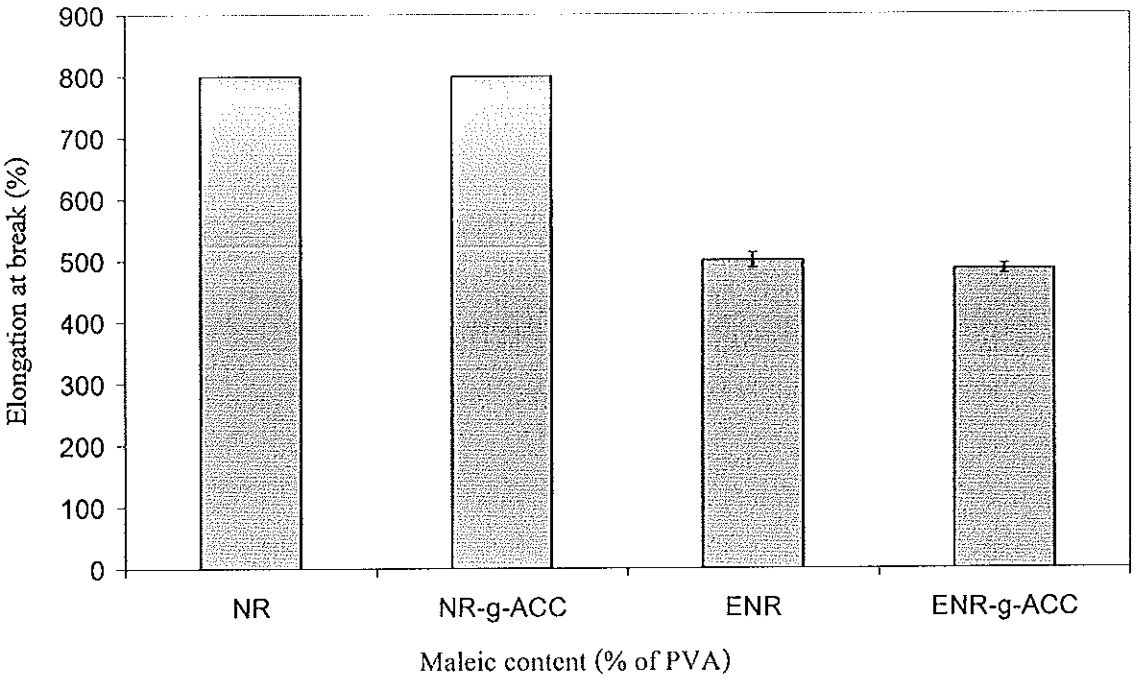
4.4.3.4 สมบัติด้านความสามารถในการยืด

เปรียบเทียบสมบัติด้านความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณเกรดมาลีอิค 0-40% ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.132 สมบัติด้านความสามารถในการยืดของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.133



รูปที่ 4.132 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณเกรดมาลีอิค 0-40%

การทดสอบค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เปรียบเทียบกับ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ดังรูปที่ 4.132 และ 4.133 พบว่ายาง NR-g-ACC รองลงมาคือ ENR-g-ACC ซึ่งมีค่าความสามารถในการยืดใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ส่วนพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าความสามารถในการยืดต่ำที่สุดเนื่องจากพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการการเชื่อมโยงระหว่างกรดมาลีอิคกับ PVA ในปริมาณมาก ทำให้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูง จึงแสดงพฤติกรรมของความเป็นพลาสติกมากกว่าความเป็นยาง (Mathew *et al.*, 2001) ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ความทนทานต่อแรงดึงสูงมีความสามารถในการยืดได้ต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่มีความทนทานต่อแรงดึงต่ำ



รูปที่ 4.133 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

4.4.3A การศึกษาผลของกลีเซอรอลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

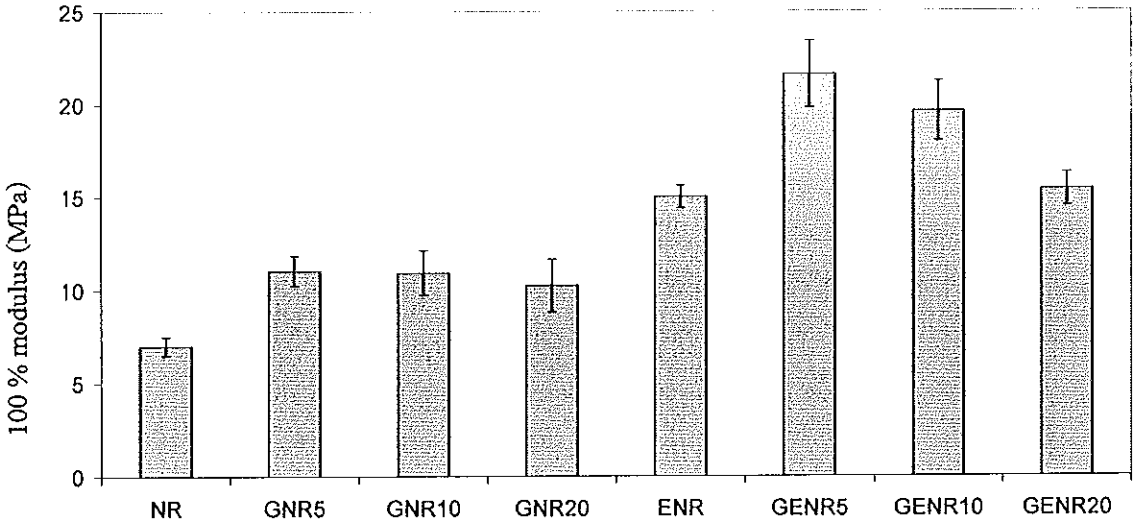
ทำการเพิ่มสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณสารเชื่อมโยง 40% โดยการเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 % ของน้ำหนักของแข็งทั้งหมด เปรียบเทียบกับที่ไม่เติมกลีเซอรอล ได้ผลการทดลองดังนี้

จากรูปที่ 4.134 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% หลังจากเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 % พบว่าค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการ

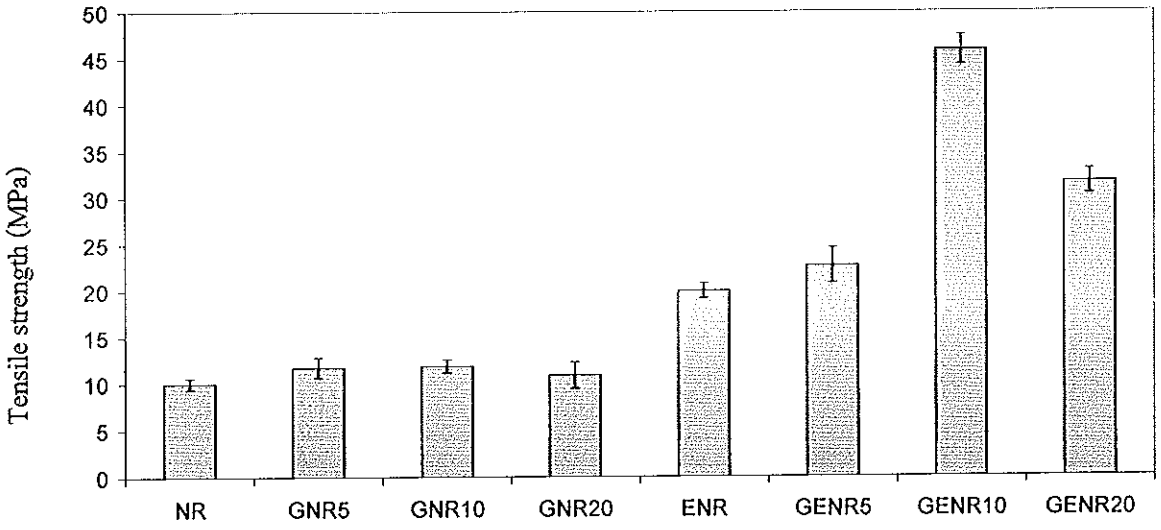
เติมกลีเซอรอล และค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สูงกว่า NR/PVA

จากรูปที่ 4.135 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% หลังจากเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 % พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการเติมกลีเซอรอล และค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สูงกว่า NR/PVA โดยเฉพาะการเติมกลีเซอรอลในพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ทำให้ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงถึง 45 MPa ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ใช้สารเชื่อมขวาง 60% ดังหัวข้อ 4.2.4.2

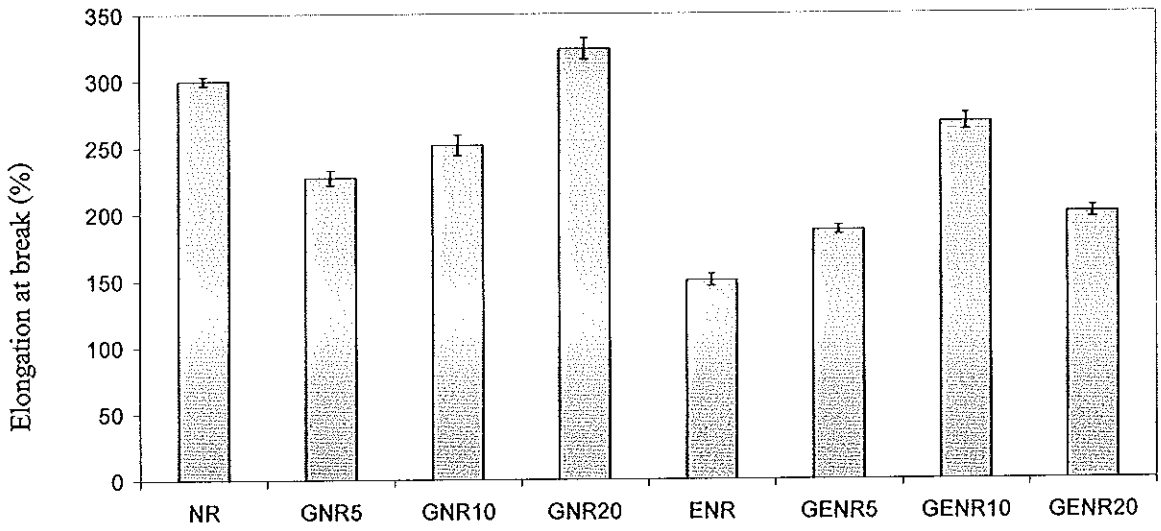
จากรูปที่ 4.136 ค่าความสามารถในการยืด ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% หลังจากเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 % พบว่าค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากการเติมกลีเซอรอล และค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA สูงกว่า ENR/PVA



รูปที่ 4.134 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% โดยเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 %



รูปที่ 4.135 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% โดยการเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 %



รูปที่ 4.136 ค่าความสามารถในการยืด (%) ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% โดยการเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 0-20 %

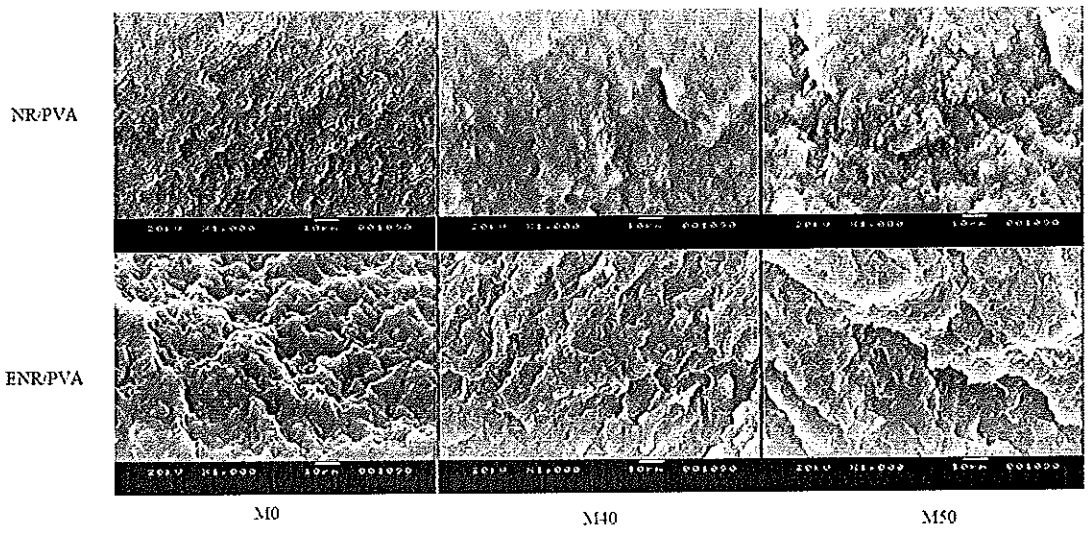
4.4.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เพื่อเป็นการตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด โดยในงานวิจัยครั้งนี้มีเทคนิคที่ใช้ในการเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA อยู่ 2 วิธีคือ 1) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM และ2) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย AFM

4.4.4.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA โดยแปรปริมาณกรด มาลีอิคที่ใช้เป็น 0 40 และ 50% โดยใช้เครื่อง JSM JEOL 2000 ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นตัวอย่างมาทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจน พื้นผิวที่ผ่านการทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจนแล้วมาทำการเคลือบด้วยทองก่อนที่จะนำมาทดสอบ

จากรูปที่ 4.137 เป็นภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 โดยเชื่อมขวางที่ 120 ° C เป็นเวลา60 นาที ที่กำลังขยาย 1000 พบว่า ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันหรือเป็นเฟสที่ต่อเนื่องกันไม่มีการแยกเฟส การใช้ปริมาณของมาลีอิคเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ความขรุขระเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกัน ซึ่งความขรุขระที่เพิ่มมากขึ้นนี้ เกิดขึ้นเนื่องมาจากการเชื่อมขวางของ PVA โดยมาลีอิค (Riyajan *et al.*, 2009) โดยจากรูปการเชื่อมโยงของ PVA ที่เกิดขึ้นจะมีการแจกแจง และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเฟสของยางNR ซึ่ง PVA ที่เกิดการเชื่อมขวางจะสังเกตได้จากลักษณะที่นูนขึ้นจากภาพที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA พบว่า ENR/PVA จะมีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องมากกว่าคือจะมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่านั่นเอง

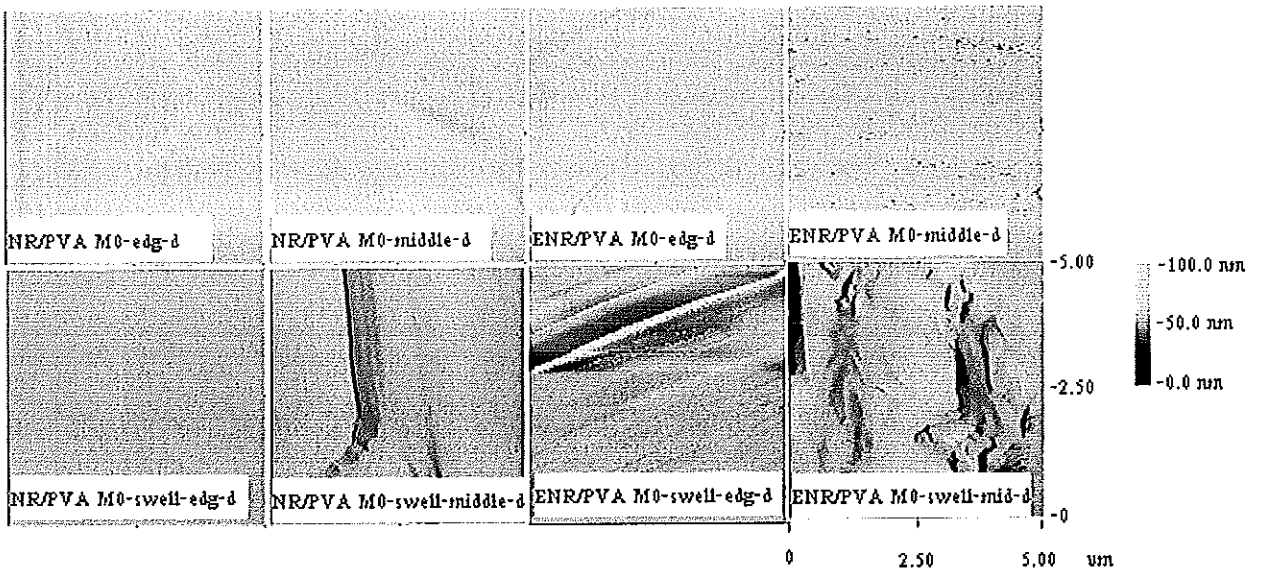


รูปที่ 4.137 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อีเล็คตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA A) M0 B) M20 C) M40 วัลคาไนซ์ที่ 120 ° C เป็นเวลา 60 นาที ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.4.4.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

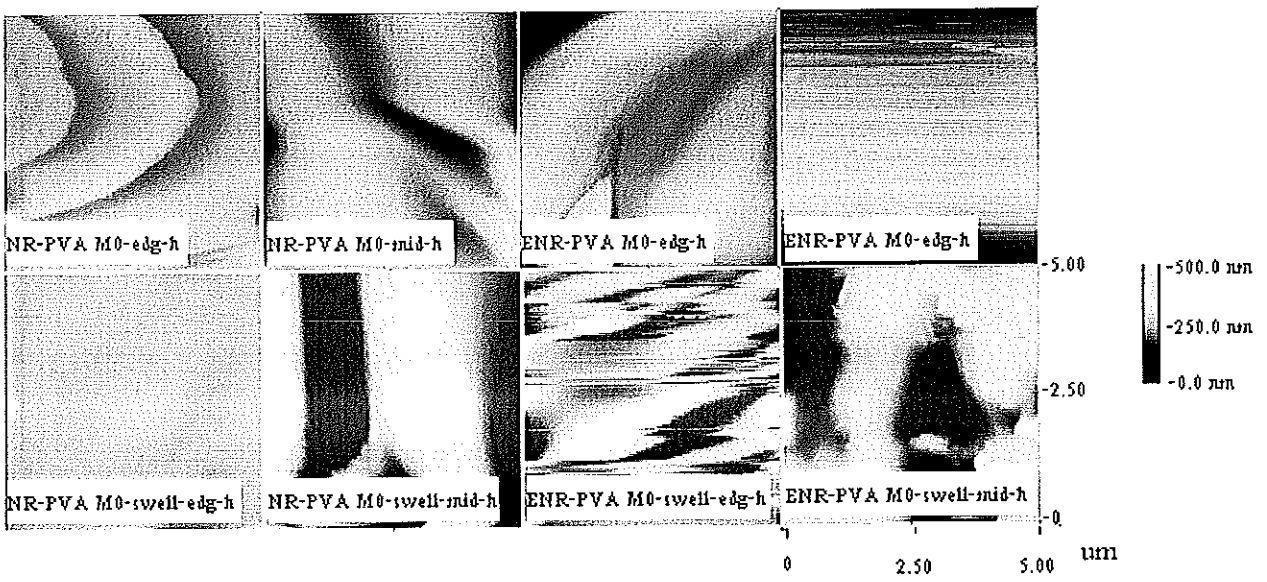
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA โดยแปรปริมาณเกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 0 และ 40% ทำการทดสอบเปรียบเทียบผล ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ ทำการทดสอบด้วยเครื่อง AFM โหมดที่ใช้ในการทดสอบมี 2 โหมดคือ ทดสอบแบบ deflection และทดสอบแบบ height และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่พื้นผิว (edge) กับภายในตัวอย่าง (middle)

จากรูปที่ 4.138 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M0 จากเครื่อง AFM ทดสอบแบบ deflection เปรียบเทียบก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ ซึ่งการทดสอบแบบ deflection เป็นการบ่งบอกแรงในแต่ละตำแหน่งของพื้นผิวของตัวอย่าง จากรูปจะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ก่อนการทดสอบการบวมตัวในน้ำ จะมีค่าแรงในแต่ละตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันเพราะพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ไม่มีการใช้สารเชื่อมโยง แต่หลังจากทดสอบการบวมตัวน้ำจะเห็นได้ว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ขอบ และตรงกลางของตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงไป จะสังเกตเห็นลักษณะเฟสที่แตกต่างกันเนื่องมาจากมีส่วนที่ละลายออกไป



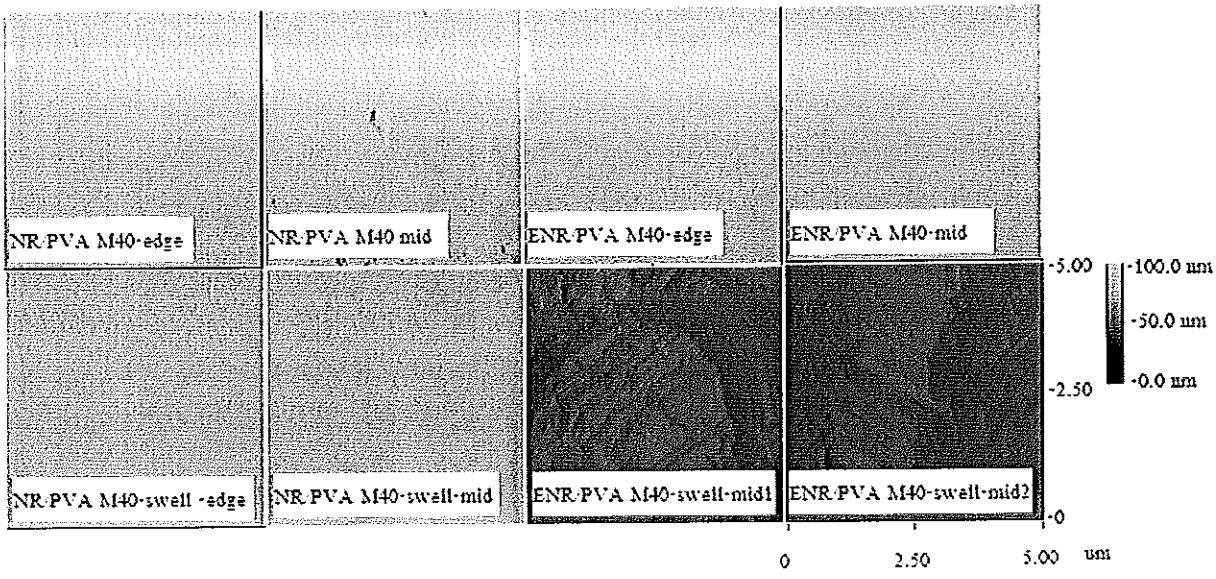
รูปที่ 4.138 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M0 จากเครื่อง AFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

จากรูปที่ 4.139 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M0 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ สำหรับการทดสอบแบบ height เป็นการดูระดับความสูงในแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีระดับความสูงที่แตกต่างกันมาก เป็นการบ่งบอกเฟสที่แตกต่างกันของเฟสของยาง และเฟสของ PVA โดยสามารถสังเกตเห็นเฟสที่แตกต่างอย่างชัดเจนในพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA หลังการทดสอบการละลายน้ำ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีส่วนที่ละลายน้ำออกไปเพราะพอลิเมอร์ผสมไม่มีการใช้สารเชื่อมโยง เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA หลังการทดสอบการละลายน้ำจะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดจะมีเฟสที่แตกต่างกันมากเหมือนกันแต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จะสามารถสังเกตเห็น ENR/PVANR/PVA



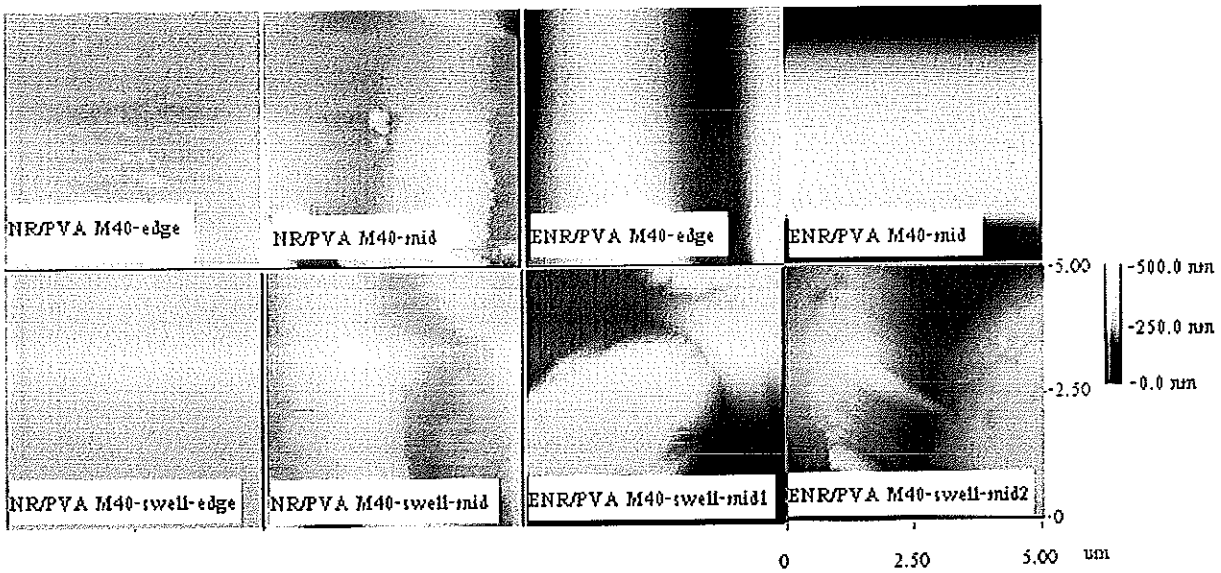
รูปที่ 4.139 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M0 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

จากรูปที่ 4.140 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 มีค่าแรงในแต่ละตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันแสดงให้ให้เห็นถึงความเข้ากันได้ดีของพอลิเมอร์ผสม และเมื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการทดสอบละลายน้ำพบว่าค่าแรงในแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวยังคงมีความใกล้เคียงกันไม่มีส่วนที่ละลายออกเนื่องจากพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดมีการเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิคในปริมาณ 40%



รูปที่ 4.140 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

จากรูปที่ 4.141 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA มีระดับความสูงที่แตกต่างกันน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA



รูปที่ 4.141 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

ตารางที่ 4.15 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ

Sample	Adhesion force (N.m)			
	EDGE		MIDDLE	
	Before swelling	After swelling	Before swelling	After swelling
NR/PVA M0	11.54	0	80.54	144.38
NR/PVA M40	19.99	17.55	153.81	5.27
ENR/PVA M0	6.11	4.38	166.22	168
ENR/PVA M40	0.19	1.61	36.41	117.88

จากตารางที่4.14 แสดงค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวม

ตัวในน้ำ พบว่าค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับตัวอย่างมีค่าต่ำ ณ ตำแหน่งบริเวณผิวของตัวอย่าง และมีค่าสูง ณ บริเวณภายในตัวอย่าง

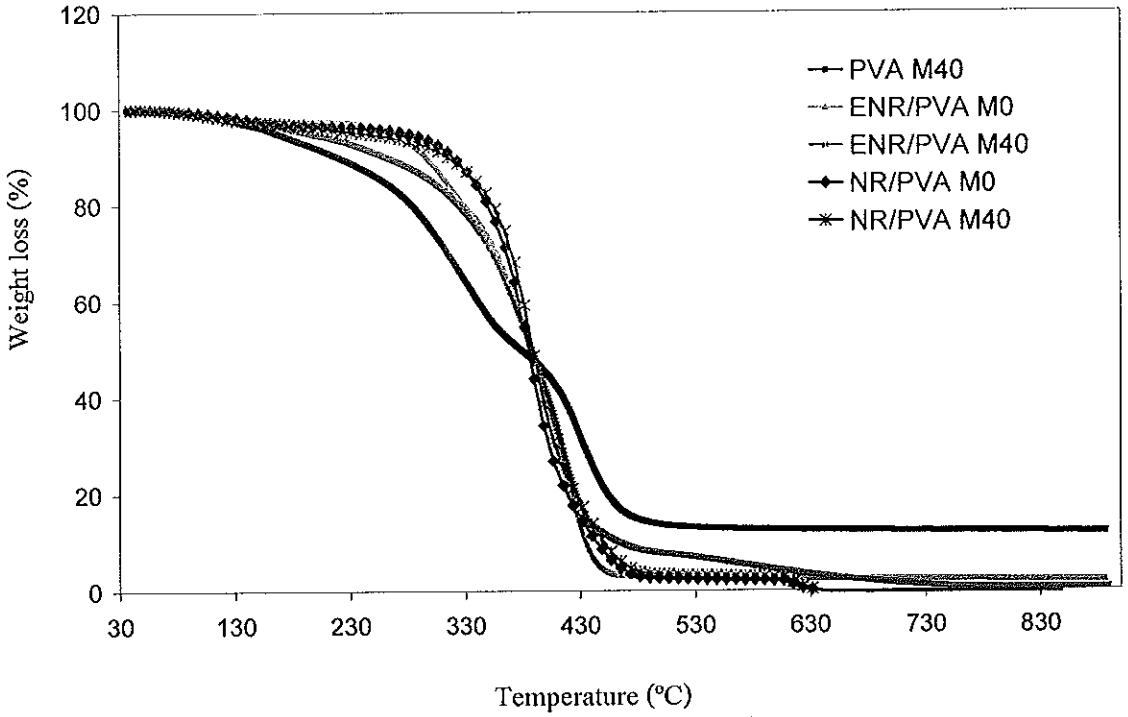
4.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เพื่อตรวจดูความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ในงานวิจัยครั้งนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 เทคนิคคือ 1) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA 2) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA และ3) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

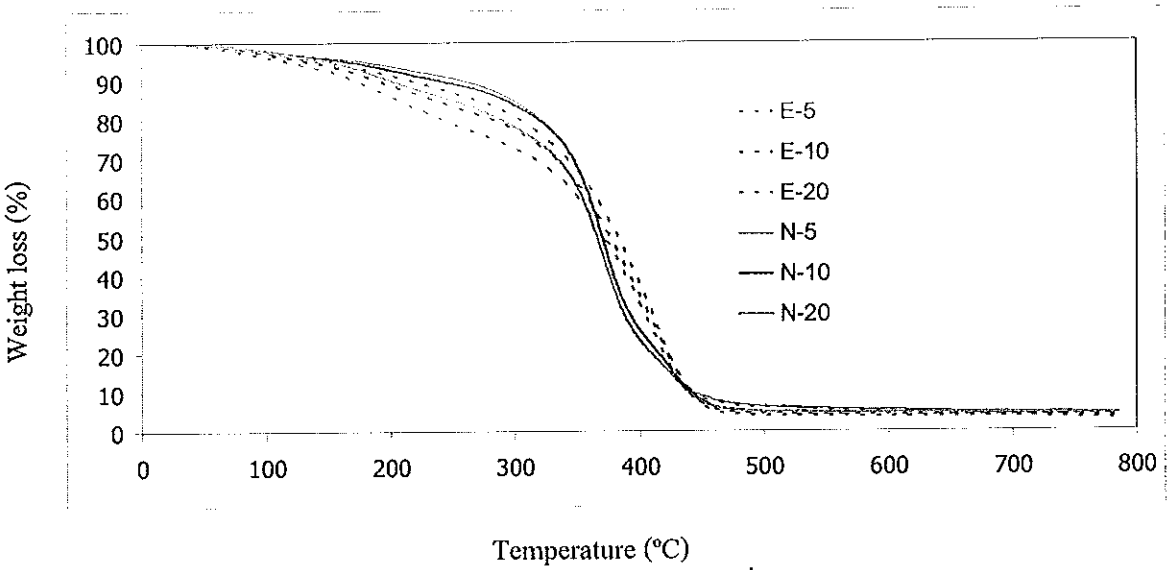
4.4.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริก

เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ด้วยเครื่อง TGA ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.142 และ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ดังรูปที่ 4.143

จากรูปที่ 4.142 และรูปที่ 4.143 เปรียบเทียบความทนทานต่อการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA กับ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่า พอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 และมากกว่าพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดที่ไม่มีสารเชื่อมขวาง แต่น้อยกว่า PVA สำหรับแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่อุณหภูมิของการสลายตัวทางความร้อนที่ต่ำ โดยต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA เนื่องจากแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีการกราฟต์เกิดขึ้นแค่ผิวของตัวอย่างเท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่า ENR/ACC มีความทนทานต่อความร้อนสูงกว่า NR-g-ACC เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า ENR-g-ACC เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ได้ดีกว่า NR-g-ACC



รูปที่ 4.142 สมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริกของพอลิเมอร์ผสม NR/PVAและ ENR/PVA

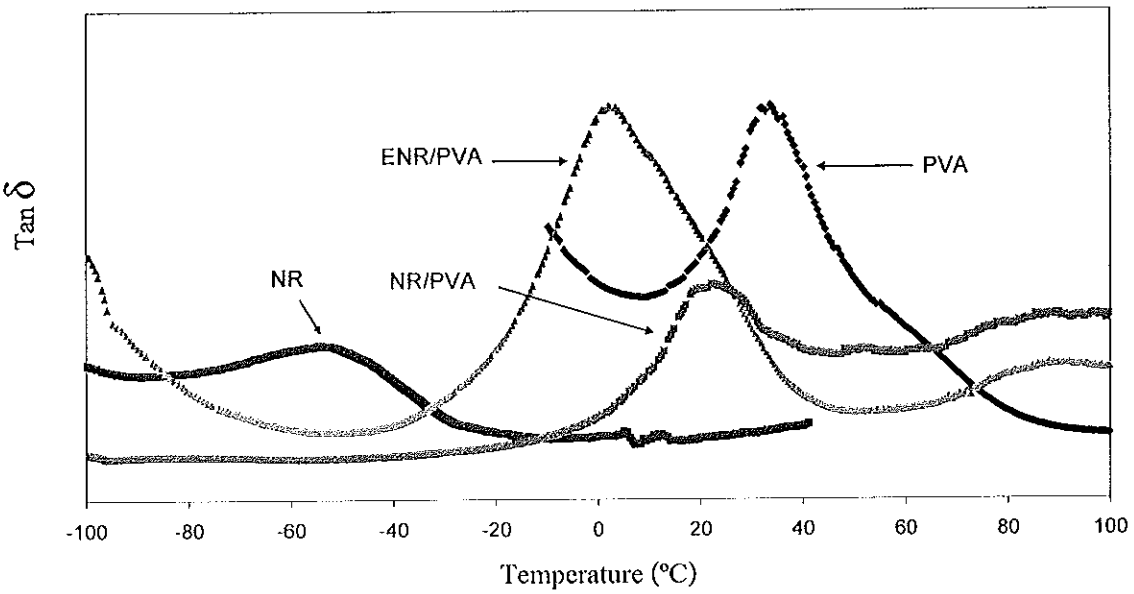


รูปที่ 4.143 สมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริกของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

4.4.5.2 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต

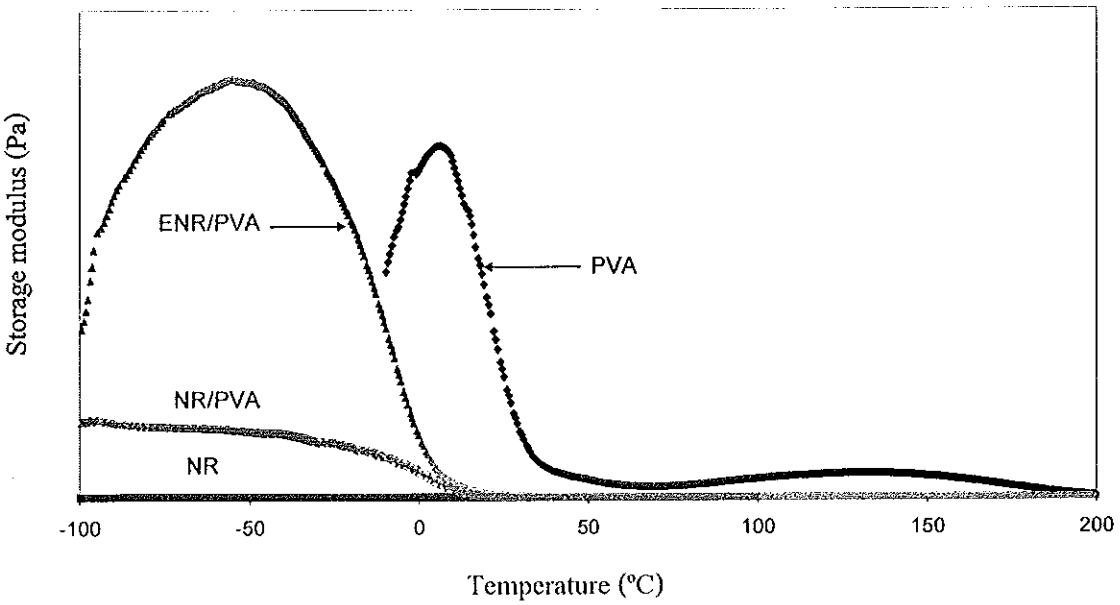
เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ด้วยเครื่อง DMTA ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.142

จากรูป 4.144 การเปรียบเทียบค่า Tan δ ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA M40 NR และ PVA พบว่ายาง NR จะมี T_g ที่ประมาณ -60 °C PVA จะมี T_g ที่ประมาณ 35 °C ส่วนพอลิเมอร์ผสม NR/PVA จะมี T_g ที่ประมาณ 20 °C และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มี T_g ที่ประมาณ 0 °C เห็นได้ว่าสามารถผสมพอลิเมอร์ระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA จะแสดง T_g เพียงค่าเดียวที่ประมาณ 20 °C และ0 °C ตามลำดับ โดยพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จะแสดง T_g ที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA



รูปที่ 4.144 Tan δ กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA NR และ PVA

จากรูปที่ 4.145 ค่ามอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA M40 NR และ PVA พบว่าค่ามอดุลัสสะสมของยาง NR มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ PVA สำหรับค่ามอดุลัสสะสมเมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เมื่อใช้ปริมาณกรดมาลีอิค 40% พบว่า พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่า NR/PVA และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ยังมีค่ามอดุลัสสะสมมากกว่า PVA แสดงให้เห็นการผสมเข้ากันที่ดีเนื่องจากมีการเชื่อมโยงของ PVA กับกรดมาลีอิค ตามปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.49

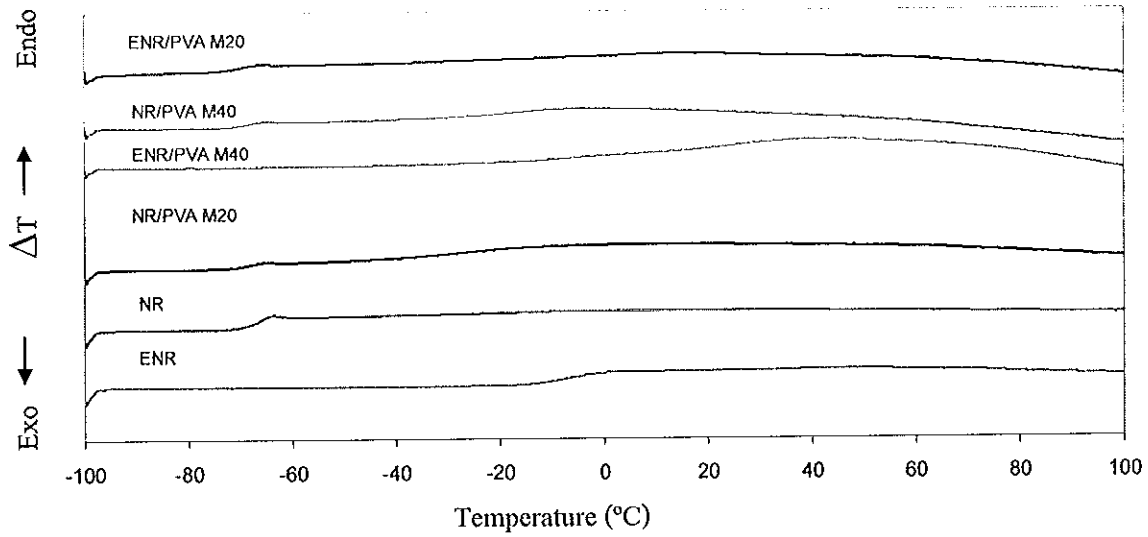


รูปที่ 4.145 มอดุลัสสะสมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA NR และ PVA

4.4.5.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ด้วยเครื่อง DSC ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.145

จากรูปที่ 4.146 เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เปรียบเทียบกับยาง NR และ ENR เพื่อตรวจดูอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M20 NR/PVA M40 และENR/PVA M20 จะแสดง T_g ที่ประมาณ -67 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเดียวกันกับยาง NR แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมยังคงคุณสมบัติของความเป็นยางอยู่ โดยยาง ENR ที่มี T_g ที่ประมาณ -8 °C แสดงให้เห็นว่าหลังจากดัดแปลงยาง NR เป็นยาง ENR ทำให้ค่า T_g สูงขึ้น สำหรับพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ไม่อาจวิเคราะห์ค่า T_g จากเทคนิคนี้ได้ เนื่องจากไม่อาจเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่สามารถสังเกตได้ แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA ค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีค่าประมาณ 0 °C



รูปที่ 4.146 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เปรียบเทียบกับ ENR

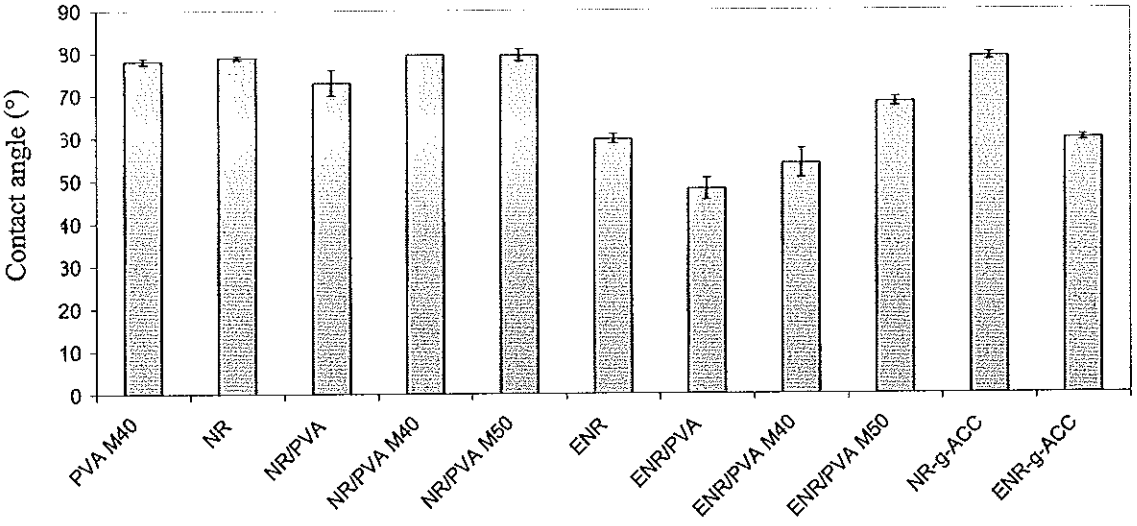
4.4.6 การวัดมุมสัมผัส

ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสมNR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% PVA ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.147

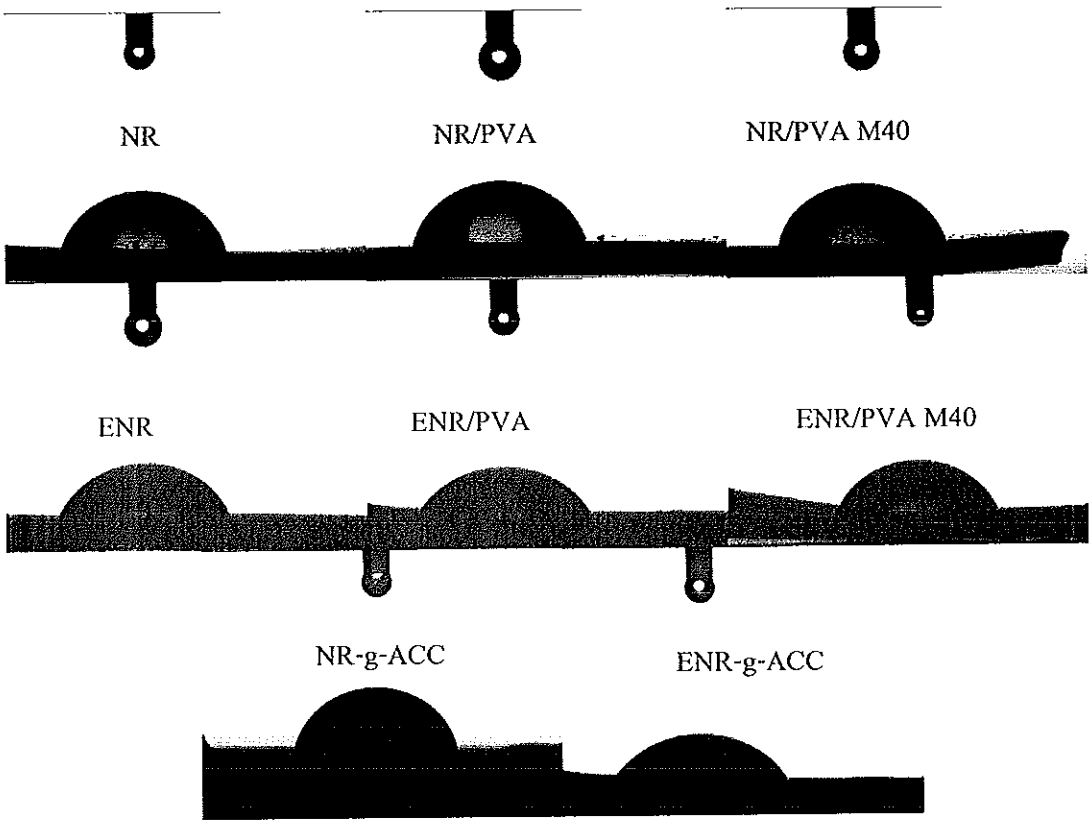
จากรูปที่ 4.147 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% NR ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จะมีค่ามุมสัมผัสน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่นๆ โดยค่ามุมสัมผัสน้อยเป็นการแสดงถึงชอบน้ำมาก ดังนั้นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จึงชอบน้ำมากกว่าสูตรอื่นๆ สำหรับการเปรียบปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณกรดมาลีอิคเชื่อมขวางในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงเนื่องจากว่าปริมาณกรดมาลิอิคมากขึ้นทำให้การเชื่อมขวางระหว่าง PVA มีมากขึ้น ทำให้ปริมาณของหมู่ไดรอกซิลภายใน PVA ลดลง ความชอบน้ำจึงลดลง สำหรับ PVA จากรูปมีค่ามุมสัมผัสสูงนั่นเพราะ PVA มีการเชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิคปริมาณ 40 phr ทำให้ความชอบน้ำจึงลดลงเนื่องจากการเชื่อมโยงของกรดมาลีอิคจะทำให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ภายใน PVA ลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA กับ ENR/PVA พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความชอบน้ำมากกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่า ENR-g-ACC มีความชอบน้ำมากกว่า NR-g-ACC

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% PVA ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

No.	Formula	Contact angle (°)			
		1	2	3	Average
1	PVA M40	78.2	78.4	77.5	78.03
2	NR	79.5	78.2	79	78.90
3	NR/PVA	68.5	75.2	75.2	72.96
4	NR/PVA M40	79.5	79.5	79.5	79.50
5	NR/PVA M50	78.5	78.2	81.5	79.40
6	ENR	61.1	59.8	58	59.63
7	ENR/PVA	44.2	50.2	49.5	47.96
8	ENR/PVA M40	48.9	54.5	58.4	53.93
9	ENR/PVA M50	69.5	69	66.5	68.33
10	NR-g-ACC	79.5	77.6	79.6	78.90
11	ENR-g-ACC	59.8	60.5	58.6	59.63



รูปที่ 4.147 เปรียบเทียบมุมสัมผัส ของพอลิเมอร์ผสมNR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% PVA NR ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC



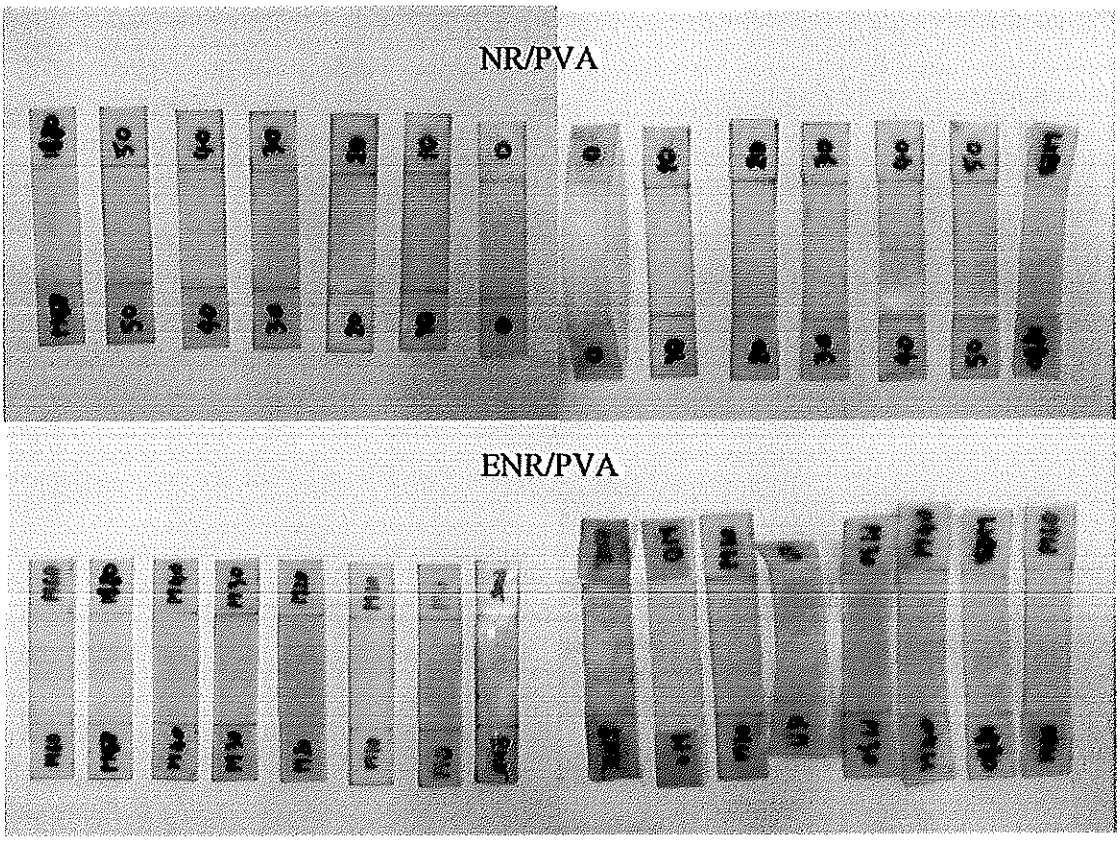
รูปที่ 4.148 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัส ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% NR ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

4.4.7 การทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม

ทำการทดสอบโอโซนเพื่อศึกษาลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบที่ความเข้มโอโซนที่ 50 ± 5 pphm อุณหภูมิที่ใช้ 40 ± 2 ° C และยืดตัวอย่างไว้ 20 % ใส่ในตู้โอโซนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จึงนำมาตรวจรอยแตก ได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองที่ได้ ตารางที่ 4.16 พบว่ามีเพียงลักษณะของชิ้นตัวอย่างยาง NR และ ENR สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน โดยมีจำนวนรอยแตกต่อพื้นที่เท่ากับ 16 และ 7 รอยแตก และความยาวเฉลี่ยของรอยแตกเท่ากับ 2.33 และ1.85 มิลลิเมตรตามลำดับ สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นรอยแตกได้เลย แต่มีการเปลี่ยนแปลงสี และชิ้นตัวอย่างมีการบิดเบี้ยวไปจากเดิมเล็กน้อย สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในสูตร ENR/PVA M0 โดยมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองไปเป็นสีขาวซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับโอโซน ดังในรูปที่ 4.99 จากการทดสอบความทนทานต่อโอโซนแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง

NR/PVA และ ENR/PVA มีความทนทานต่อโอโซนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างยาง NR และ ENR เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.149 ลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบโอโซน

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบโอโซน รอยแตกที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า จำนวนรอยแตกต่อพื้นที่และความยาวเฉลี่ยของรอยแตก

Formulation	Observation	Crack number /area	Average Length crack (mm)
1.NR	appearance	16	2.33
2.M0	none	-	-
3.M10	none	-	-
4.M20	none	-	-
5.M30	none	-	-
6.M40	none	-	-
7.M50	none	-	-
8.M60	none	-	-
9.ENR	appearance	7	1.85
10.M0	none	-	-
11.M10	none	-	-
12.M20	none	-	-
13.M30	none	-	-
14.M40	none	-	-
15.M50	none	-	-
16.M60	none	-	-

4.1.8 สรุปผลการทดลองตอนที่ 4

การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA รวมไปถึงการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยางธรรมชาติเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการดัดแปรต่อในหัวข้อ 4.5 สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

- โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม

ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ C=O ที่ 1663 cm^{-1} คือ O-H ที่ 1293 cm^{-1} และคือ C-O-C ที่ 1152 cm^{-1} การลดลงของความผลึกของ PVAที่ตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 40° จากเทคนิค XRD แสดงถึงการเชื่อมโยงระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค กรดมาลีอิกสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาส่วนที่เป็นผลึกของ PVA ได้ ส่วนปฏิกิริยาการกราฟต์ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ คาร์บอนิลที่ 1740 cm^{-1} และไฮดรอกซิลที่ 1210 cm^{-1}

- สมบัติเชิงกล

ค่า 100% 300% และค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และพอลิเมอร์ผสมENR/PVA หลังการเชื่อมขวางมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M60 มีค่า 32 MPa เปรียบเทียบกับยาง ENR ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพียง 2 MPa ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังเชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิคมีค่าลดลง สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดีกว่าของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ พอลิเมอร์ผสมENR/PVA ให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 10% โดยสามารถทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สูงถึง 45 MPa สำหรับค่า 100% ของ NR และ ENR สูงขึ้นเล็กน้อยหลังจากให้แสงยูวี โดย ENR-g-ACC > ENR > NR-g-ACC > NR ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดของ NR และ ENR สูงขึ้นเล็กน้อยหลังจากให้แสงยูวี โดย NR-g-ACC > ENR-g-ACC

- ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย

การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สูงกว่า พอลิเมอร์ผสม NR/PVA แต่การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA การละลายในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าใกล้เคียงกันกับพอลิเมอร์ผสมNR/PVA ซึ่งมีค่าน้อยมาก ส่วนการละลายในโทลูอีนพอลิเมอร์ผสม NR/PVA สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ส่วนการบวมตัวและความสามารถในการละลายในน้ำ ENR-g-ACC มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น ENR-g-ACC มีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่สูงมากทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้

- ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องมากกว่า พอลิเมอร์ผสมNR/PVA คือมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า สำหรับยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีเฟสที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่ายาง ENR-g-ACC มีเฟสที่มีความขรุขระมากกว่ายาง NR-g-ACC เฟสขรุขระที่มากกว่าแสดงให้เห็นว่า ACC สามารถซึมเข้าไปภายในยาง ENR ได้มากกว่ายาง NR เนื่องมาจากยาง ENR มีหมู่อิพอกไซด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับ ACC

- ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีความทนทานต่อความร้อนมากถึง 400°C และมีความทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น จากเทคนิค TGA การตรวจสอบสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ด้วยเทคนิค DMTA พอลิเมอร์

ผสม NR/PVA สามารถเข้ากันได้ดีโดยแสดง T_g ค่าเดียวที่ประมาณ 20 °C ส่วน พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA แสดง T_g ค่าเดียวที่ประมาณ 0 °C ENR-g-ACC มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่า NR-g-ACC

- การวัดมุมสัมผัส

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความชอบน้ำลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ความชอบน้ำ PVA > ENR > พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA > พอลิเมอร์ผสม NR/PVA > NR สำหรับยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังจากให้แสงยูวีเป็นระยะเวลา 60 นาที ค่ามุมสัมผัสของ ENR-g-ACC มีค่าน้อยกว่า NR-g-ACC

- การวัดความเสียดทานของพื้นผิว

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ยาง ENR > NR > PVA > พอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 > พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40

- ศึกษาการทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สามารถทนทานต่อโอโซนได้ดี กล่าวคือไม่มีรอยแตกเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR และ ENR ที่มีรอยแตกเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

- สูตรที่ดีที่สุด

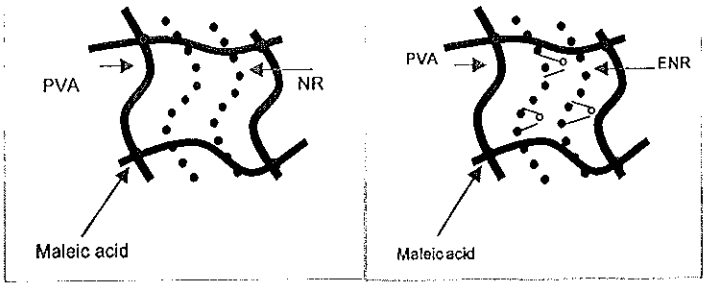
พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่เติมสารเชื่อมขวาง 40% w/w และENR- g-ACC ที่ฉายแสงยูวีเป็น60 นาที เนื่องจากปริมาณการกราฟต์ของ ACC บนแผ่นยางมากที่สุด

4.5 การดัดแปรแผ่นยางผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

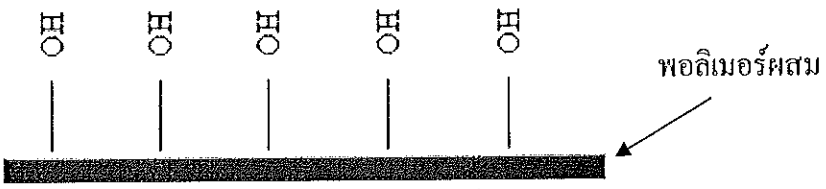
การทดลองดังหัวข้อ 3.4.4 การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเป็นขั้นตอนเริ่มต้นเพื่อนำไปสู่การเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน การทำการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตก่อนทำการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนก็เพื่อทำให้แผ่นฟิล์มสามารถเคลือบพอลิยูรีเทนได้ง่ายขึ้น สำหรับผลการทดลองในตอนนี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วนย่อยคือ ส่วนที่ 1 การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ส่วนที่ 2 การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA และส่วนที่ 3 การดัดแปรแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.5.1 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

การผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ PVA โดยใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางทำให้สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่เรียกว่า IPN ขึ้นมาได้จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ซึ่งพอลิเมอร์ผสม IPN ที่เตรียมได้นี้จะมีประโยชน์คือเป็นการประยุกต์ทำให้ธรรมชาติมีขั้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.150 ในงานวิจัยนี้จึงนำไปดัดแปรต่อด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาดังต่อไปนี้



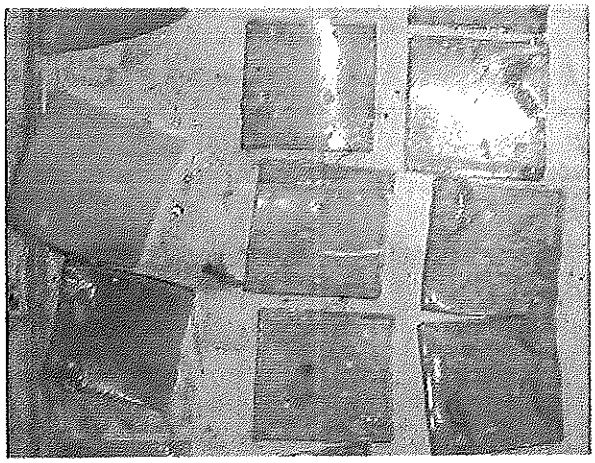
รูปที่ 4.150 ลักษณะการเกิดโครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA



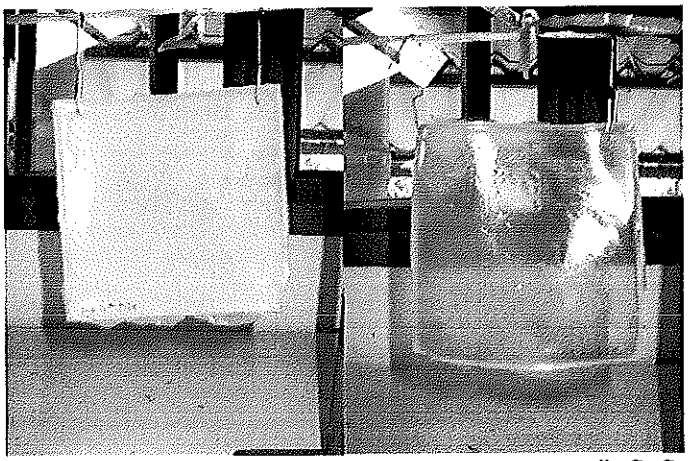
รูปที่ 4.151 แสดงแผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่นพอลิเมอร์ผสม

4.5.1.1 การเตรียมการดัดแปรแผ่นยางผสม

การดัดแปรแผ่นยางผสม NR/PVA ดังในหัวข้อ 3.4.4 ซึ่งมีวิธีการดัดแปรอยู่ 2 วิธี *วิธีแรก* เป็นการศึกษาโดยการดัดแปรในขวดทำปฏิกิริยาที่ประกอบด้วย ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต เจือจางด้วยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (50/50 % V) ไดบิวทิลทิน ไดลอเรต ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยมีการต่อ N_2 เพื่อป้องกันไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งสามารถเตรียมแผ่นฟิล์มจากการดัดแปรได้สำเร็จ แต่มีข้อด้อยก็คือสามารถเตรียมการดัดแปรแผ่นฟิล์มขนาดเล็กๆคือประมาณ 2 x 2 cm (ดังรูป 4.151) จึงมีการหาวิธีการใหม่เพื่อให้สามารถดัดแปรพอลิเมอร์ผสมได้ในปริมาณที่มากขึ้นดังวิธีการที่ 2 ซึ่งเป็นการเตรียมการดัดแปรในเพลตกระจกที่ออกแบบให้มีฝาปิดเพื่อป้องกันไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตออกซิเจนในอากาศ สำหรับการเตรียมไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจะทำคล้ายกันกับวิธีการที่ 1 คือ เจือจางด้วยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (50/50 % V) ไดบิวทิลทินไดรอเรต แต่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที จึงนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ได้ดังรูปที่ 4.153 และตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.152 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยใช้วิธีที่ 1



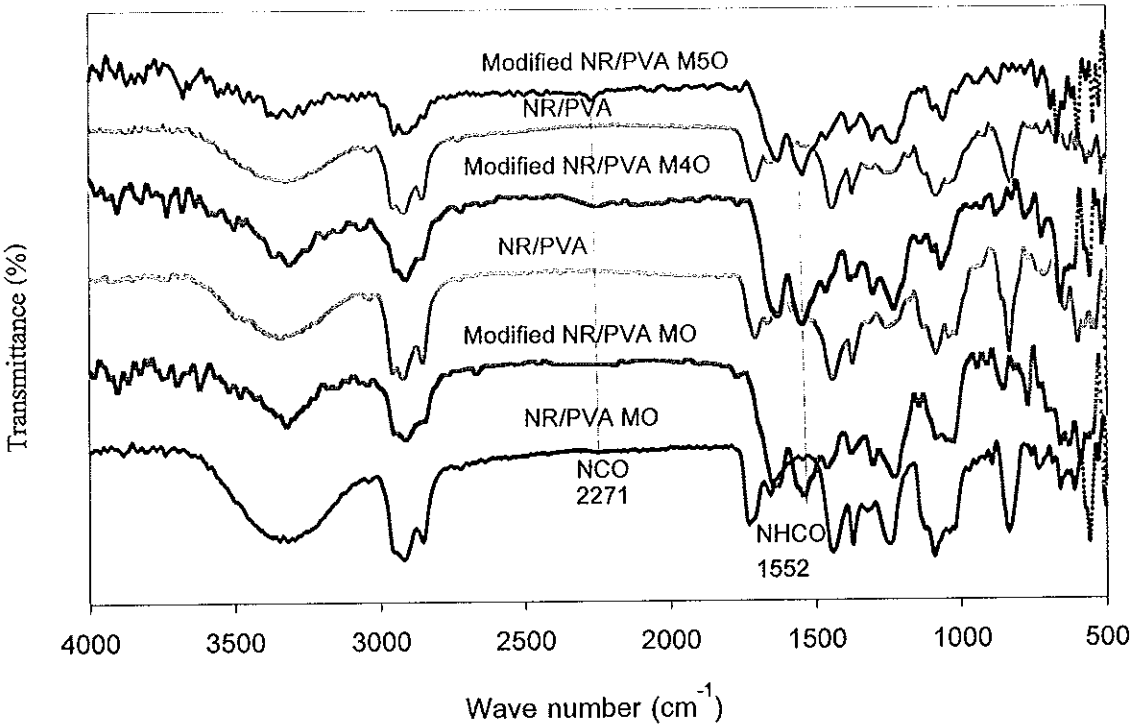
รูปที่ 4.153 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยใช้วิธีที่ 2

ตารางที่ 4.18 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตก่อนและหลังวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Formula	After modified isophorone	After cured
1.NR/PVA M0	Not change	Brightness, hard
2.NR/PVA M40	Not change	Brightness, hard
3.NR/PVA M50	Not change	Brightness, hard
4.NR	Not change	Softener than other samples

4.5.1.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม

สเปคตรัมอิฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆก่อนและหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.154 โดยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2271 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO หลังจากที่ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเกิดปฏิกิริยาจะทำให้พีคตำแหน่งนี้ลดลง (F.Burel *et al.*, 2005) แต่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1552 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.157



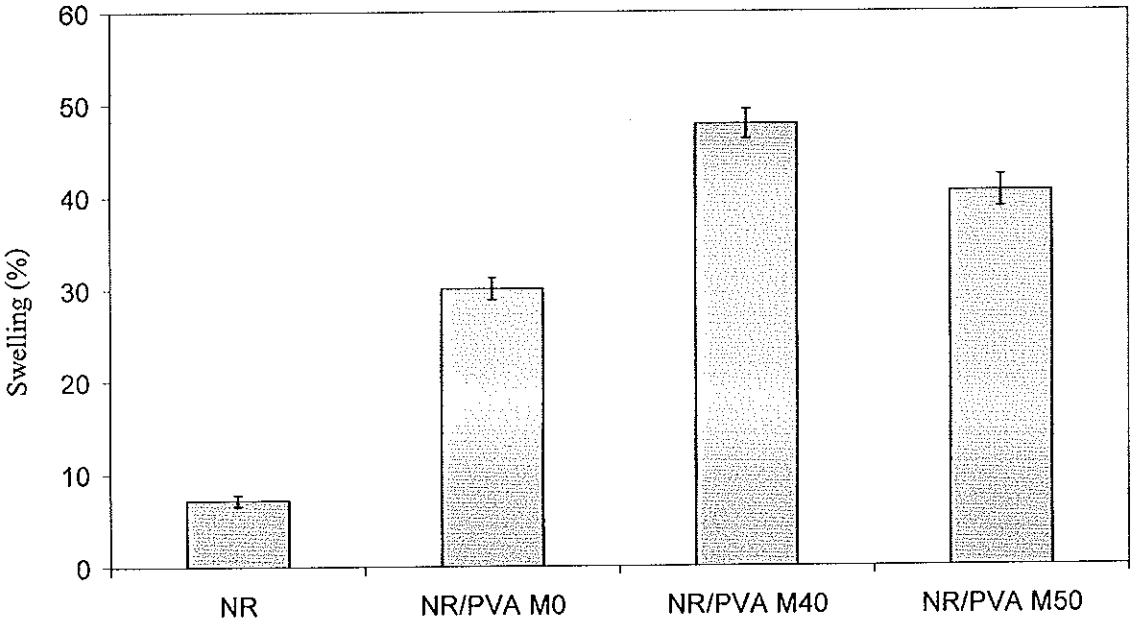
รูปที่ 4.154 สเปคตราอิฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่าง ๆ ก่อนและหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.1.3 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย

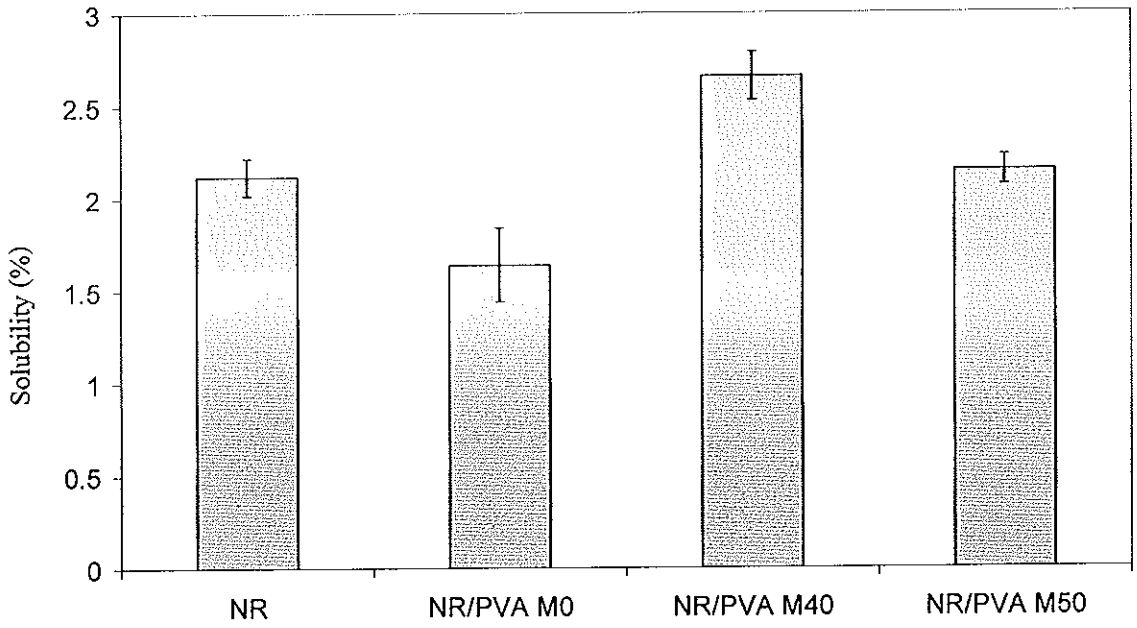
การศึกษาสมบัติทางด้านความทนทานต่อตัวทำละลาย เพื่อเป็นการตรวจสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการดัดแปร โดยทำการทดสอบสูตรต่าง ๆ คือ พอลิเมอร์ผสมNR/PVA M0 NR/PVA M40 และ NR/PVA M50 เปรียบเทียบกับยาง NR โดยทำการศึกษาในตัวทำละลายคือ น้ำและโทลูอีน ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองต่าง ๆ ดังหัวข้อต่างๆต่อไปนี้

ก. การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำ

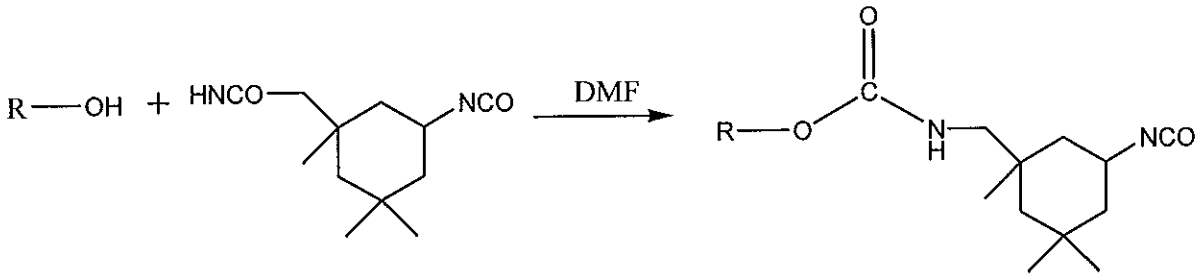
การบวมตัวในน้ำและความสามารถในการละลายในน้ำของ NR/PVA หลังจากการดัดแปร ดังรูปที่ 4.155 และ 4.156 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแล้วพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ยังมีการบวมตัวในน้ำในระดับที่สูง แต่ผลที่มีความน่าสนใจก็คือความสามารถในการละลายในน้ำ โดยพบว่าความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแล้ว อยู่ในระดับที่ต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.157 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ส่วนของ PVA เพียงเล็กน้อยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาที่ถูกละลายออกไป



รูปที่ 4.155 การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.156 ความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

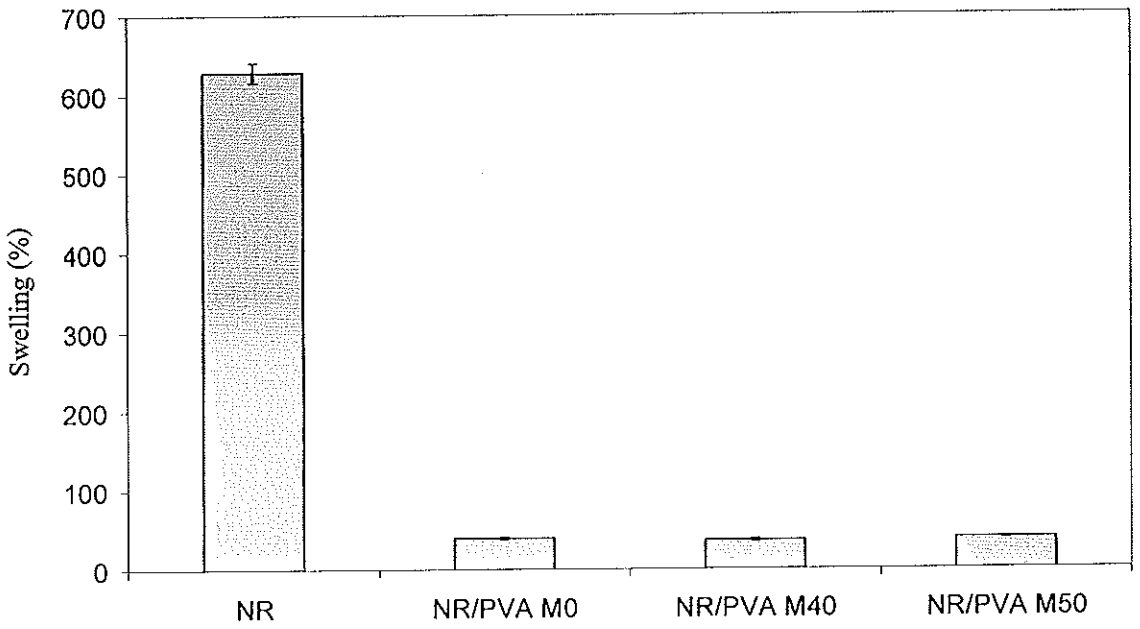


R = แผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

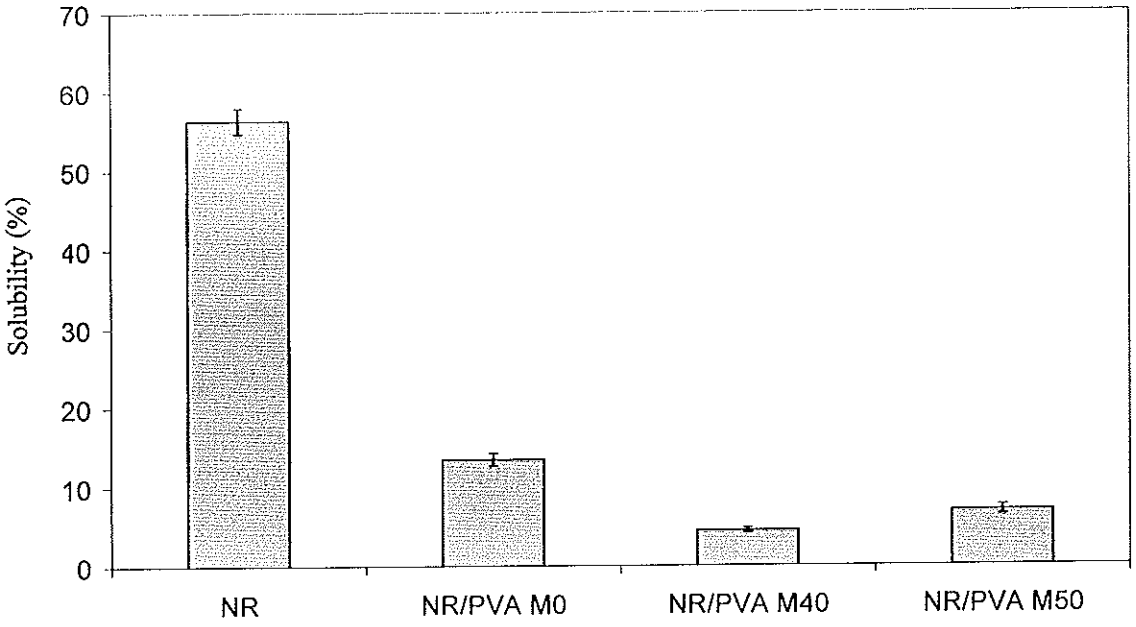
รูปที่ 4.157 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

ข. การบวมตัวในโทลูอีนความสามารถในการละลายโทลูอีน

การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.158 และรูปที่ 4.159 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่ลดลงหลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.158 การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

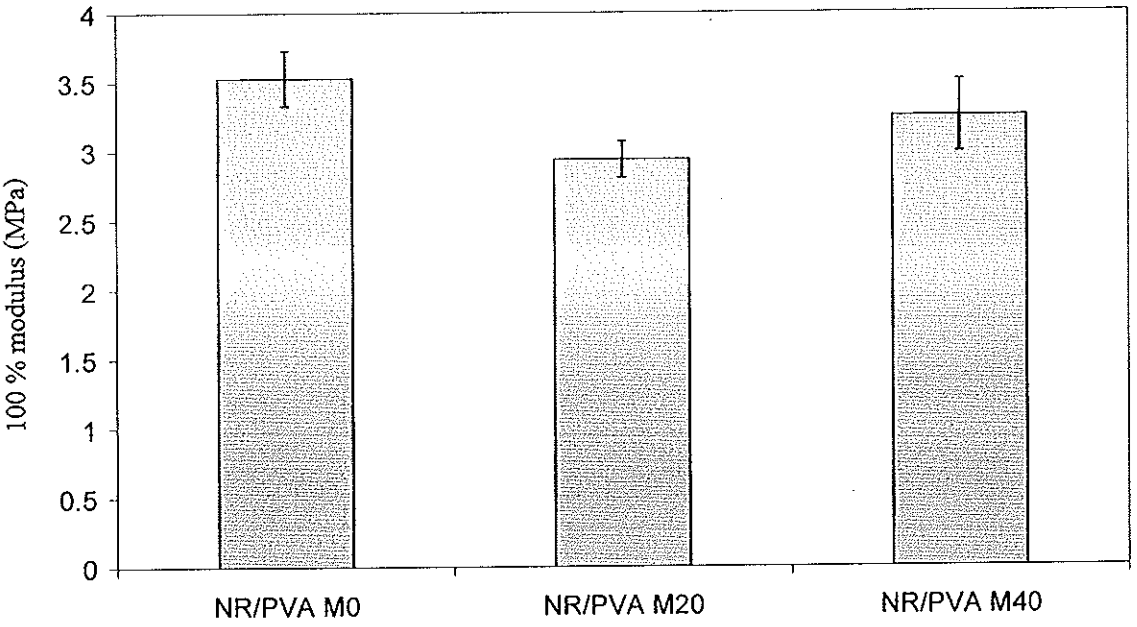


รูปที่ 4.159 ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

ก. มอดุลัสที่ระยะยืด 100 %

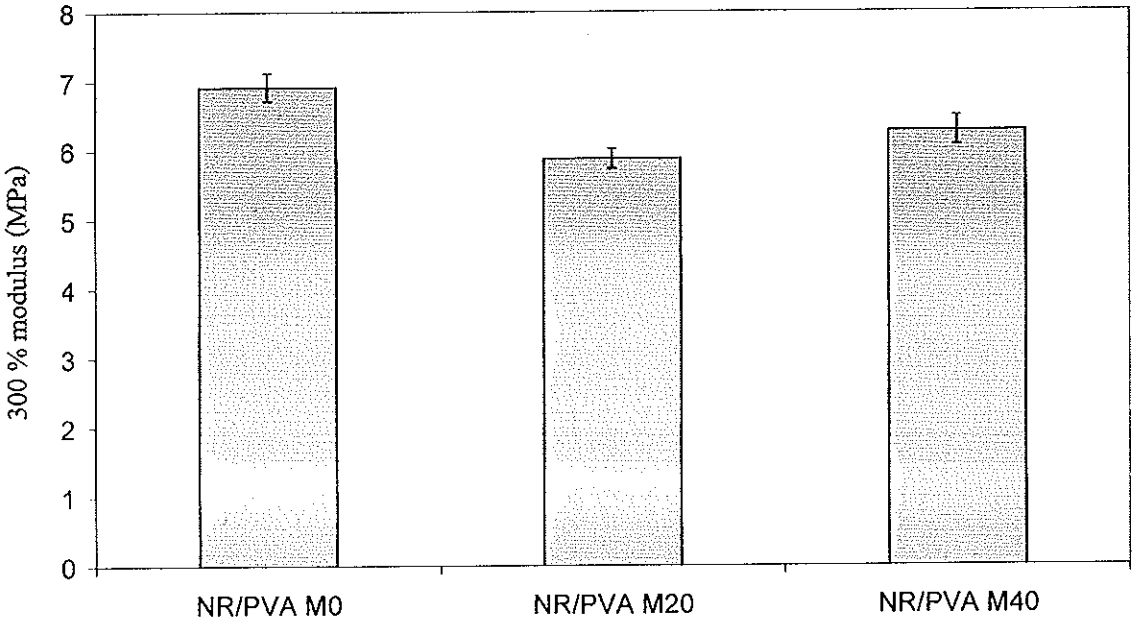
ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.160 พบว่าค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังในหัวข้อ 4.4.3.1 แสดงว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีการเกิดปฏิกิริยาขึ้นหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.160 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ข. มอดุลัสที่ระยะยืด 300 %

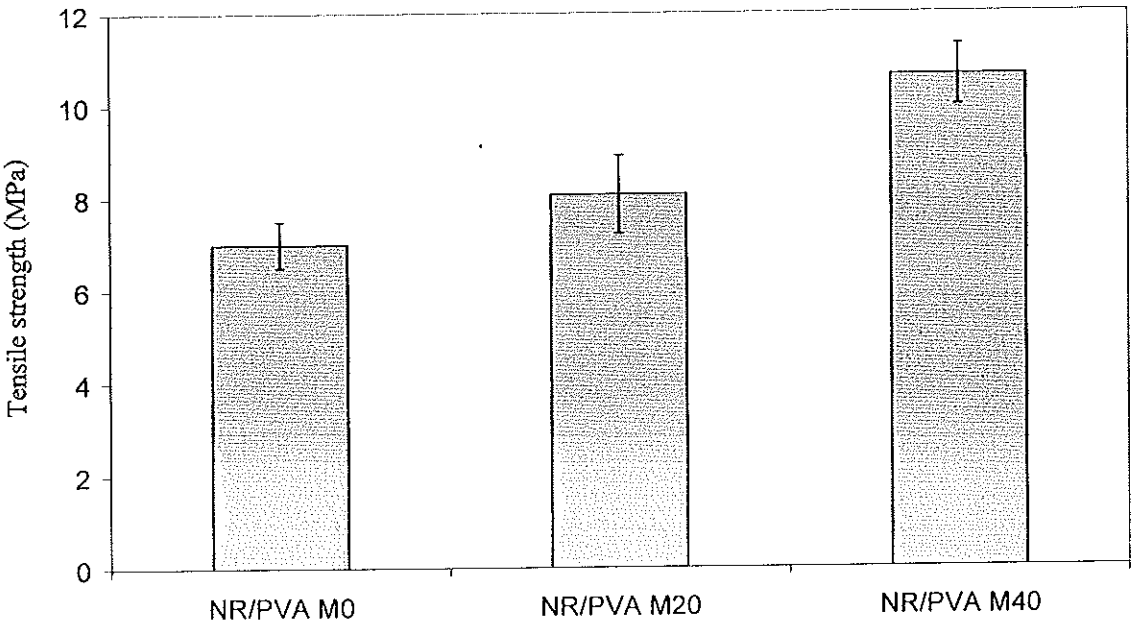
ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.161 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ที่เพิ่มขึ้นดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเช่นเดียวกับค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% สำหรับค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมโยงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่มีการเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิคเนื่องมาจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีกรดมาลีอิคยังมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มากจึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้มากกว่า ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตทำให้ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.161 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ค. ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

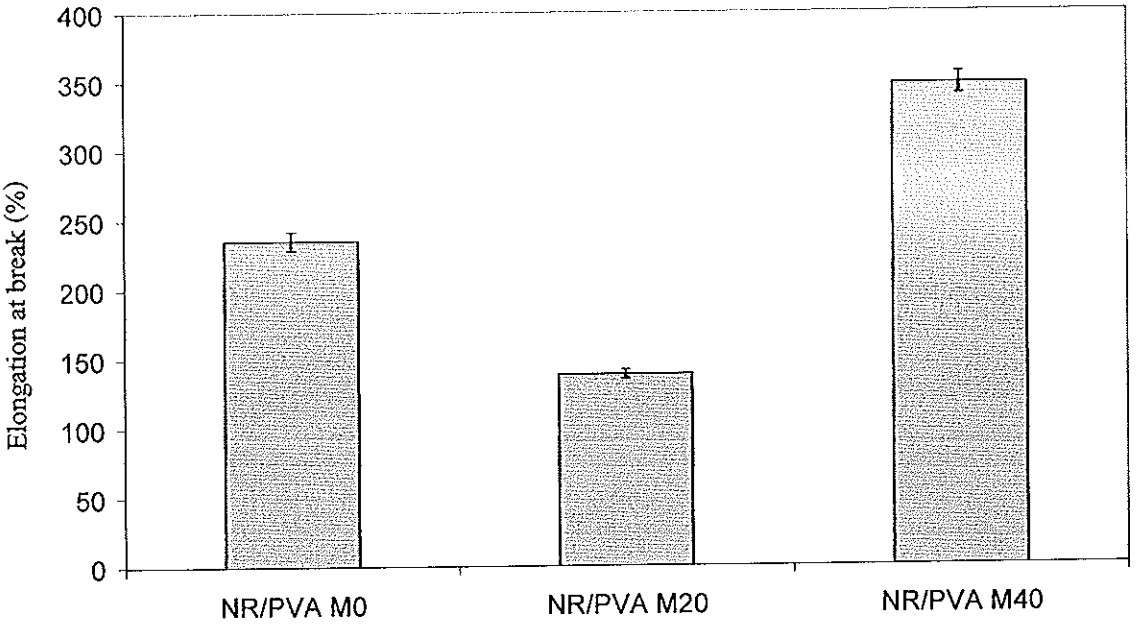
ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.162 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในหัวข้อที่ 4.4.3.3 และพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นโดยพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% หลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าสูงถึง 11 MPa เปรียบเทียบกับก่อนการดัดแปรที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพียง 5 MPa



รูปที่ 4.162 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ง. สมบัติด้านความสามารถในการยืด

ค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.163 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าความสามารถในการยืดที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีความแข็งแรงมากขึ้นดูจากการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ซึ่งการที่พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงที่มากขึ้นทำให้มีความสามารถในการยืดที่ลดลงไปตามลำดับ



รูปที่ 4.163 ค่าความสามารถในการยืด ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.1.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

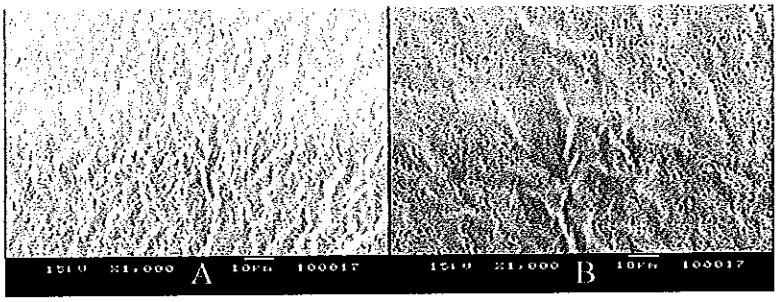
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนตเพื่อเป็นการตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด โดยในงานวิจัยครั้งนี้มีเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA อยู่ 2 วิธีคือ 1) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM 2) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย AFM

4.5.1.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

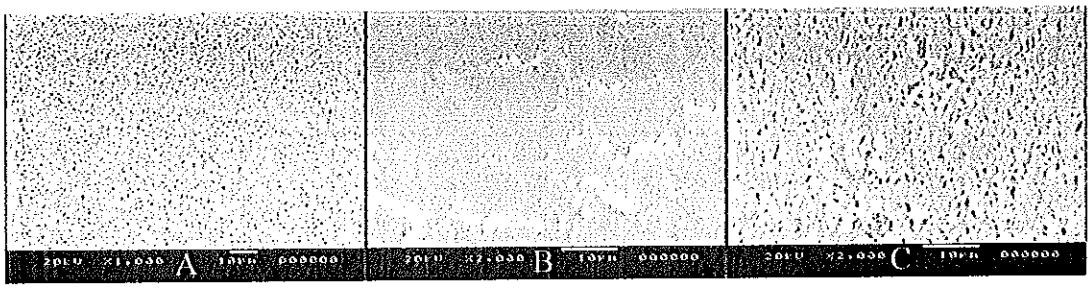
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนต ทำการทดสอบเปรียบเทียบผล ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีน (ชิ้นตัวอย่างหลังจากการทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีนมาอบแห้งก่อนนำมาตรวจดูลักษณะทางสัณฐานวิทยา) โดยใช้เครื่อง JSM JEOL 2000 ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นตัวอย่างมาทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจน พื้นผิวที่ผ่านการทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจนแล้วมาทำการเคลือบด้วยทองก่อนที่จะนำมาทดสอบ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีนตามลำดับ ดังรูปที่ 4.164 และรูปที่ 4.165 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

และทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีนแล้วยังมีส่วนที่สามารถละลายออกไปได้เนื่องจากเป็นการทดสอบชิ้นตัวอย่างโดยการหักชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ภาพที่ได้จึงเป็นส่วนของลักษณะภายในตัวอย่างซึ่งไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั่วถึงทั้งหมด



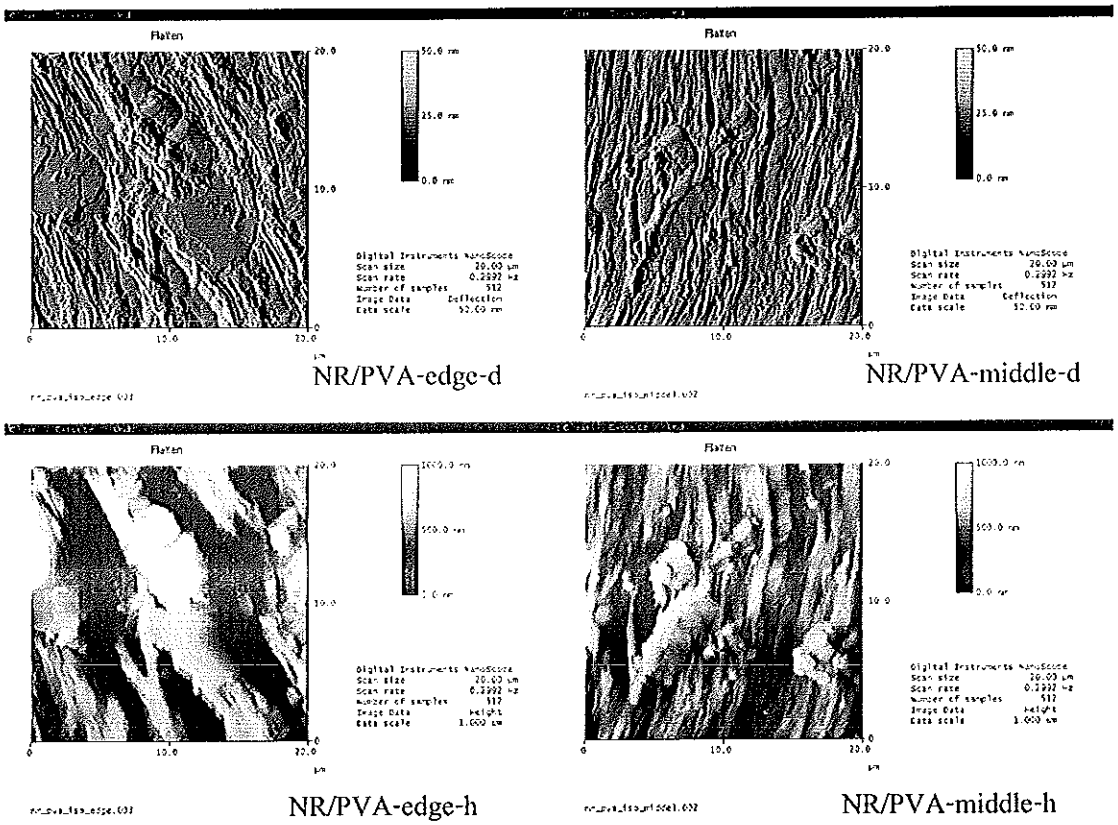
รูปที่ 4.164 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ A) M20 และ B) M40



รูปที่ 4.165 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน A) M0 B) M20 และ C) M40

4.5.1.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height ดังรูปที่ 4.166 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 มีเฟสที่แตกต่างกันกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงให้เห็นถึงพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดี



รูปที่ 4.166 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height

จากตารางที่ 4.19 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM พบว่าบริเวณภายในตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าแรงยึดติดมากว่าบริเวณผิวตัวอย่าง เนื่องจากตัวอย่างหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต บริเวณผิวตัวอย่างส่วนที่มีความเป็นขั้วเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ส่วนที่เป็นขั้วลดลงทำให้ค่าแรงยึดติดลดลงไปด้วย

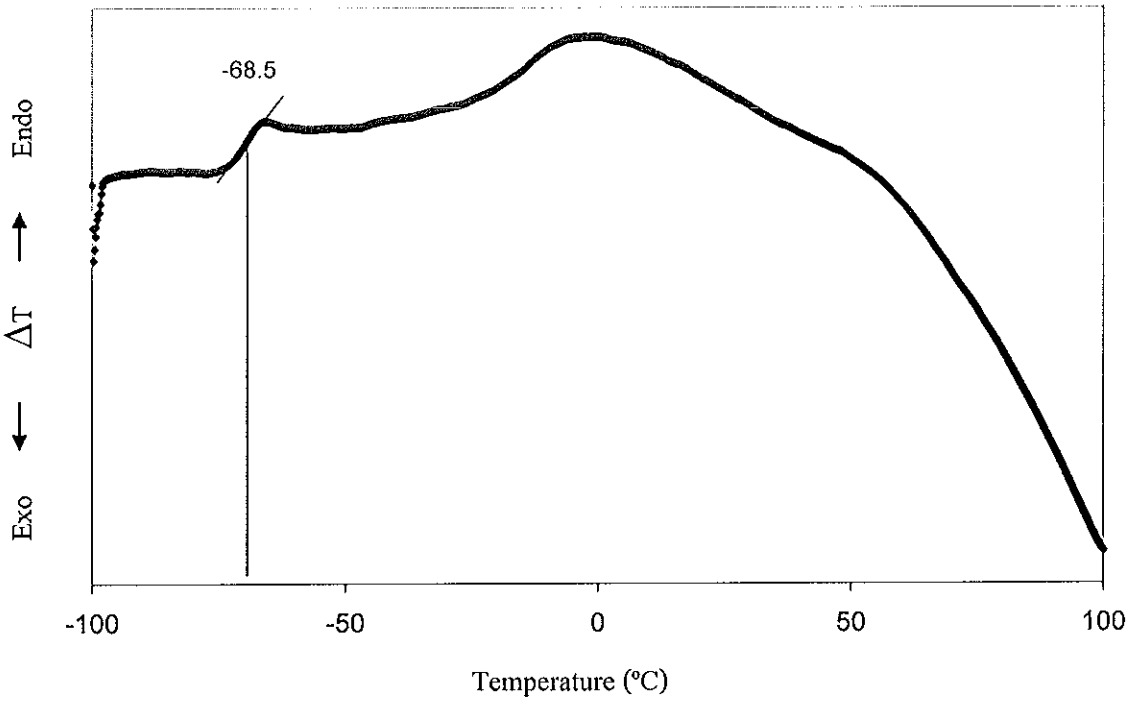
ตารางที่ 4.19 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM

Sample	Adhesion force (N.m)			
	1	2	3	Average
EDGE	18.71	20.71	20.07	19.83
MIDDLE	52.6	52.08	52.81	52.5

4.5.1.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนต เพื่อตรวจดูความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนตคือ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.167 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตยังคงมีสมบัติของความเป็นยางอยู่เนื่องจากแสดงค่า T_g ที่ -68.5 ^{o}C



รูปที่ 4.167 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.1.7 การวัดมุมสัมผัส

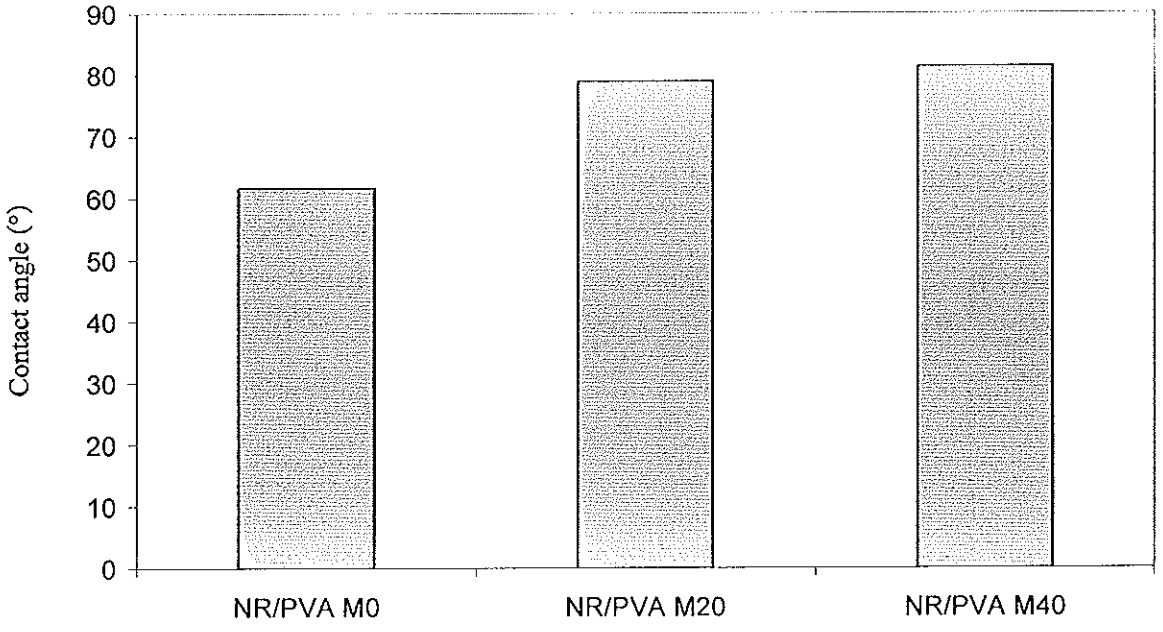
การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.13 ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.168

ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.168 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรด

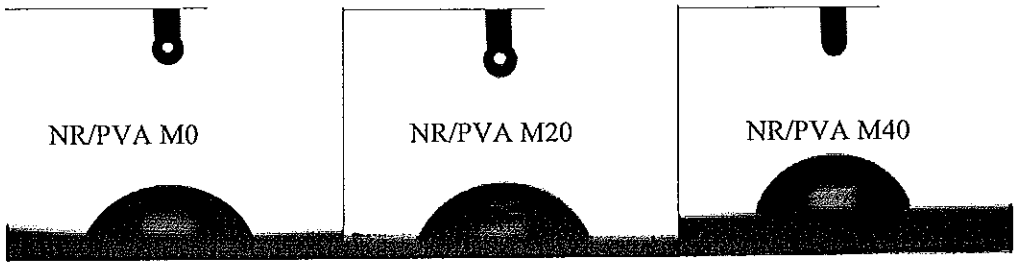
มาลีอิค 20 และ 40 หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตพบว่ามีค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น (ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 20 และ 40 ก่อนดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตดังหัวข้อ 4.4.6 มีค่า 79.50 และ 79.40 ตามลำดับ) แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางมีค่ามุมสัมผัสที่ลดลง (ก่อนดัดแปรมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 72.96) เนื่องจากในขั้นตอนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีการเจือจางไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตก่อนทำการดัดแปรด้วยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ ซึ่งสามารถละลายส่วนของยาง NR ได้เพราะพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ไม่มีสารเชื่อมโยง เมื่อมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (NR) ถูกละลายออกทำให้เหลือส่วนที่ชอบน้ำ (PVA) พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจึงมีความชอบน้ำมากขึ้น

ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

Formula	Contact angle (°)
NR/PVA M0	61.67
NR/PVA M20	79.00
NR/PVA M40	81.33



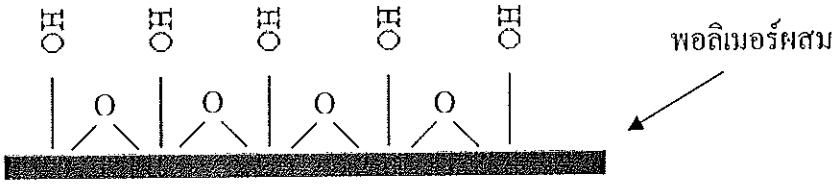
รูปที่ 4.168 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.169 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.2 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับ PVA โดยใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางทำให้สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่เรียกว่า IPN ขึ้นมาได้จากที่ได้กล่าวมาแล้วดังรูปที่ 4.150 ในหัวข้อ 4.5.1ซึ่งพอลิเมอร์ผสม IPN ที่เตรียมได้นี้จะมีประโยชน์คือเป็นการประยุกต์ทำให้ธรรมชาติมีขั้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลายกหลายมากขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.170 ในงานวิจัยนี้จึงนำไปดัดแปรต่อด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาดังต่อไปนี้

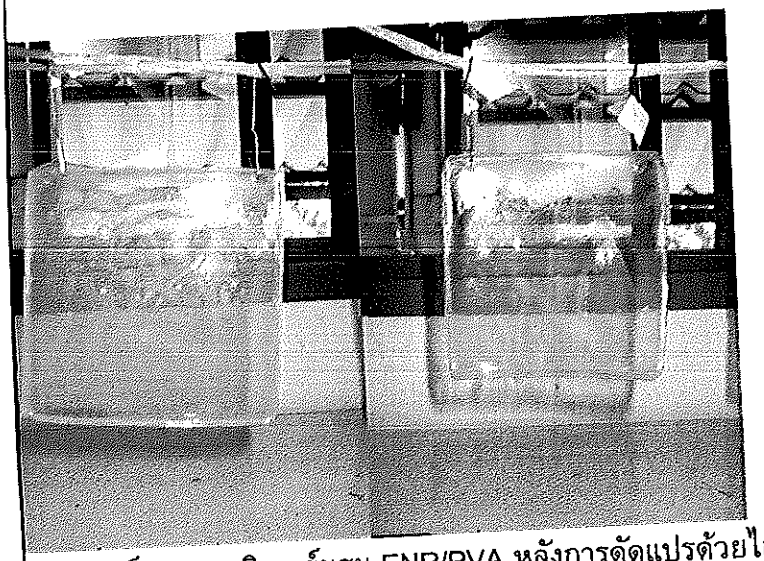


รูปที่ 4.170 แผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่นพอลิเมอร์ผสม

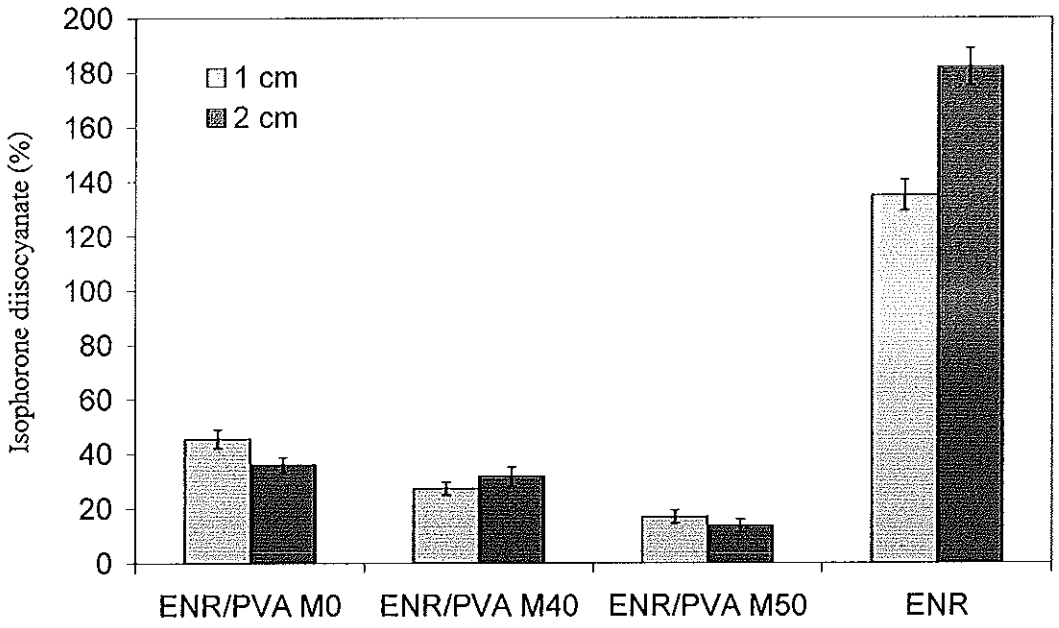
4.5.2.1 การเตรียมการดัดแปรแผ่นยางผสม

วิธีการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ทำเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.5.1.1 วิธีการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ได้ดังรูปที่ 4.171 และตาราง 4.20 ซึ่งพบว่าแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการบวมตัวเล็กน้อยหลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีและแข็งขึ้นหลังจากการวัลคาไนซ์ โดยพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางมีลักษณะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองขุ่นและแข็งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้มากกว่า พอลิเมอร์ผสม

ENR/PVAในกรดมาลีอิค 40 และ 50 % สำหรับแผ่นยาง ENR มีลักษณะที่บวมตัวมาก เนื่องจากการดัดแปรมีการเจือจางไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วย DMF และหลังจากนั้นแผ่นยาง ENR มีลักษณะบิดเบี้ยว ขุ่น และแข็ง แสดงให้เห็นว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้มากที่สุด ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การติดมากถึง 182.01% ฟิล์มขนาด 4×4 cm^2 จากตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโซไซยาเนตบนแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA –ขนาด 1 cm^2 และ 4 cm^2 ที่ปริมาณกรด 0 40 และ 50% เปรียบเทียบกับแผ่นยาง ENR แผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA 1 cm^2 และ 4 cm^2 มีเปอร์เซ็นต์การติดที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดแผ่นที่ใช้ดีค่อยมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต



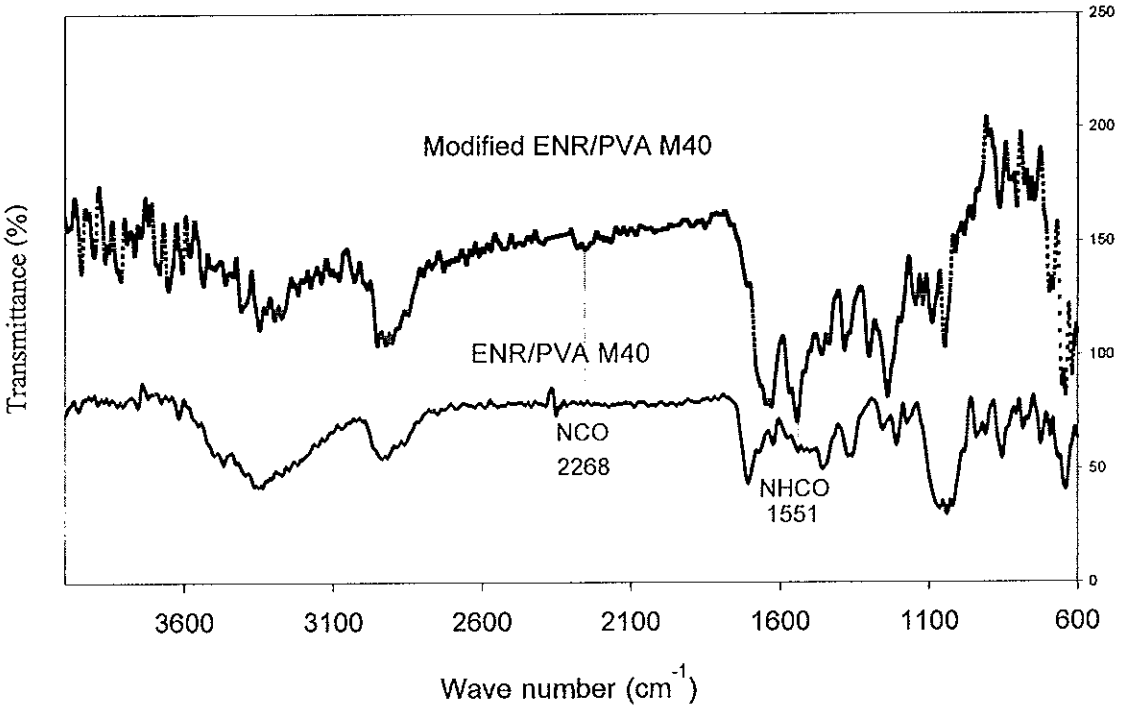
รูปที่ 4.17 แผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตใช้วิธีที่ 2



รูปที่ 4.172 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ขนาด 1 cm^2 และ 4 cm^2 ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% เปรียบเทียบกับแผ่นยาง ENR

4.5.2.2 โครงสร้างทางเคมี

สเปคตราอินฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค40% ก่อนและหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่4.173 โดยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจะแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2268 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO หลังจากที่ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเกิดปฏิกิริยาจะทำให้พีคตำแหน่งนี้ลดลง (F.Burel *et al.*, 2005) แต่จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1551 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.157

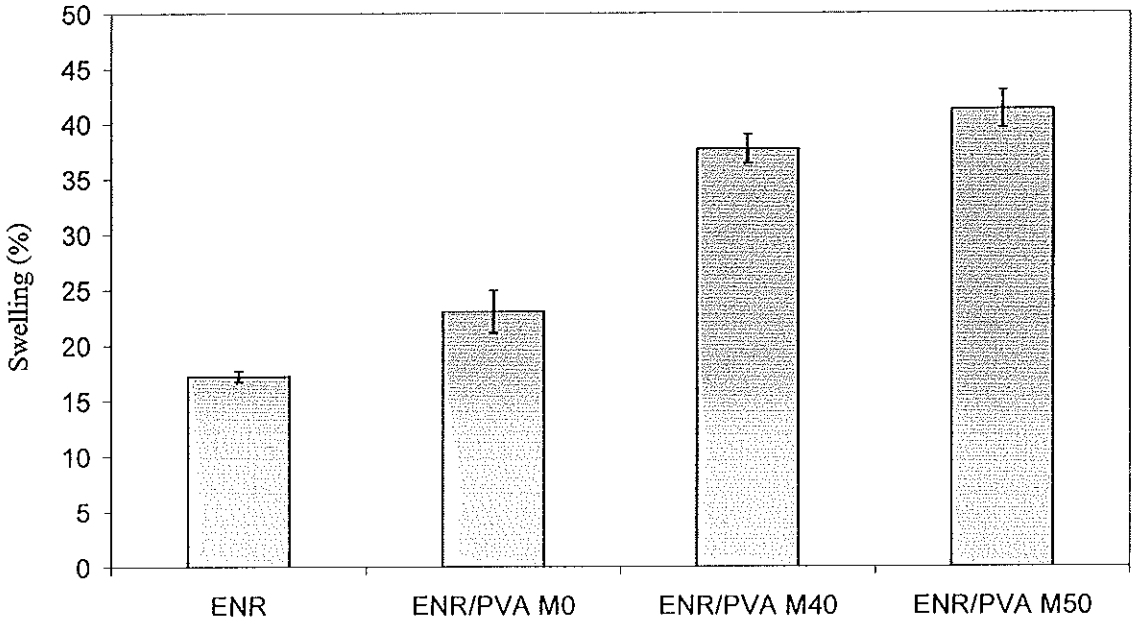


รูปที่ 4.173 สเปคตราอินฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ก่อนและหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

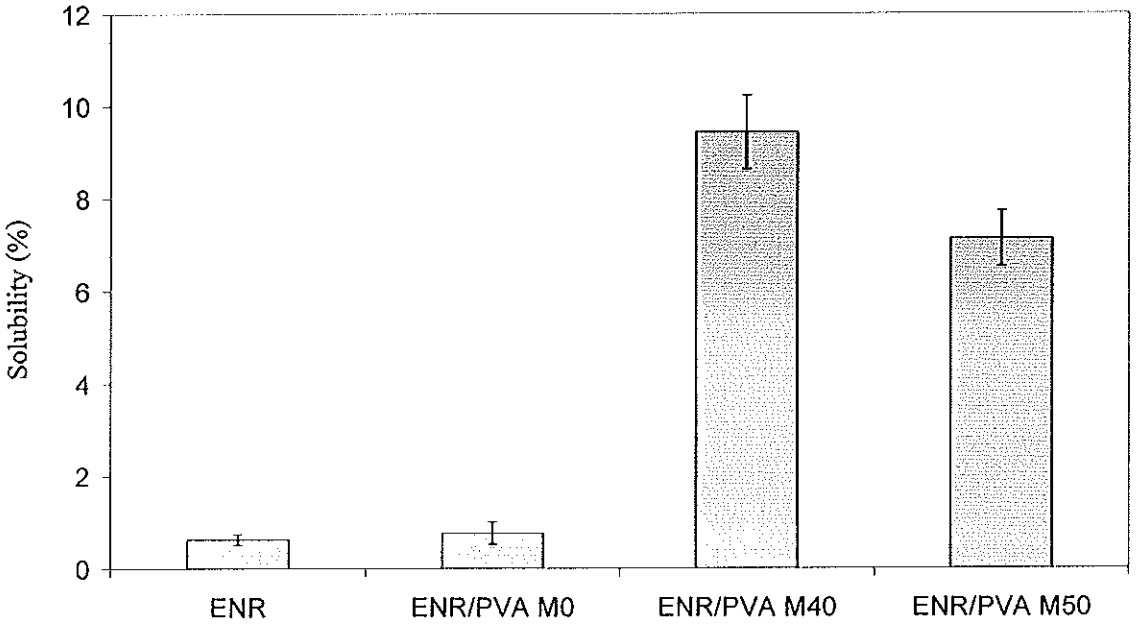
4.5.2.3 การบวมของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปร

ก. การบวมตัวในน้ำ

การบวมตัวในน้ำและความสามารถในการละลายน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณเกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.174 และรูปที่ 4.175 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต มีการบวมตัวในน้ำและความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตดังในหัวข้อ 4.4.2.1 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สามารถเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้

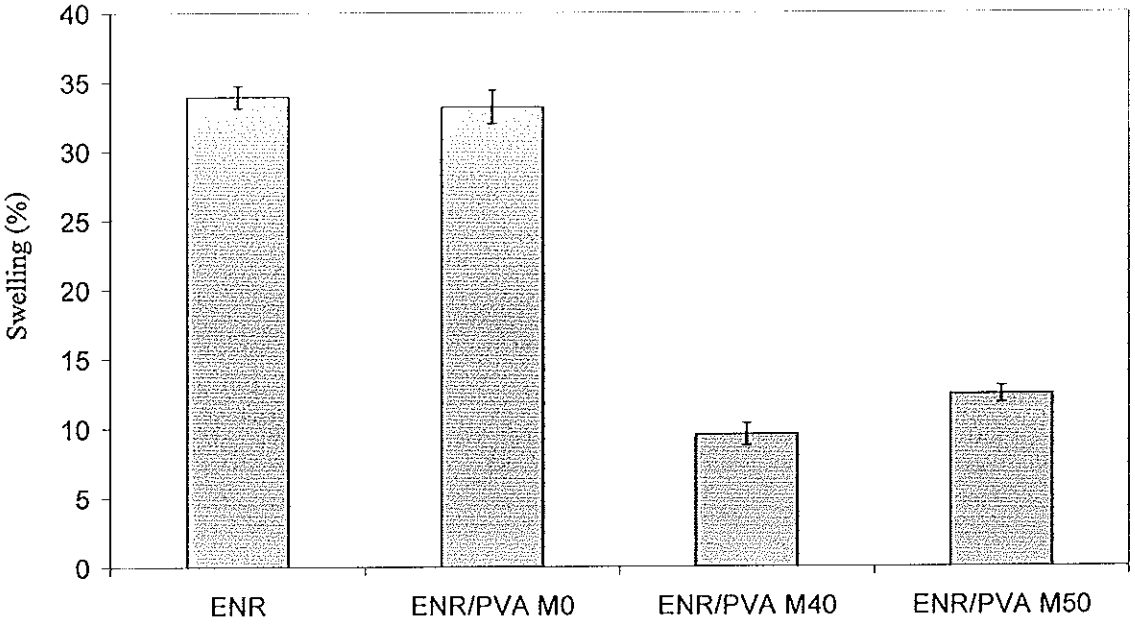


รูปที่ 4.174 การบวมตัวในน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

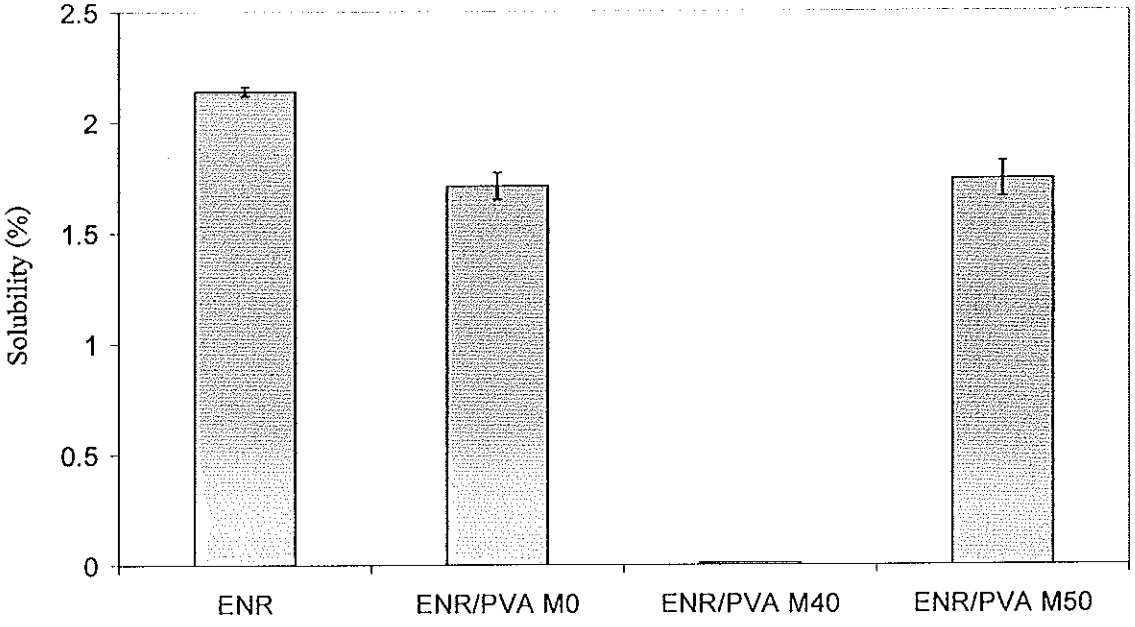


รูปที่ 4.175 ความสามารถในการละลายน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ข. การบวมตัวในโทลูอีน



รูปที่ 4.176 การบวมตัวในโทลูอีนของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



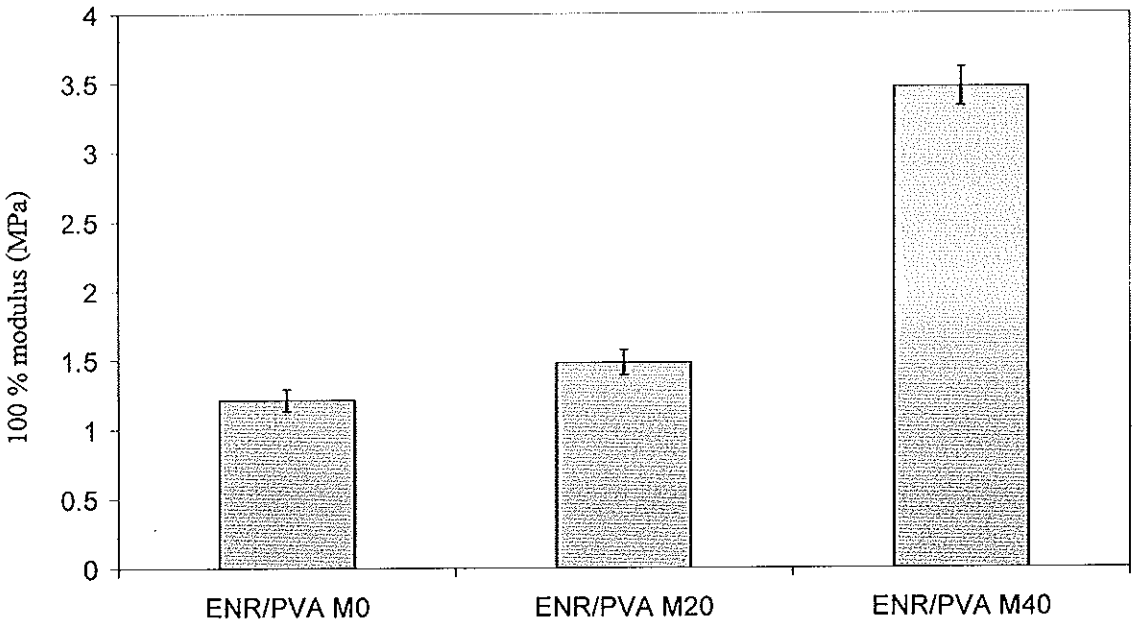
รูปที่ 4.177 ความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

การบวมตัวในโทลูอีนและความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.176 และรูปที่ 4.177 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต มีการบวมตัวในโทลูอีนและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังหัวข้อที่ 4.4.2.2 ซึ่งการละลายในโทลูอีนที่ลดลงแสดงถึงพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความทนทานต่อโทลูอีนมากขึ้นหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปร

ก. มอดุลัสที่ระยะยืด 100 %

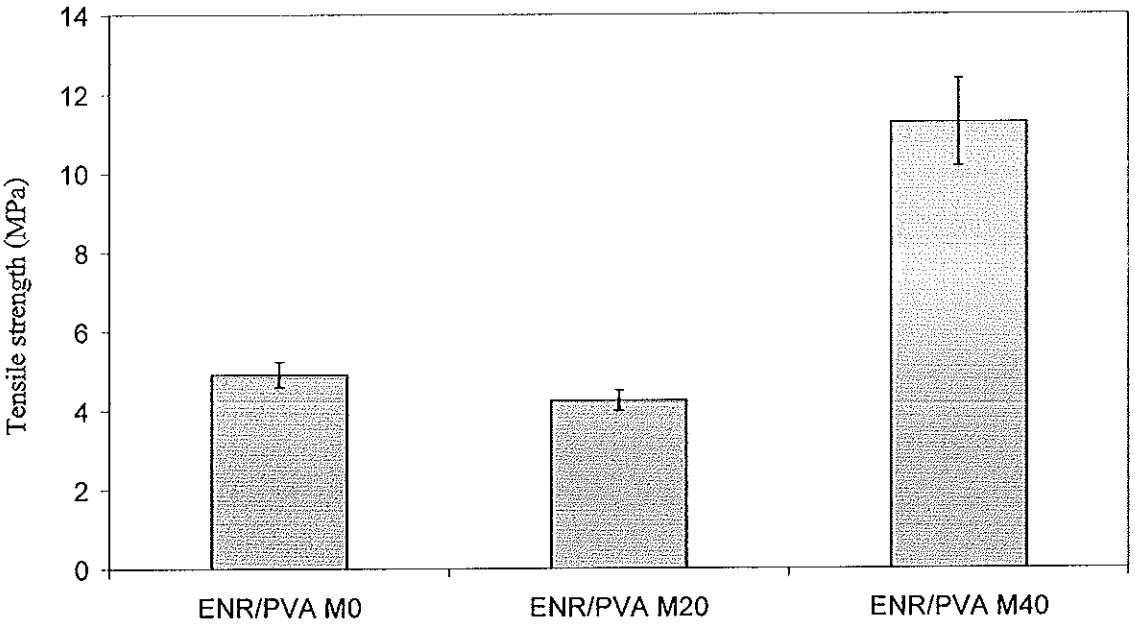
ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.178 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.178 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ข. ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

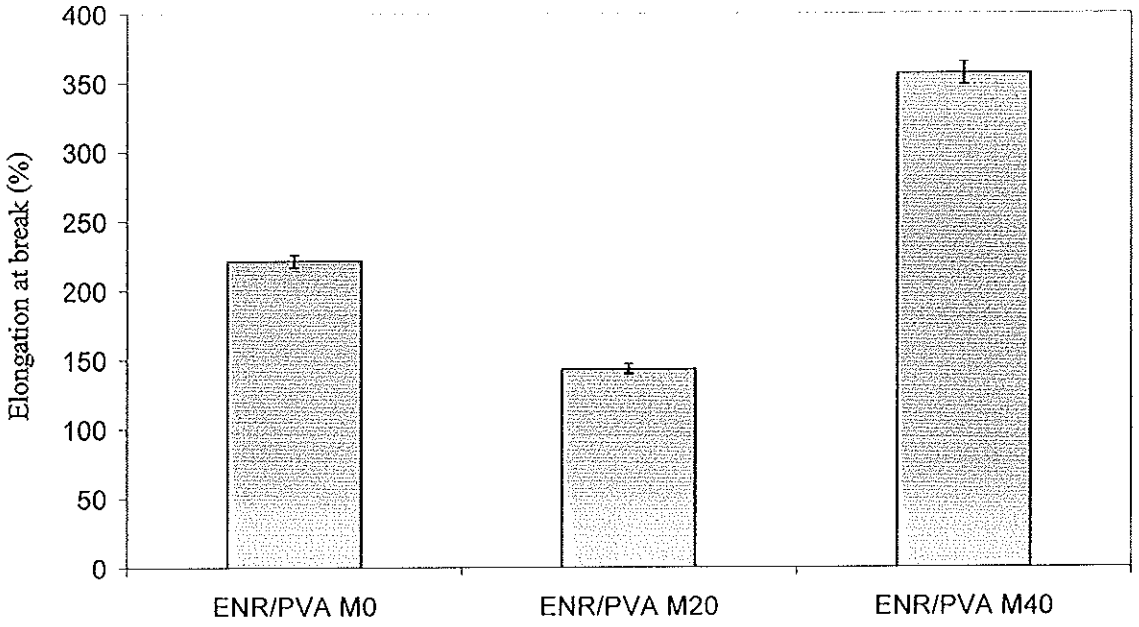
ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่4.179 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100%



รูปที่ 4.179 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ค. สมบัติด้านความสามารถในการยืด

ค่าความสามารถในการยืด ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากรูปที่ 4.180 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% มีค่าความสามารถในการยืดสูงที่สุดหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.180 ค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

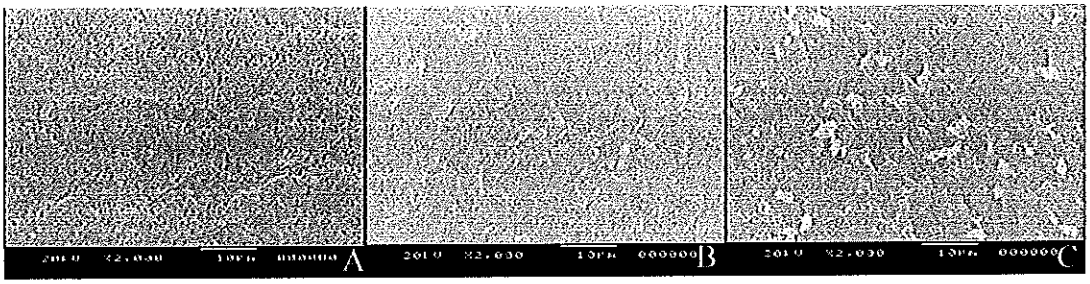
4.5.2.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต เพื่อเป็นการตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด โดยในงานวิจัยครั้งนี้มีเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA อยู่ 2 วิธีคือ 1) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย และSEM 2) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย AFM โดยมีผลการทดลองจากเทคนิคต่างๆดังต่อไปนี้

4.5.2.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA โดยแปรปริมาณกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 0 20 และ 40% ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ทำการทดสอบเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน (ชิ้นตัวอย่างหลังจากการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีนมาอบแห้งก่อนนำมาตรวจดูลักษณะทางสัณฐานวิทยา) โดยใช้เครื่อง JSM JEOL 2000 ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นตัวอย่างมาทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจน พื้นผิวที่ผ่านการทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจนแล้วมาทำการเคลือบด้วยทองก่อนที่จะนำมาทดสอบ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน ดังรูปที่ 4.181 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมโยงหลังจากทดสอบการบวมตัวในโทลูอีนจะเห็นได้ว่ามีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่มีลักษณะที่เป็นรูพรุนเนื่องจากมีส่วนที่ถูกละลายด้วยโทลูอีน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางเป็น 20 และ 40 ตามลำดับ จะไม่พบลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เป็นรูพรุนอีก

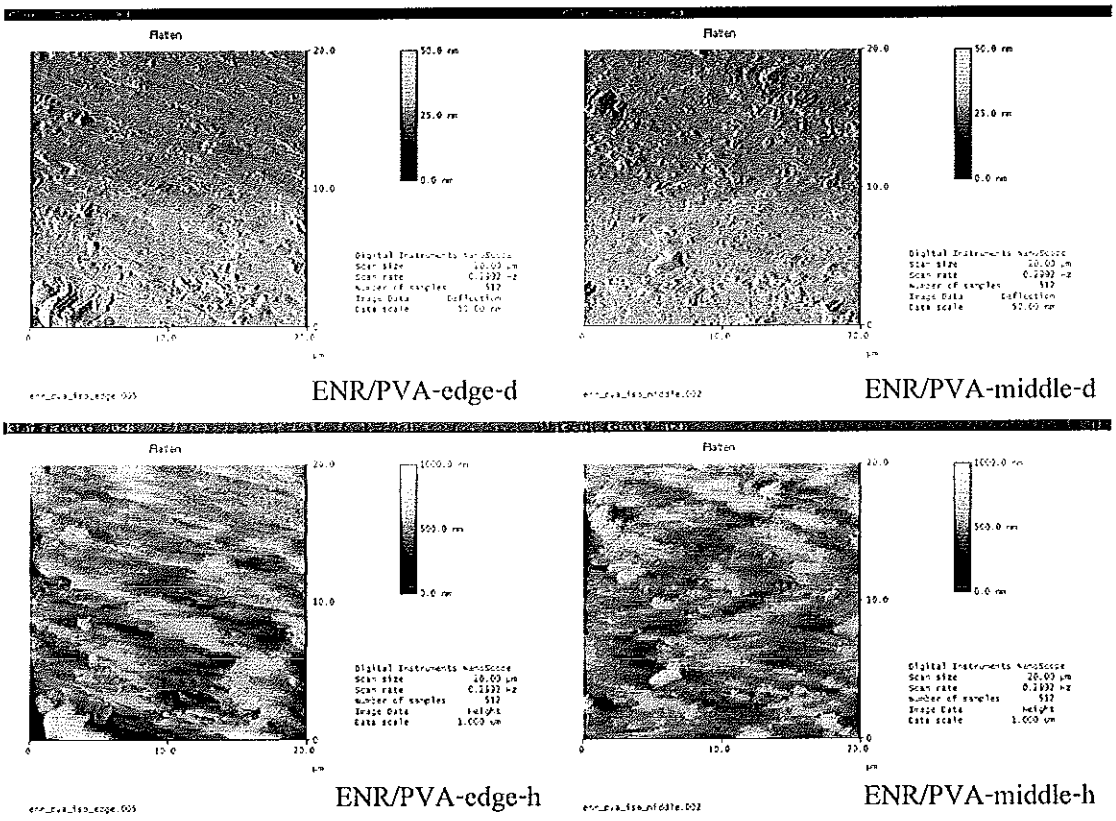


รูปที่ 4.181 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน A) M0 B) M20 และ C) M40

4.5.2.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่อง AFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height ดังรูปที่ 4.182 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีเฟสที่แตกต่างกันกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงให้เห็นถึงพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดี

จากตารางที่ 4.22 แสดงค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่อง AFM พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตทำให้ค่าแรงยึดติดบริเวณผิวน้อยลง เป็นผลการทดลองที่สอดคล้องกันกับ ตารางที่ 4.19 กล่าวคือการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตทำให้ค่ายึดติดบริเวณผิวตัวอย่างต่ำกว่าภายในตัวอย่าง



รูปที่ 4.182 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height

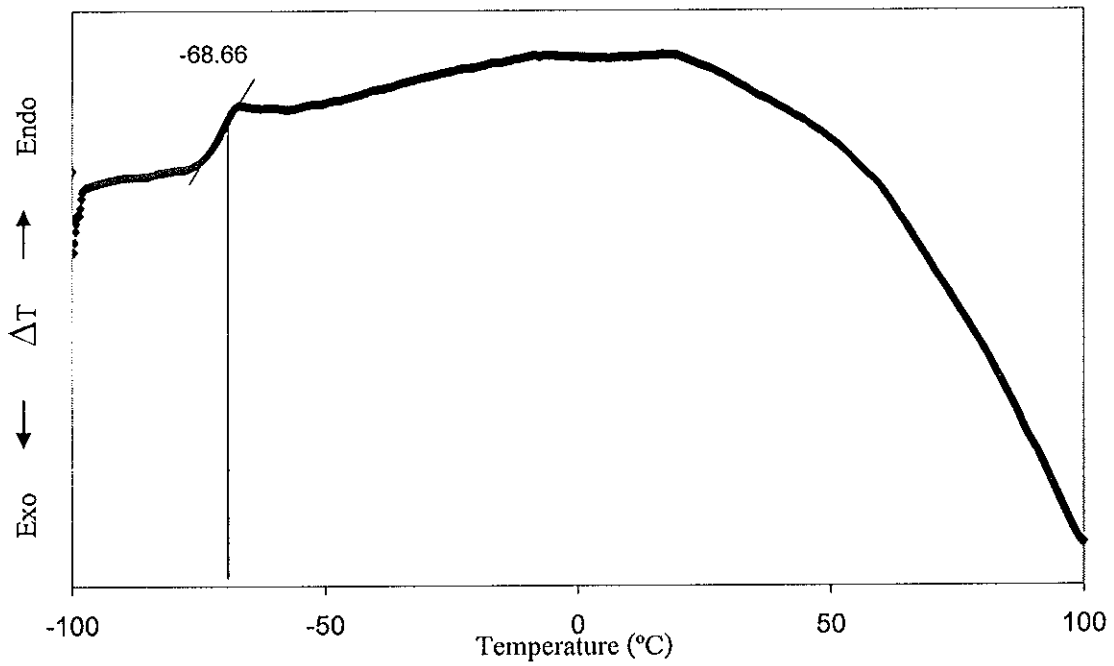
ตารางที่ 4.23 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่อง AFM

Sample	Adhesion force (N.m)			
	1	2	3	Average
EDGE	19.05	19.62	20.11	19.59
MIDDLE	28.28	29.02	29.48	28.93

4.5.2.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนต เพื่อตรวจดูความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนตคือ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.183 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตยังคงมีสมบัติของความเป็นยางอยู่เนื่องจากแสดงค่า T_g ที่ -68.66 °C



รูปที่ 4.183 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.2.7 การวัดมุมสัมผัส

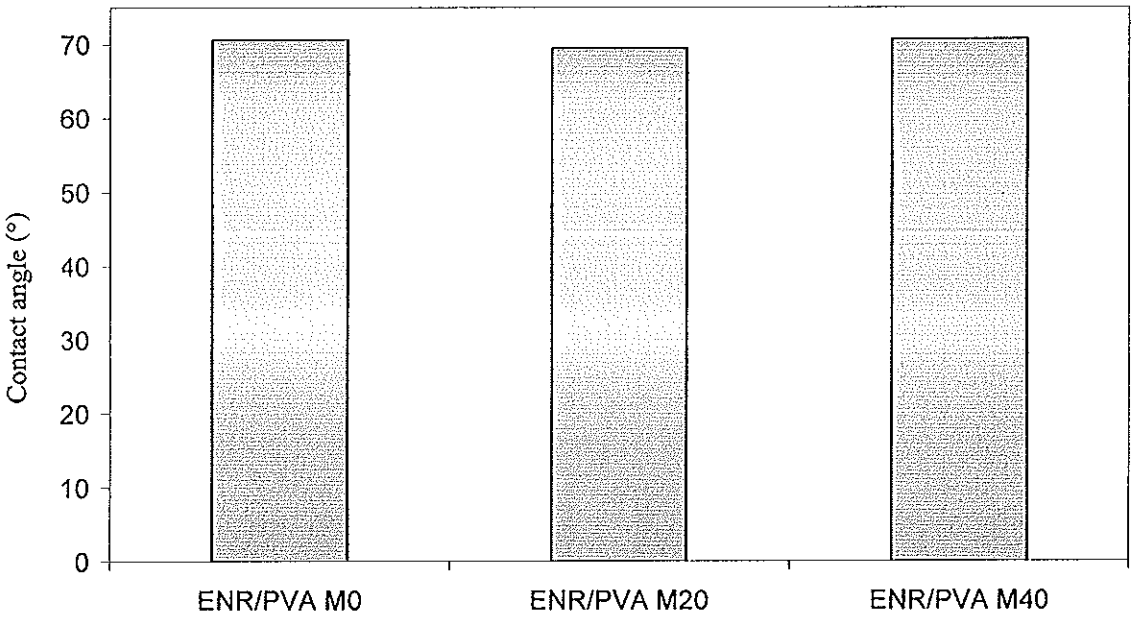
การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.13 ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.184

ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.184 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตพบว่ามีค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น (ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ก่อนดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตดังหัวข้อ 4.4.6 มีค่า 47.96 53.93 และ 68.33 ตามลำดับ) เนื่องมาจากส่วนที่ชอบน้ำคือหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA เมื่อมีการทำปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจึงทำให้ความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ลดลง โดยที่ปริมาณสาร

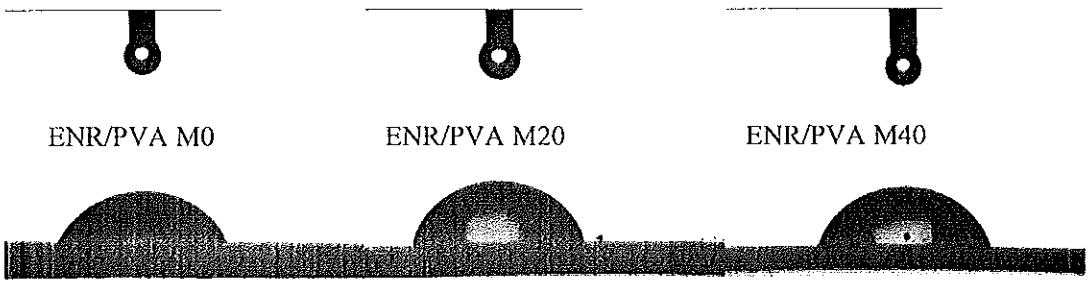
เชื่อมขวางต่างๆหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต พบว่ามีความชอบน้ำที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.24 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

Formula	Contact angle (°)
ENR/PVA M0	70.67
ENR/PVA M20	69.50
ENR/PVA M40	70.73



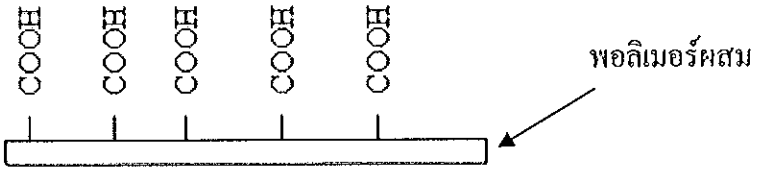
รูปที่ 4.184 เปรียบเทียบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



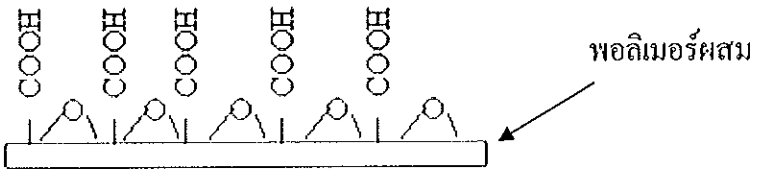
รูปที่ 4.185 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.3 ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค

การกราฟต์แผ่นยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยกรดอะคริลิคซึ่งแผ่นยางที่เตรียมได้นี้จะมีประโยชน์คือเป็นการประยุกต์ทำให้ธรรมชาติมีขั้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลายหลายมากขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.144 ในงานวิจัยนี้จึงนำไปดัดแปรต่อด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.186 แผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่น NR-g-ACC



รูปที่ 4.187 แผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่น ENR-g-ACC

4.5.3.1 การเตรียมการดัดแปรแผ่นยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิค

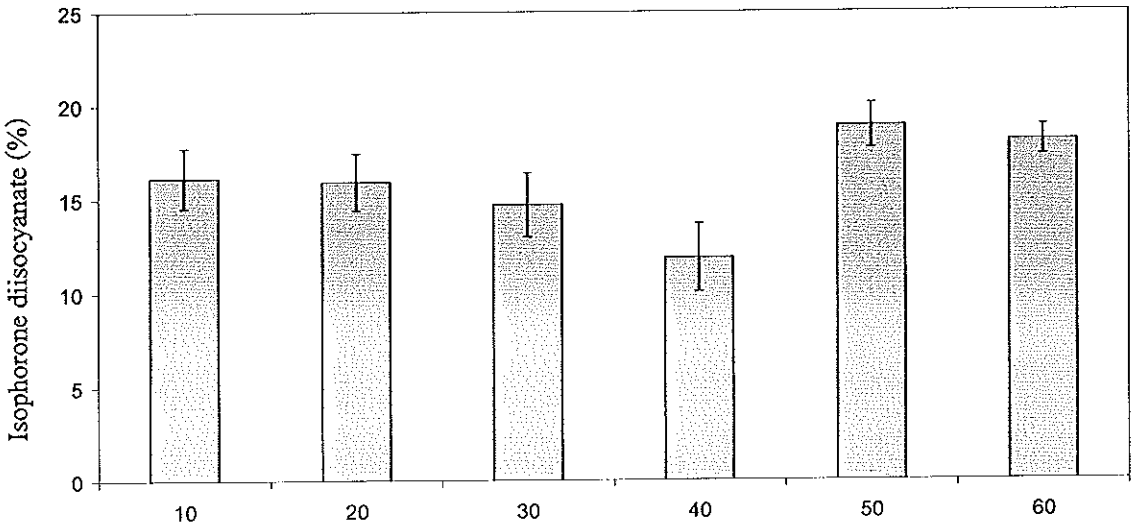
วิธีการดัดแปรแผ่นยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิค ทำเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.5.1.1 วิธีการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ได้ดังรูปที่ 4.188 และตาราง 4.24

เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง NR และ ENR ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง NR-g-ACC และยาง ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.188 และรูปที่ 4.189 พบว่า ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีเปอร์เซ็นต์การติดที่สูงกว่า NR-g-ACC โดยเปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตของแผ่นยาง ENR-g-ACC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าการให้แสงยูวีนานขึ้นทำให้พื้นผิวของแผ่น

ยาง ENR เกิดหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วยทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้มาก

ตารางที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ

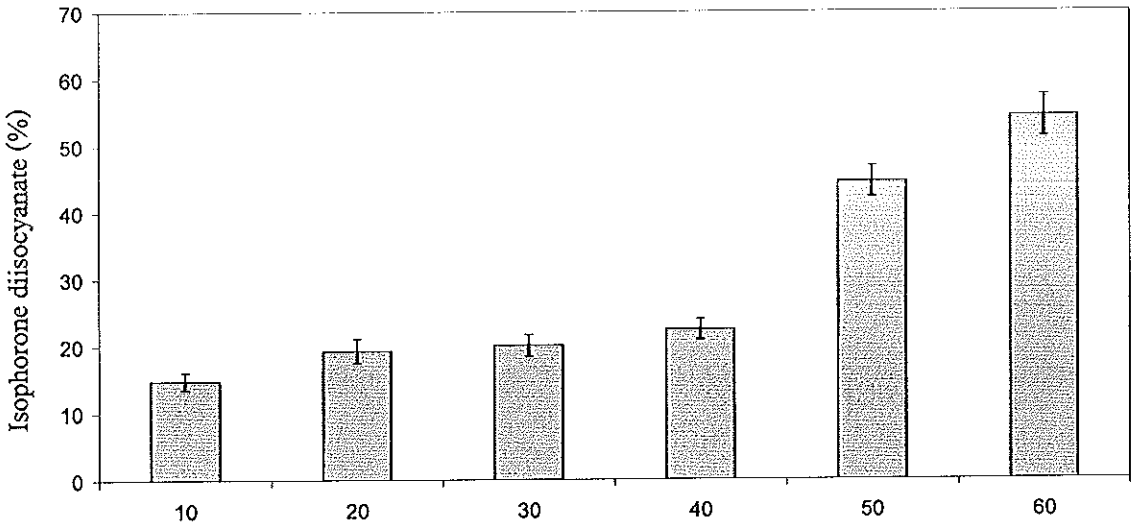
No.	Formula	Isophorone (%)
1	10 min	16.14
2	20 min	15.92
3	30 min	14.69
4	40 min	11.89
5	50 min	18.89
6	60 min	18.09



รูปที่ 4.188 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ

ตารางที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ

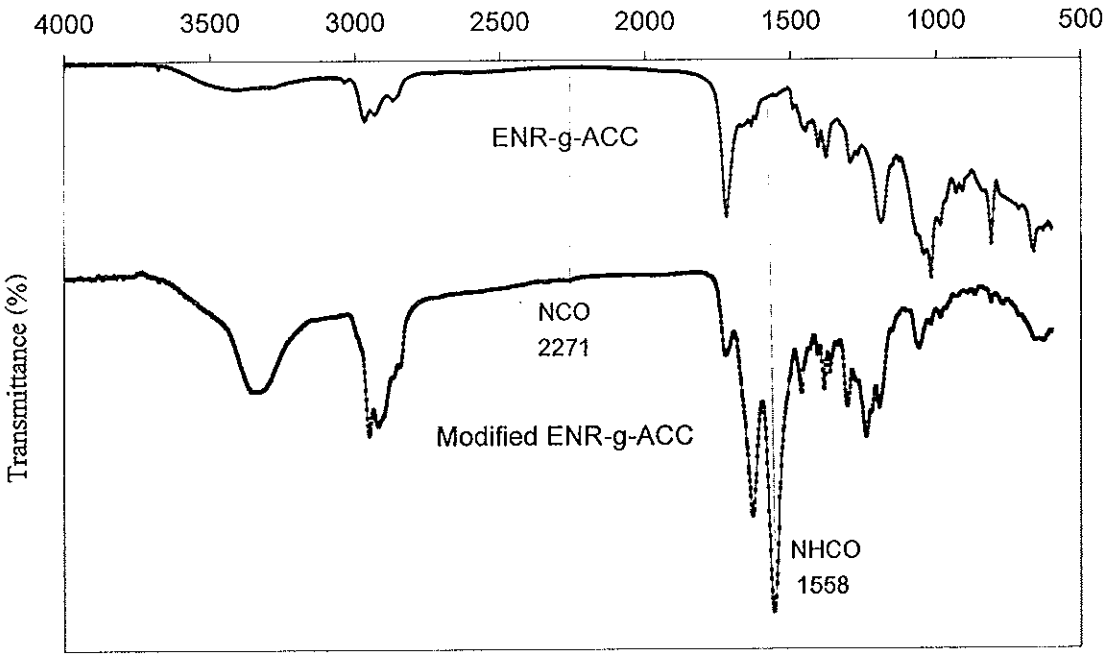
No.	Formula	% isophorone
1	10 min	14.82
2	20 min	19.26
3	30 min	20.07
4	40 min	22.44
5	50 min	44.56
6	60 min	54.35



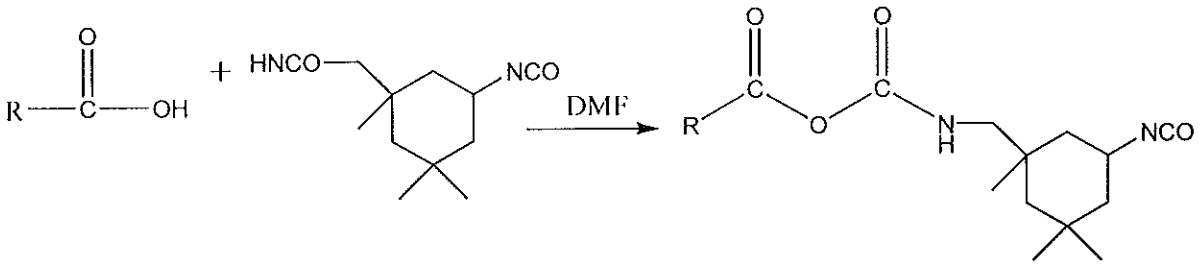
รูปที่ 4.189 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ

4.5.3.2 โครงสร้างทางเคมี

จากรูปที่4.190 สเปคตราอิฟราเรดของแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิคผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจะแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2271 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO หลังจากที่ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเกิดปฏิกิริยาจะทำให้พีคตำแหน่งนี้ลดลง (F.Burel *et al.*, 2005) แต่จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.191



รูปที่ 4.190 โครงสร้างทางเคมีของแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิคผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



R = แผ่นยาง ENR-g-ACC

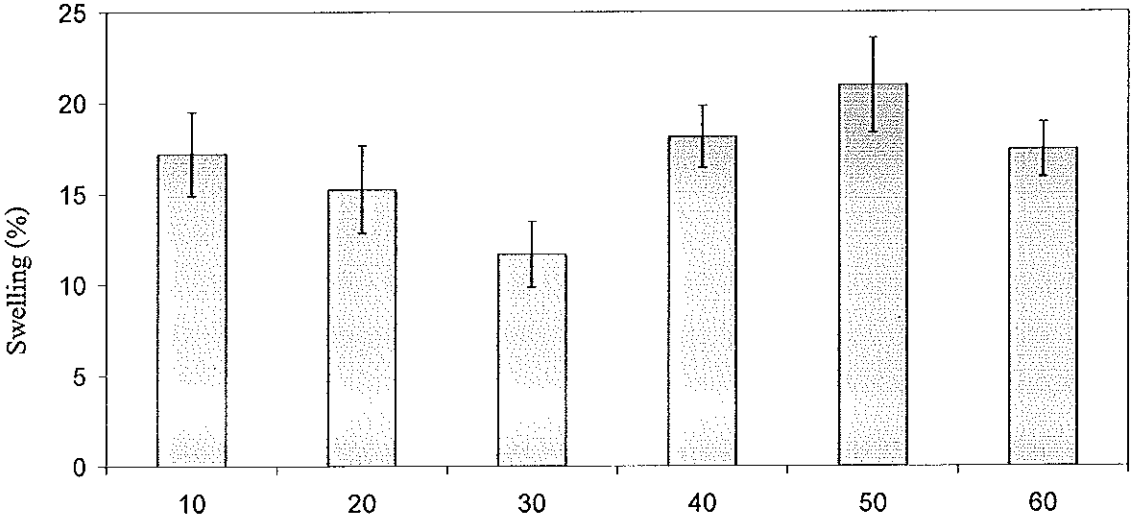
รูปที่ 4.191 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับกับแผ่นยาง ENR-g-ACC (T. Nabuurs *et al.*, 1999)

4.5.3.3 การบวมตัวของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนได ไอโซ่ไซยาเนต

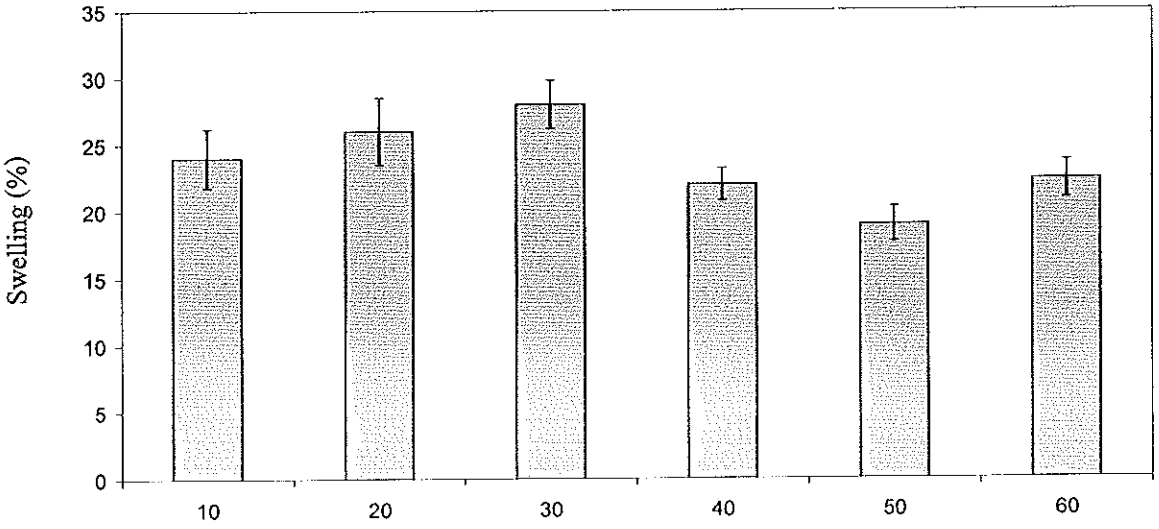
การทดสอบการบวมตัวของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยทำการทดสอบการบวมตัวในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วันได้ผลการทดลองแสดงรูปที่ 4.192

จากรูปที่ 4.192 การบวมตัวในน้ำของแผ่นยาง NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้รังสียูวีต่างๆหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต พบว่าแผ่นยาง NR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีแนวโน้มการบวมตัวในน้ำที่ลดลงในช่วงแรกของการให้

แสงยูวี หลังจากระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 40 นาทีขึ้นไปแผ่นยาง NR-g-ACC จึงมีการบวมตัวในน้ำที่เพิ่มขึ้น สำหรับรูปที่ 4.193 การบวมตัวในน้ำของ ENR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีแนวโน้มการบวมตัวในน้ำที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการให้แสงยูวีจนถึงระยะเวลาการให้แสงยูวี 30 นาที หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวี 40 นาทีการบวมตัวในน้ำของแผ่นยาง ENR-g-ACC จึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวในน้ำระหว่างแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตพบว่าแผ่นยาง ENR-g-ACC มีการบวมตัวในน้ำที่สูงกว่าแผ่นยาง NR-g-ACC สำหรับการทดสอบการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตไม่นำผลการทดลองมาแสดงเนื่องจากแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแล้วยังคงมีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนในปริมาณมากทำให้ยากต่อการแปรผล



รูปที่ 4.192 การบวมตัวในน้ำของ NR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.193 การบวมตัวในน้ำของ ENR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนต การทดสอบพบว่าสมบัติเชิงกลของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ก่อนและหลังดัดแปร ไอโซไซยาเนตค่าที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยาง NR และ ENR เกิดบนผิวเท่านั้น จึงได้นำเอาผลการทดลองสูตรที่ดีที่สุดของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังเคลือบ ไอโซ่ไซยาเนตเปรียบเทียบกับแผ่นยาง NR และ ENR

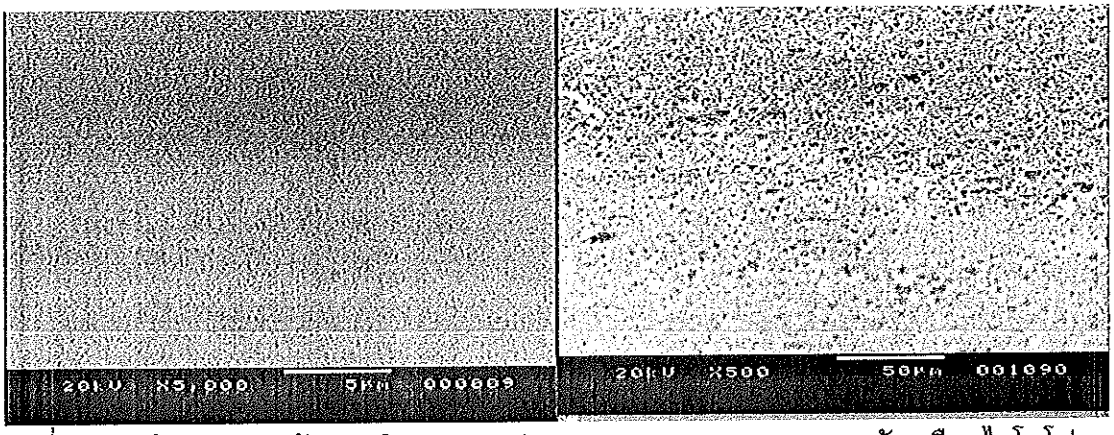
ตารางที่ 4.27 สมบัติเชิงกลของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนต เปรียบเทียบกับแผ่นยาง NR และ ENR

No.	Formula	Elongation (%)	100%modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
1	NR	>800	1.2	4.1
2	NR-g-ACC	>800	1.46	4.14
3	NCO-NR-g-ACC	>800	1.21	5.52
4	ENR	500	2.3	3.5
5	ENR-g-ACC	485	2.4	3.7
6	NCO-ENR-g-ACC	354	1.78	4.52

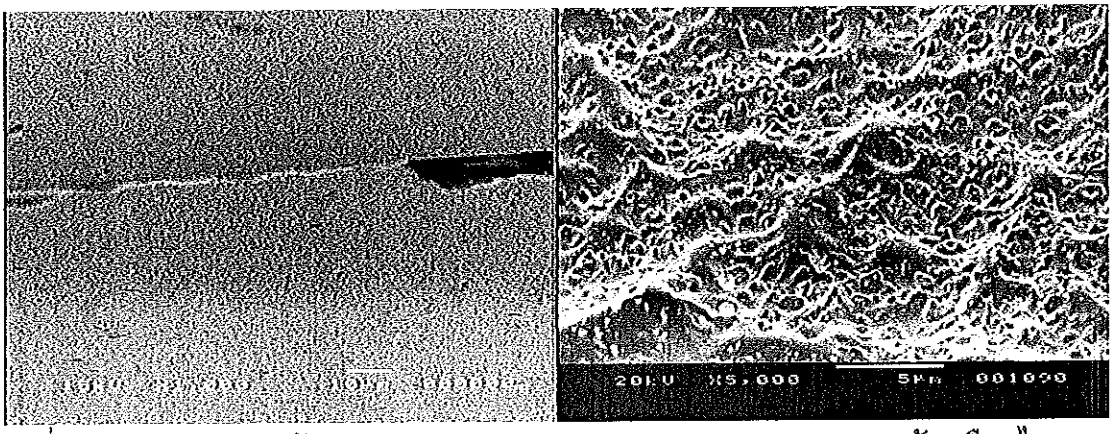
4.5.3.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

4.5.3.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 4.194 และรูปที่ 4.195 เปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง NR และ NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR และ ENR-g-ACC หลังเคลือบไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต พบว่าแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC หลังเคลือบไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแล้วจะมีลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้น



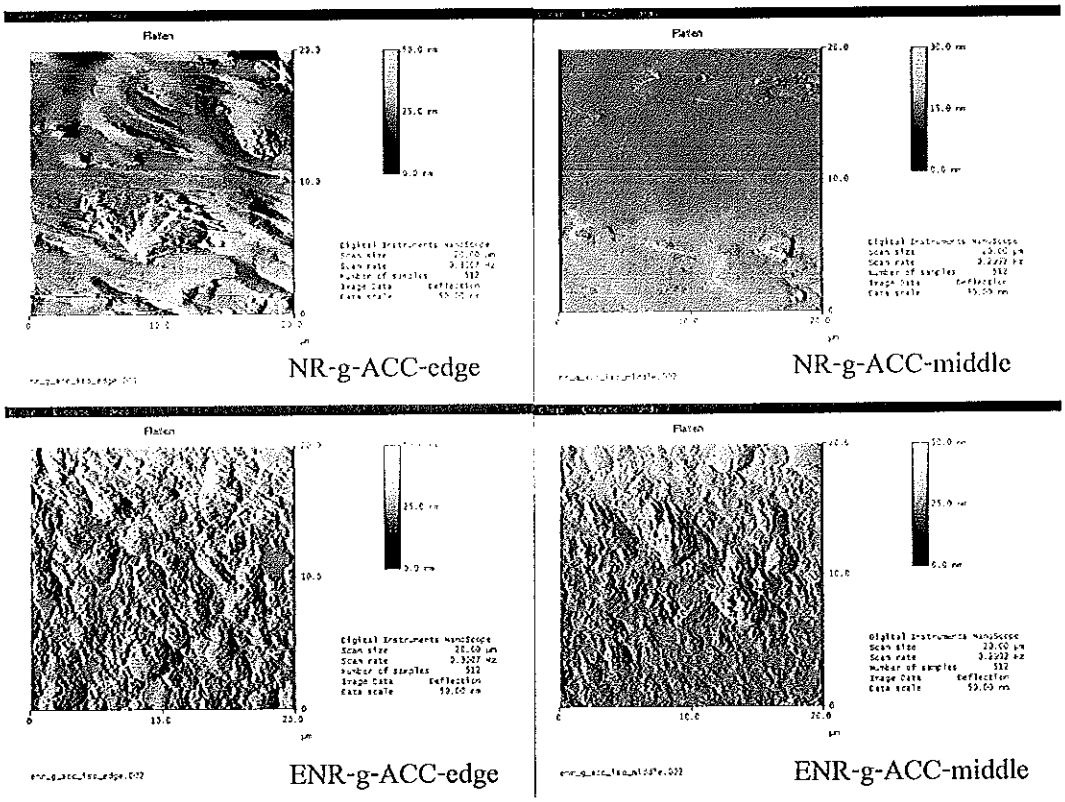
รูปที่ 4.194 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง NR และ NR-g-ACC หลังเคลือบไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.195 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง ENR และ ENR-g-ACC หลังเคลือบไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.3.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

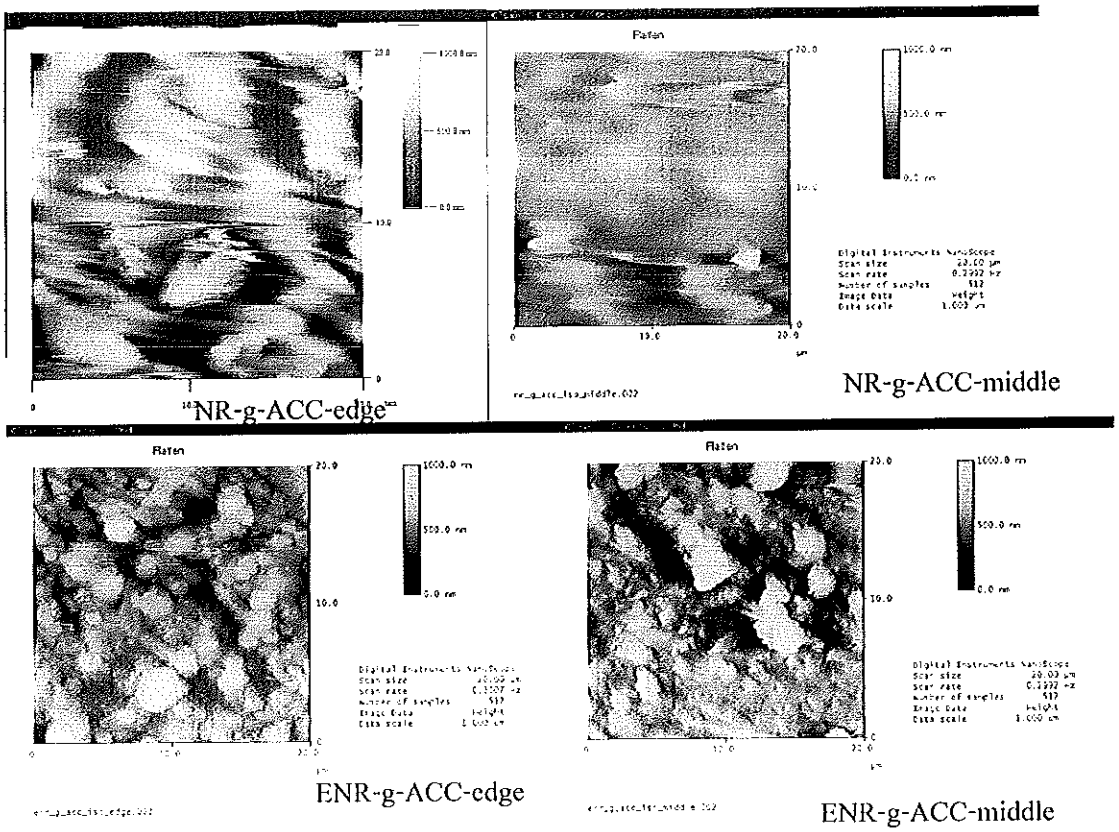
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนตจากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.196 โดยการทดสอบแบบ deflection เป็นการบ่งบอกค่าแรงของแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ จากการทดลองพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนตจะมีลักษณะคล้ายพื้นผิวที่มีความขรุขระซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนตโดย ENR-g-ACC จะมีลักษณะเฟสที่ขรุขระสังเกตได้ชัดเจนกว่า NR-g-ACC แสดงว่าการดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง ENR-g-ACC เกิดได้ดีกว่ายาง NR-g-ACC



รูปที่ 4.196 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.197 สำหรับการทดสอบแบบ height เป็นการบ่งบอกระดับความสูงของแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ จากการทดลองพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ NR-g-ACC และ

ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนต จะมีลักษณะคล้ายพื้นผิวที่มีความขรุขระซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนต โดย ENR-g-ACC จะมีลักษณะเฟสที่ขรุขระสังเกตได้ชัดเจนกว่า NR-g-ACC แสดงว่าการหลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนต บนแผ่นยาง ENR-g-ACC เกิดได้ดีกว่ายาง NR-g-ACC ซึ่งมีผลการทดลองสอดคล้องกับการทดสอบในโหมด deflection



รูปที่ 4.197 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height

ตารางที่ 4.28 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนต จากเครื่อง AFM

Sample		Adhesion force (N.m)			
		1	2	3	Average
NR-g-ACC	EDGE	49.69	50.36	49.65	49.9
	MIDDLE	36.76	38.35	39.47	39.19
ENR-g-ACC	EDGE	28.57	28.95	29.94	28.82
	MIDDLE	9.51	10.19	9.54	9.75

4.5.3.7 การวัดมุมสัมผัส

การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.13 ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.28

เปรียบเทียบมุมสัมผัส NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังตารางที่ 4.28 พบว่าหลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ค่ามุมสัมผัสของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าเพิ่มขึ้น (มุมสัมผัสของNR-g-ACC และ ENR-g-ACC ก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากหัวข้อ 4.3.7 มีค่าเท่ากับ 40.40 และ 30.30 ตามลำดับ) แสดงให้เห็นถึงความชอบน้ำที่ลดลง เนื่องจากส่วนที่ชอบน้ำคือหมู่คาร์บอกซิลิคเกิดปฏิกิริกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.191 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ค่ามุมสัมผัสของ ENR-g-ACC มีค่าน้อยกว่า NR-g-ACC เนื่องจากยาง ENR มีหมู่อิพอกไซด์ซึ่งมีความเป็นขั้วจึงชอบน้ำได้มาก

ตารางที่ 4.29 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

Formula	Contact angle (°)
NR-g-ACC	67.3
ENR-g-ACC	36.1

4.5.4 สรุปผลการทดลองตอนที่ 5

- พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

ประสบความสำเร็จในการเตรียมการดัดแปรแผ่นยางผสม NR/PVA ด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยการวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแผ่น NCO-NR/PVA ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2271 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1552 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แผ่น NCO-NR/PVA ที่ได้มีความทนทานต่อน้ำและโทลูอีนมากขึ้น สมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-NR/PVA ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA จากเทคนิค SEM และ AFM มีลักษณะที่เข้ากันได้ดี และมีเฟสที่ต่อเนื่องกัน แผ่น NCO-NR/PVA ยังคงแสดงสมบัติของความเป็นยาง โดยการวิเคราะห์จากเครื่อง DSC พบค่า T_g เท่ากับ -68.5 °C ค่ามุมสัมผัสของแผ่น NCO-NR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

- พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

ประสบความสำเร็จในการเตรียมการดัดแปรแผ่นยางผสม ENR/PVA ด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยการวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแผ่นที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองใส และสีเหลืองขุ่นที่ปริมาณเกรดมาลีอิคต่ำลง ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแผ่น NCO-ENR/PVA ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2268 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1551 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แผ่น NCO-ENR/PVA ที่ได้มีความทนทานต่อน้ำและโทลูอีนมากขึ้น สมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-ENR/PVA ที่ได้มีค่าสูงกว่าแผ่น NCO-NR/PVA ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA จากเทคนิค SEM และ AFM มีลักษณะที่เข้ากันได้ดี และมีเฟสที่ต่อเนื่องกัน แผ่น NCO-ENR/PVA ยังคงแสดงสมบัติของความเป็นยาง โดยการวิเคราะห์จากเครื่อง DSC พบค่า T_g เท่ากับ -68.66 °C ค่ามุมสัมผัสของแผ่น ENR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

- ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค

ประสบความสำเร็จในการเตรียมการดัดแปรแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC โดยปริมาณการติดไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้แสงยูวีที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณการติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 60 นาที ของแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC เท่ากับ 18.09 และ 54.35% ตามลำดับ ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิคกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2271 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC มีความทนทานต่อน้ำเพิ่มขึ้นหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต แต่ไม่ทนต่อโทลูอี

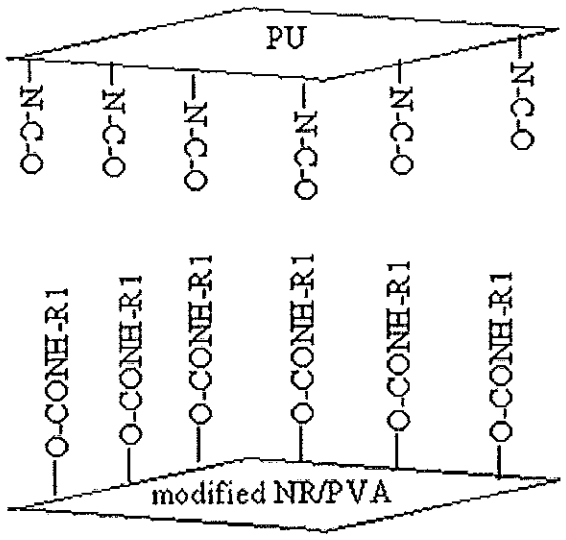
นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของแผ่นยางธรรมชาติเท่านั้น สมบัติเชิงกลแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตมีความขรุขระเพิ่มขึ้น แผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีความชอบน้ำที่ลดลง โดยมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 67.3 และ36.1 ตามลำดับ

4.6 ศึกษาการเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วยพอลียูเทน

การทดลองดังหัวข้อ 3.4.5 โดยการนำแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังหัวข้อที่ 4.5 มาทำการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน สำหรับผลการทดลองในตอนนี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วนย่อยคือ ส่วนที่ 1 การเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปร ส่วนที่ 2 การเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ผ่านการดัดแปร และส่วนที่ 3 การเคลือบแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่ผ่านการดัดแปร ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.6.1 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

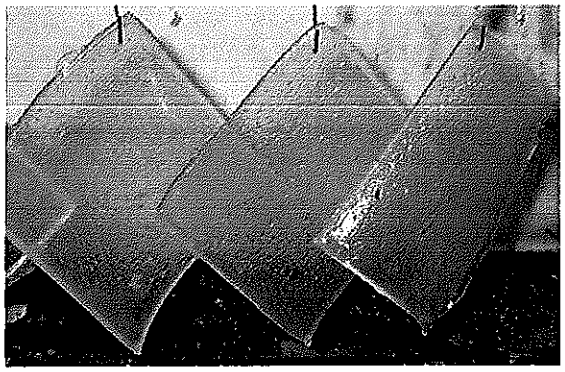
แผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในหัวข้อ 4.5 โดยแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ผิวสามารถเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต เมื่อพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตที่ผิวทำให้แผ่นพอลิเมอร์ผสมสามารถที่เกิดปฏิกิริยากับพอลิยูรีเทนต่อไปได้ได้ง่ายมากขึ้น ดังแผนภาพในรูปที่ 4.198 ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.198 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต กับพอลิยูรีเทน

4.6.1.1 ลักษณะแผ่นที่ได้จากการเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

การเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรดังหัวข้อ 3.4.5 โดยทำการเคลือบในเพลตกระจกที่มีฝาปิด ที่ประกอบด้วย ไดเอทิลีนไกลคอลกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ไดบิวทิน ไดลอเรต ทำการเคลือบโดยการใส่แผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมขนาด 13 x 13 cm แช่ไว้เป็นเวลา 10 นาที นำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 วัน ซึ่งลักษณะของแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต (NCO-NR/PVA) กับพอลิยูรีเทน จะมีลักษณะคล้ายๆหยดน้ำมันเกาะกระจายอยู่บนผิวของแผ่น NCO-NR/PVA ภายหลังการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน(NCO-NR/PVA-PU) แต่ภายหลังการวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ได้แผ่น NCO-NR/PVA-PU ที่มีลักษณะแข็งและมีผิวลื่นและเรียบมากขึ้น



รูปที่ 4.199 ลักษณะแผ่น NCO-NR/PVA-PU

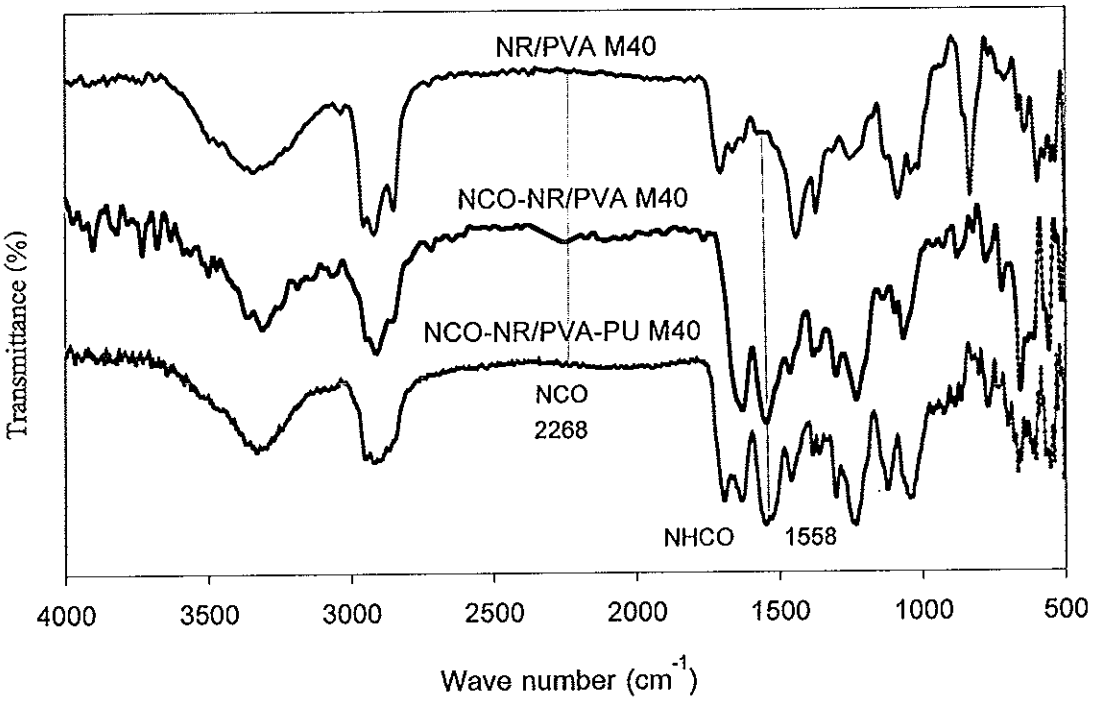
4.6.1.2 โครงสร้างทางเคมีของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

4.6.1.2.1 โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR

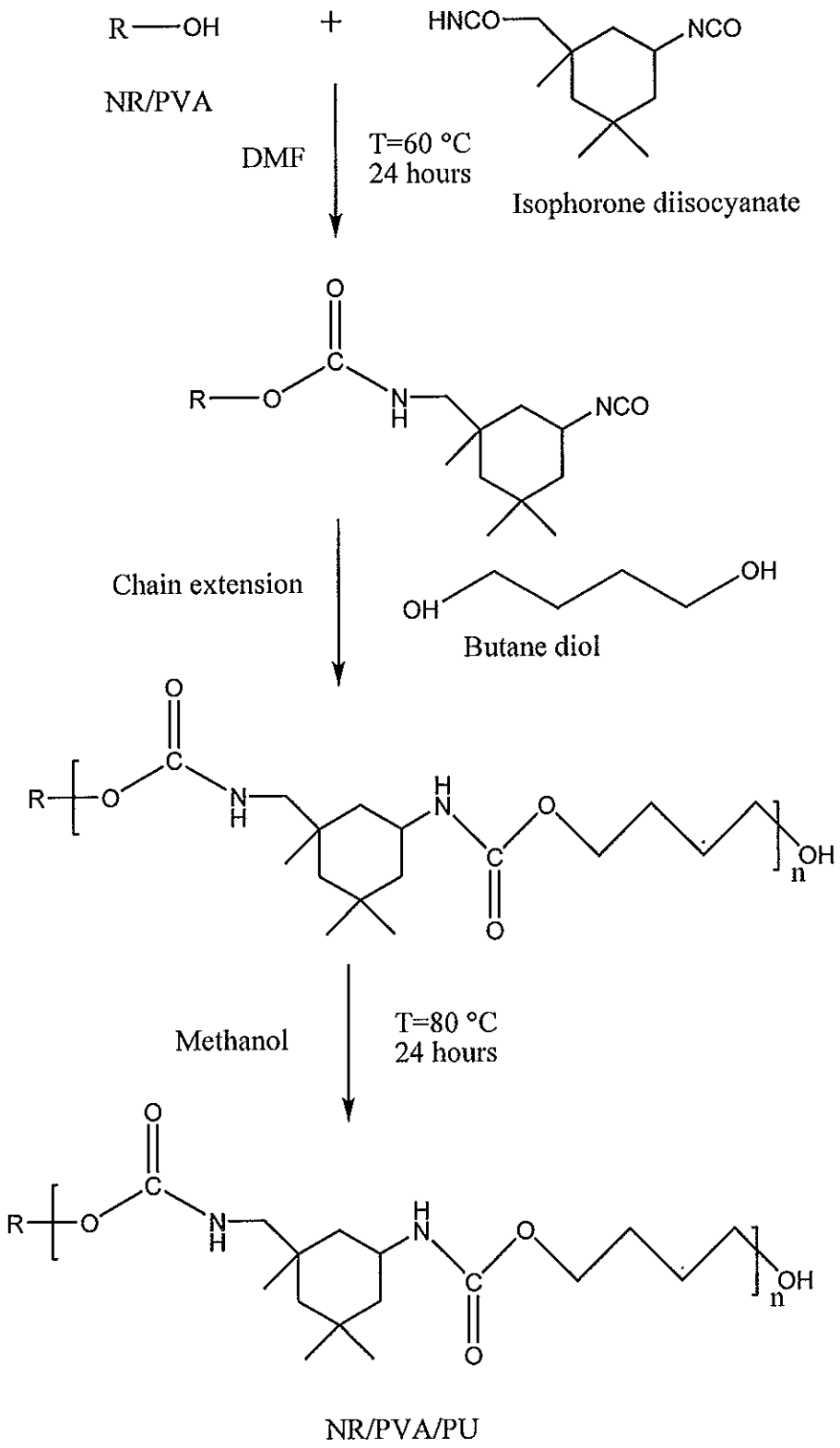
การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของแผ่น NCO-NR/PVA-PU เพื่อเป็นการยืนยันปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทนบนแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ตามปฏิกิริยาในรูปที่ 4.201 โดยจากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.200

สเปคตราอิฟราเรดของแผ่น NCO-NR/PVA-PU เปรียบเทียบกับแผ่น NCO-NR/PVA และแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% ดังรูปที่4.200 โดยแผ่น NCO-NR/PVA-PU จะแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2268 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO หลังจากที่เคลือบพอลิเมอร์ผสม NCO-NR/PVA ด้วยพอลิยูรีเทน ซึ่งมีสารขยายสายโซ่คือบิวเทนไดออลมาต่อเมื่อ

เกิดปฏิกิริยาจะทำให้พีคตำแหน่งนี้ลดลง (F.Burel *et al.*, 2005) โดย NCO-NR/PVA-PU จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสม NCO-NR/PVA ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.201



รูปที่ 4.200 สเปคตราอินฟราเรดของแผ่น NCO-NR/PVA-PU



NR/PVA/PU

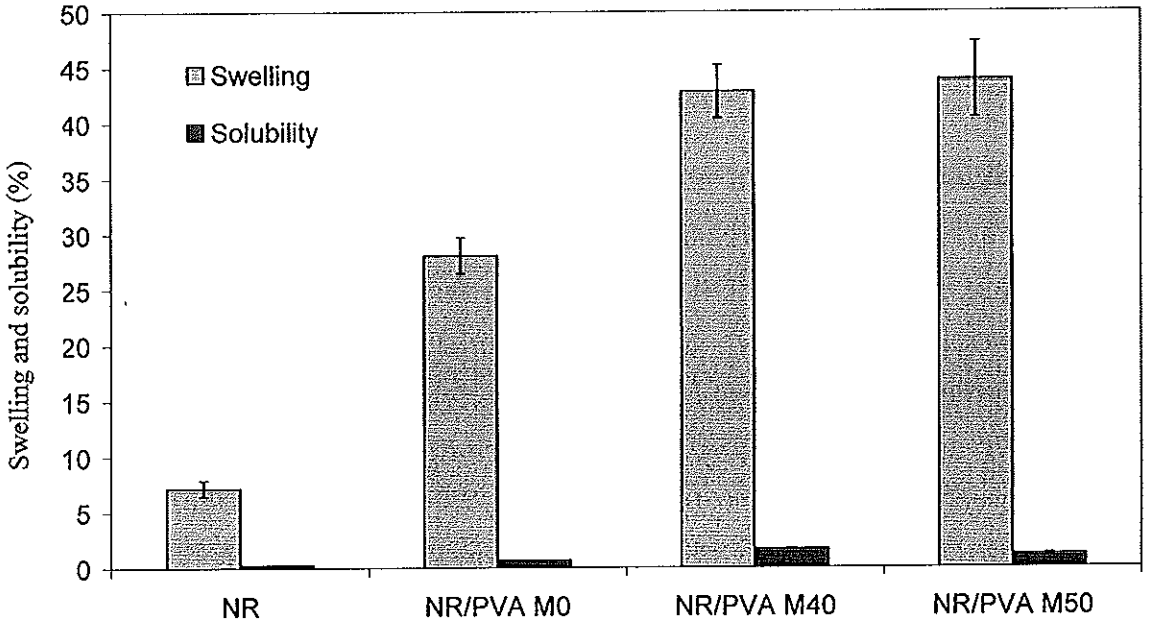
R = แผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

รูปที่ 4.201 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

4.6.1.3 การบวมตัวของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

ก. การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำ

การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำของแผ่น NCO-NR/PVA-PU ดังรูปที่ 4.202 พบว่าแผ่น NCO-NR/PVA-PU การบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางที่ใช้เพิ่มขึ้นโดยเมื่อเปรียบเทียบกับการบวมตัวในน้ำกับแผ่น NCO-NR/PVA ดังหัวข้อที่ 4.5.1.3 พบว่ามีการบวมตัวในน้ำที่ใกล้เคียงกัน และความสามารถในการละลายน้ำของแผ่น NCO-NR/PVA-PU มีค่าค่อนข้างต่ำมากแสดงให้เห็นว่า การดัดแปรมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตและเกิดปฏิกิริยาต่อกับพอลิยูรีเทน ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.200 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ส่วนของ PVA เพียงเล็กน้อยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาที่ถูกละลายออกไป

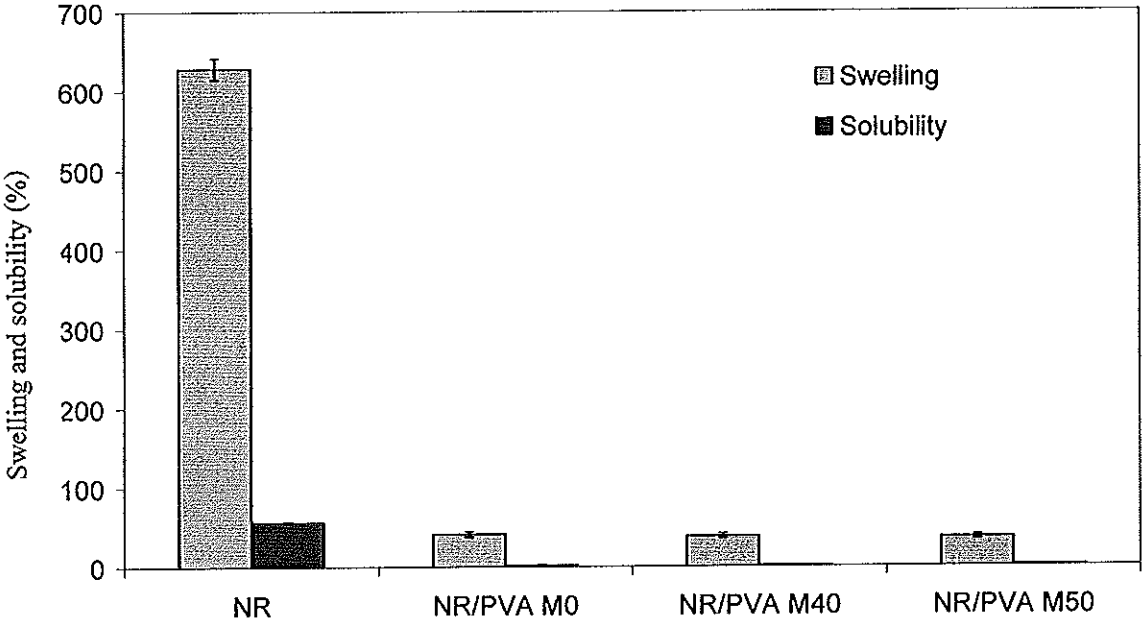


รูปที่ 4.202 การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำของแผ่น NCO-NR/PVA-PU

ข. การบวมตัวในโทลูอีน

จากรูปที่ 4.203 การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของแผ่น NCO-NR/PVA-PU พบว่ายาง NR มีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่สูง แต่หลังจากเคลือบแผ่น NCO-NR/PVA ด้วยพอลิยูรีเทน พบว่าแผ่น NCO-NR/PVA-PU มีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่ลดลง โดยการบวมตัวและ

ความสามารถในการละลายโทลูอีนของแผ่น NCO-NR/PVA-PU มีค่าใกล้เคียงกับแผ่น NCO-NR/PVA ดังหัวข้อ 4.5.1.3 ข

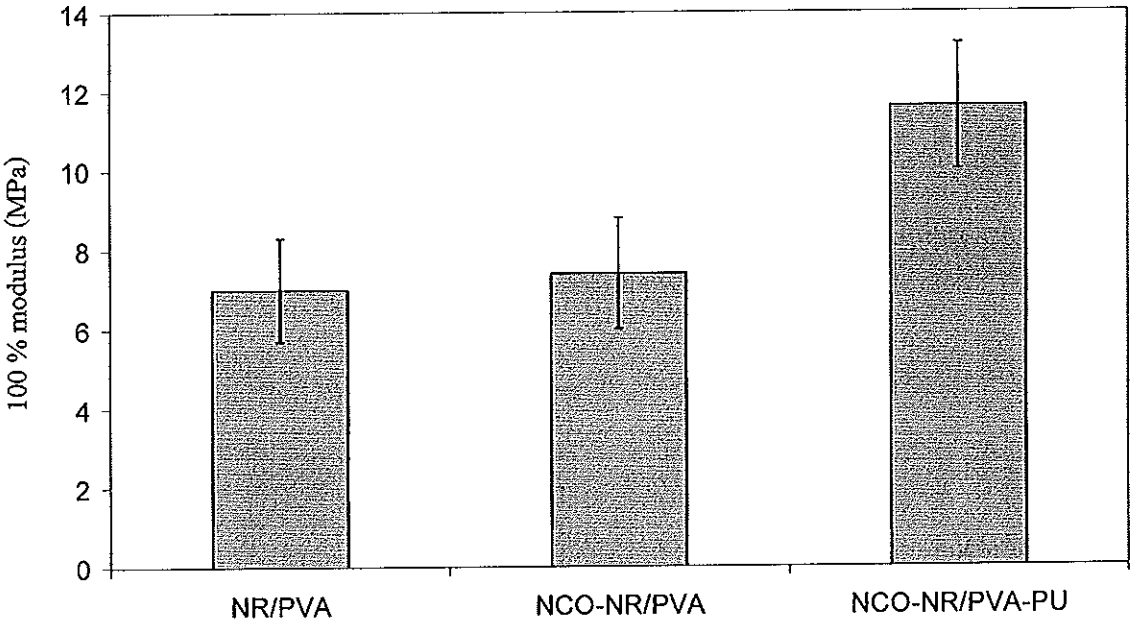


รูปที่ 4.203 การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของแผ่น NCO-NR/PVA-PU

4.6.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

ก. มอดุลัสที่ระยะยืด 100 %

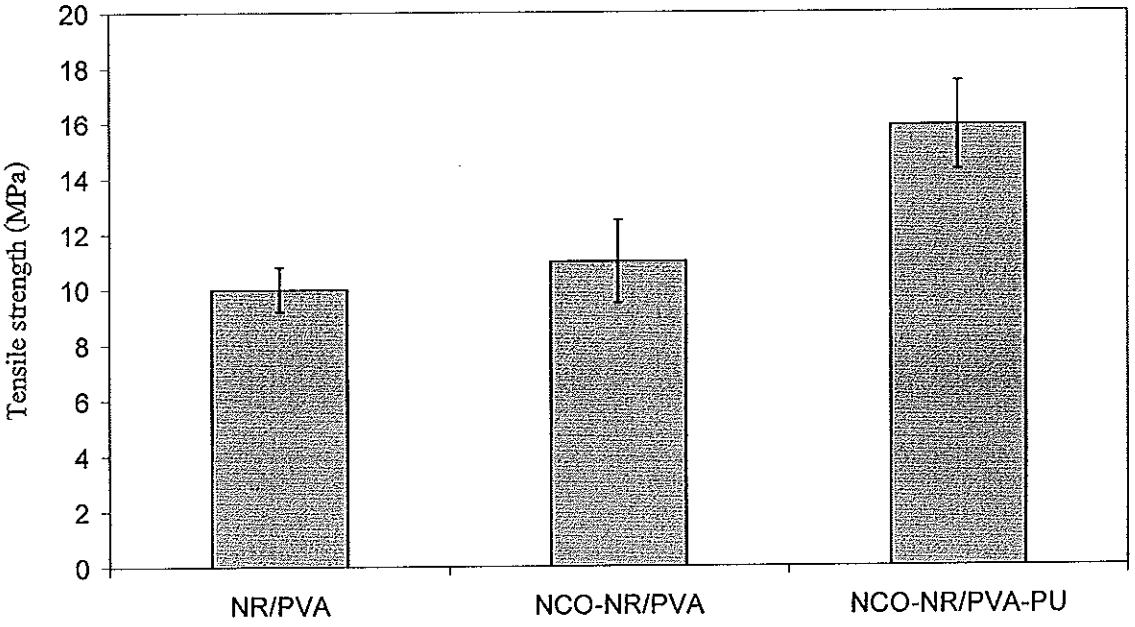
ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของแผ่น NCO-NR/PVA-PU ดังรูปที่ 4.204 พบว่าค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของแผ่น NCO-NR/PVA-PU มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่น NCO-NR/PVA ดังหัวข้อที่ 4.5.1.4 ก. เนื่องมาจากการเคลือบแผ่น NCO-NR/PVA ด้วยพอลิยูรีเทน ทำให้ผิวของแผ่น NCO-NR/PVA มีสายโซ่ของพอลิยูรีเทนมาต่อยาวมากขึ้น ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.200 ทำให้แผ่น NCO-NR/PVA-PU มีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 4.204 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของแผ่น NCO-NR/PVA-PU

ข. ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

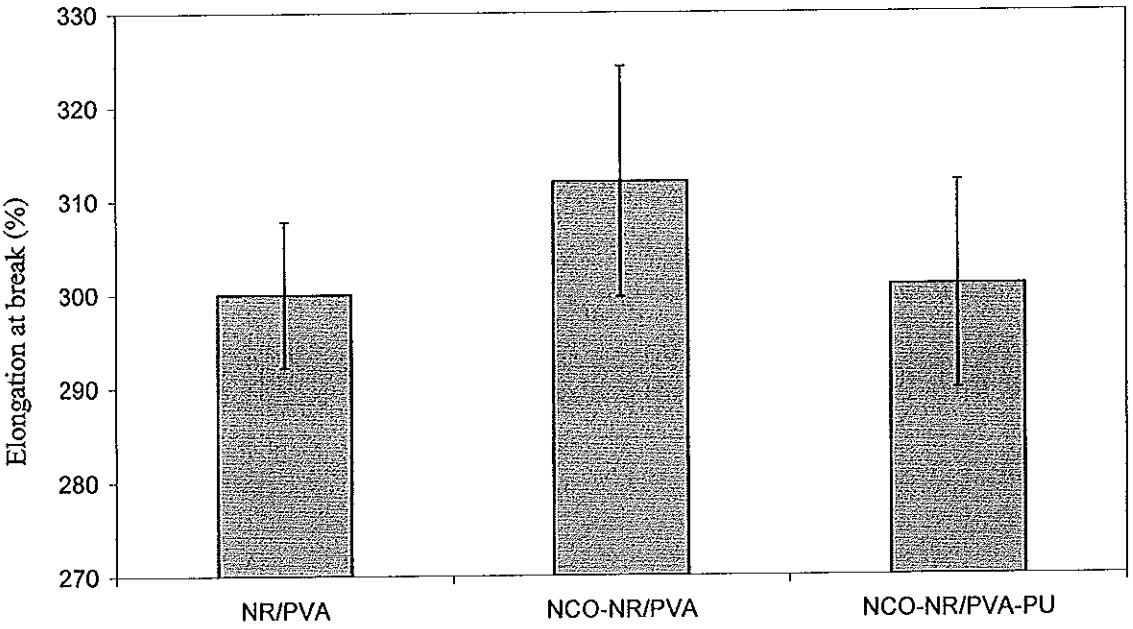
ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่น NCO-NR/PVA-PU ดังรูปที่ 4.205 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่น NCO-NR/PVA-PU มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่น NCO-NR/PVA ดังหัวข้อที่ 4.5.1.4 ค. เช่นเดียวกันกับค่ามอดุลัสระยะยืดที่ 100% เนื่องมาจากการเคลือบแผ่น NCO-NR/PVA ด้วยพอลิยูรีเทน ทำให้ผิวของแผ่น NCO-NR/PVA มีสายโซ่ของพอลิยูรีเทนมาต่อยาวมากขึ้น ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.201 ทำให้แผ่น NCO-NR/PVA-PU มีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 4.205 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของแผ่น NCO-NR/PVA-PU พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของแผ่น NCO-NR/PVA-PU มีค่าเพิ่มขึ้น

ค. สมบัติด้านความสามารถในการยืด

จากรูปที่ 4.206 ค่าความสามารถในการยืดของแผ่น NCO-NR/PVA-PU พบว่าแผ่น NCO-NR/PVA-PU มีค่าความสามารถในการยืดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่น NCO-NR/PVA เนื่องมาจากการเคลือบแผ่น NCO-NR/PVA ด้วยพอลิยูรีเทน ทำให้ผิวของแผ่น NCO-NR/PVA มีสายโซ่ของพอลิยูรีเทนมาต่อยาวมากขึ้น ทำให้แผ่น NCO-NR/PVA-PU มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยแผ่น NCO-NR/PVA-PU ที่มีความแข็งแรงมากขึ้นจึงทำให้ความสามารถในการยืดลดลงตามไปด้วย

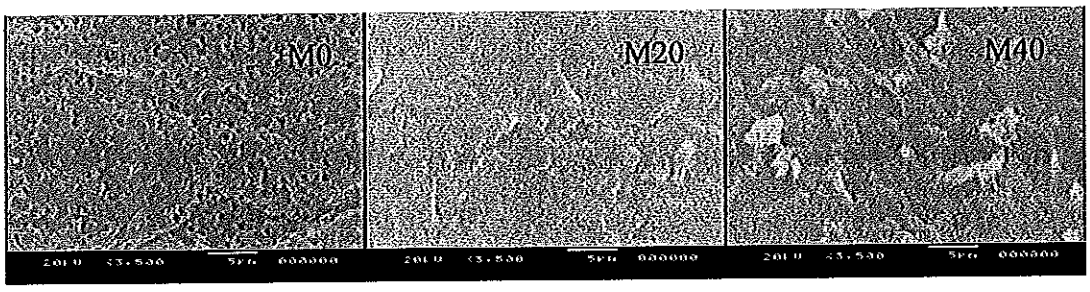


รูปที่ 4.206 ค่าความสามารถในการยืดของแผ่น NCO-NR/PVA-PU

4.6.1.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

4.6.1.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

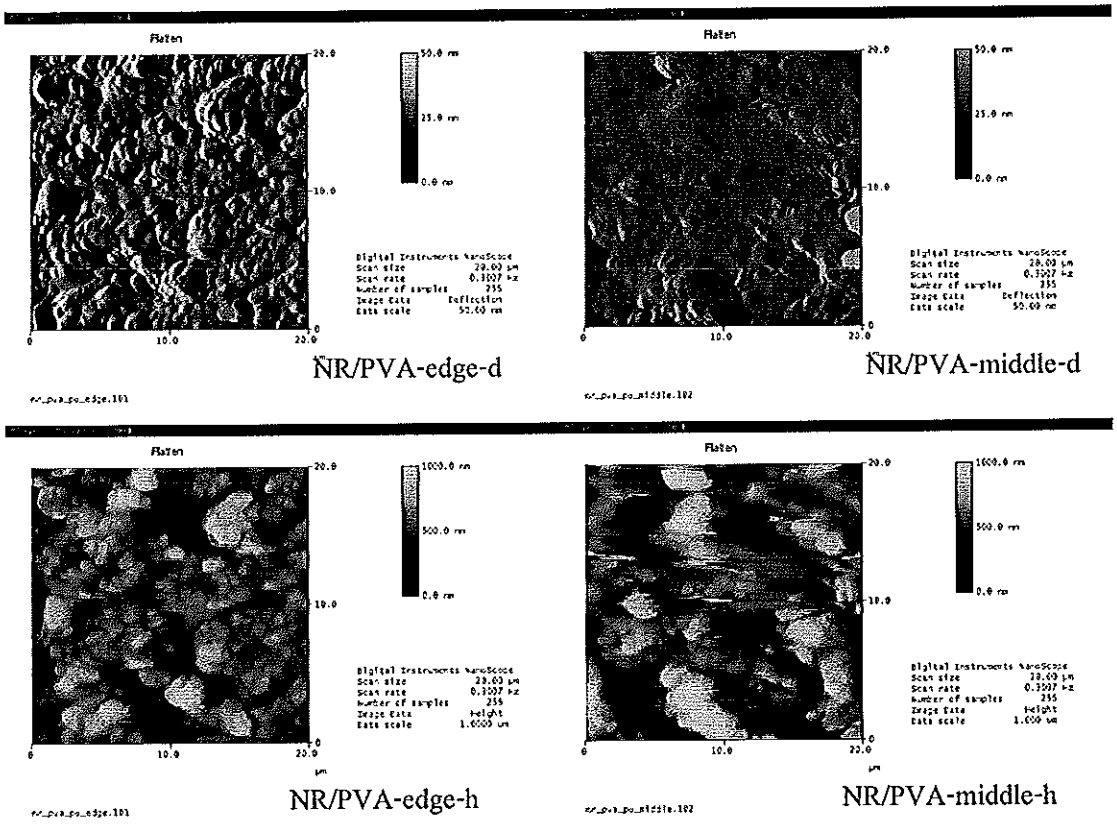
จากรูป 4.207 พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาแผ่น NCO-NR/PVA-PU ที่ใช้ปริมาณกรดมาลีอิค 0% ปรากฏเป็นเฟสที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเฟสที่ไม่ต่อเนื่องเป็นส่วนของยาง NR ที่ถูกสกัดออกไปด้วยโทลูอีน แต่สำหรับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA-PU ที่ใช้ปริมาณกรดมาลีอิค 20 และ 40% จะปรากฏเฟสที่ต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกันหลังจากการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน แสดงให้ถึงความทนทานต่อตัวทำละลายโทลูอีนของแผ่น NCO-NR/PVA-PU ซึ่งเป็นผลการทดลองที่สอดคล้องกับการทดสอบความทนทานต่อตัวทำละลาย



รูปที่ 4.207 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA-PU

4.6.1.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

จากรูปที่ 4.208 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA-PU จากเครื่อง AFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height พบว่าแผ่น NCO-NR/PVA-PU M40 มีเฟสที่แตกต่างกันกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงให้เห็นถึงพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดี



รูปที่ 4.208 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA-PU จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height

ตารางที่ 4.30 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NCO-NR/PVA-PU M40 จากเครื่องAFM

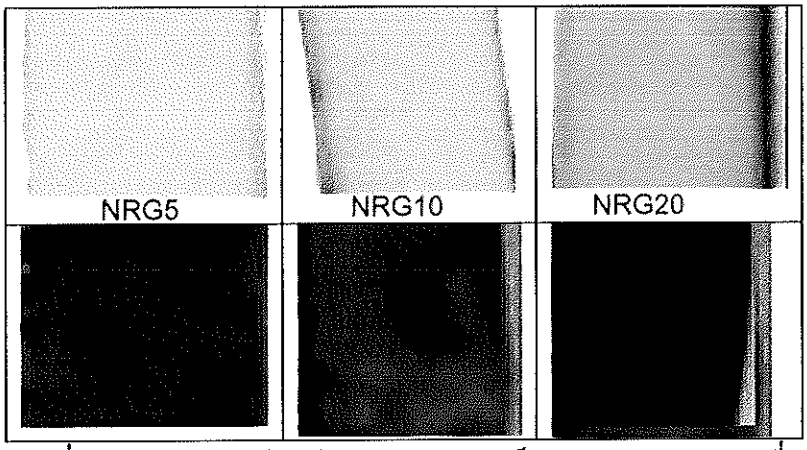
Sample	Adhesion force (N.m)			
	1	2	3	Average
EDGE	33.22	33.46	36.02	34.23
MIDDLE	24.56	23.75	23.87	24.06

จากตารางที่ 4.30 แสดงค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง NCO-NR/PVA-PU M40 จากเครื่องAFM พบว่าค่าแรงยึดติดที่ผิวและภายในตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกัน

4.6.1.6 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

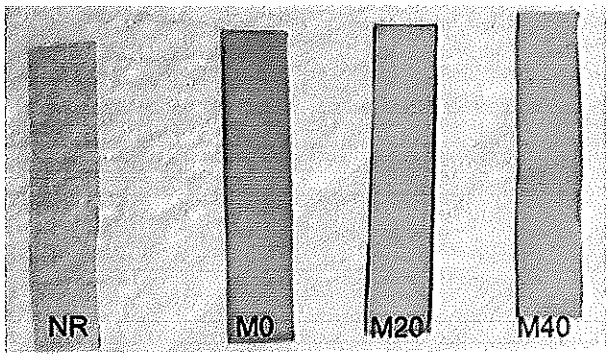
การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.15 การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA โดยการนำชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% เปรียบเทียบกับ NR ทำการทดสอบฝังดินเป็นระยะเวลา 3 เดือน

ลักษณะพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ที่ปริมาณกลีเซอรอล 5 10 และ 20%ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพแสดงรูปที่ 4.209 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ที่ปริมาณกลีเซอรอล 5 10 และ 20% หลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีลักษณะที่เปลี่ยนเป็นสีดำแสดงให้เห็นถึงการมีแนวโน้มที่สามารถย่อยสลายได้เองทางชีวภาพ

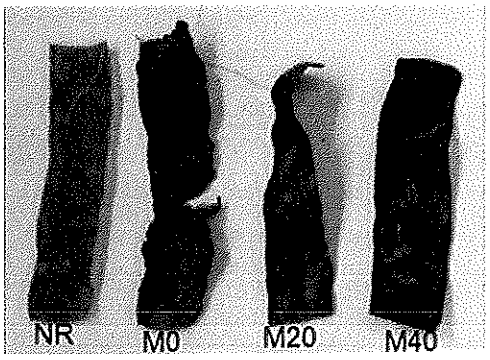


รูปที่ 4.209 เปรียบเทียบลักษณะพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ที่ปริมาณกลีเซอรอล 5 10 และ 20%ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

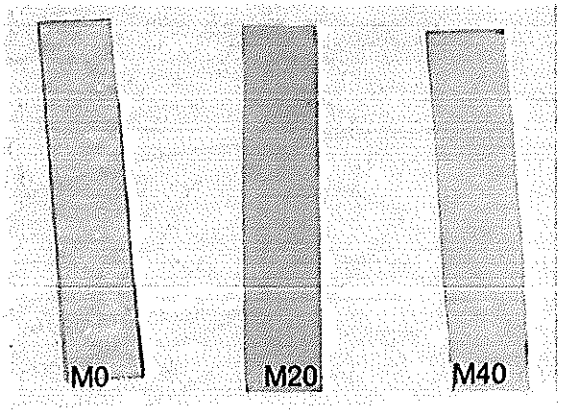
จากรูปที่ 210 เปรียบเทียบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA NCO-NR/PVA และ NCO-NR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มสามารถย่อยสลายเองได้ทางชีวภาพโดยสังเกตจากลักษณะสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพและชิ้นตัวอย่างมีลักษณะขาดเป็นริ้วๆ แต่หลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน ชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มย่อยสลายได้น้อยลง โดยมีเพียงสีที่เปลี่ยนเป็นสีดำ แต่ไม่มีลักษณะการขาดของชิ้นตัวอย่างเกิดขึ้น



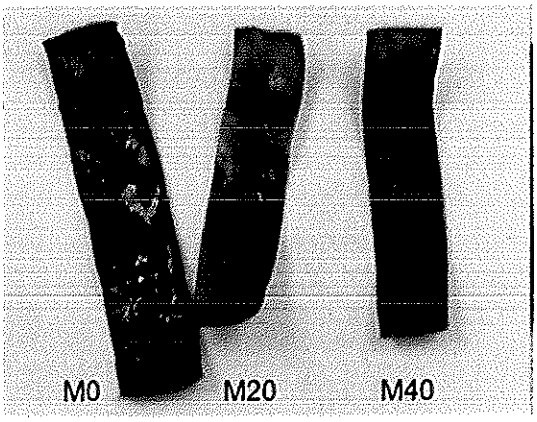
NR/PVA ก่อนการทดสอบ



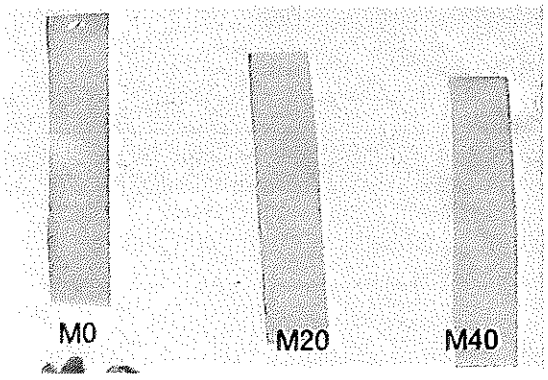
NR/PVA หลังการทดสอบ



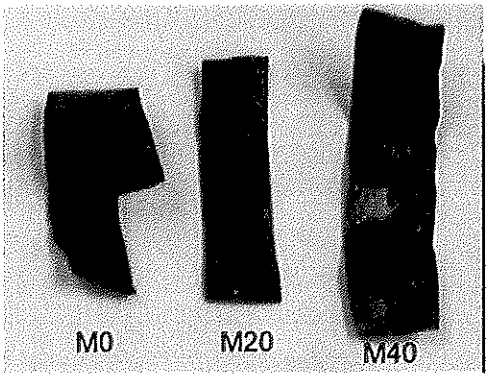
NCO-NR/PVA ก่อนการทดสอบ



NCO-NR/PVA หลังการทดสอบ



NCO-NR/PVA-PU ก่อนการทดสอบ

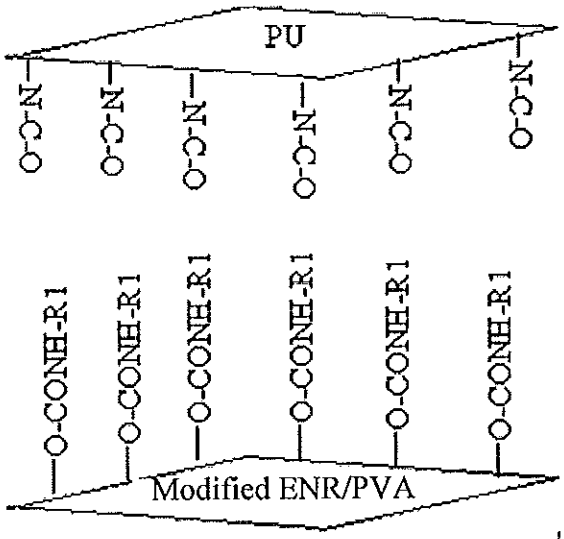


NCO-NR/PVA-PU หลังการทดสอบ

รูปที่ 4.210 เปรียบเทียบลักษณะพอลิเมอร์ผสม NR/PVA NCO-NR/PVA และ NCO-NR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพกับ NR

4.6.2 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

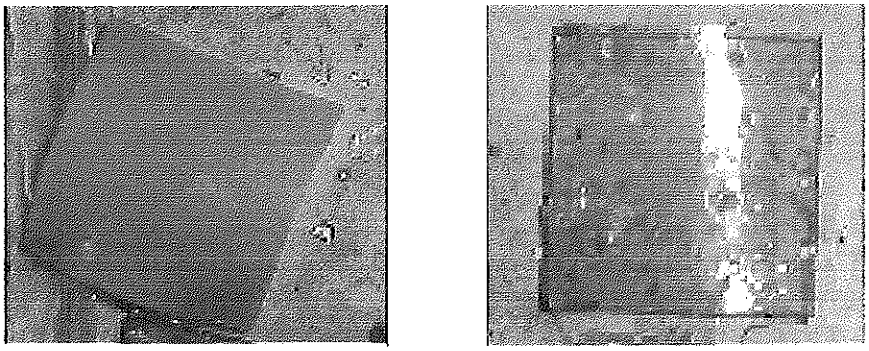
แผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในหัวข้อ 4.5 โดยแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ผิวสามารถเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.201 ทำให้แผ่นพอลิเมอร์ผสมสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยากับพอลิยูรีเทนต่อไปได้ดังแผนภาพในรูปที่ 4.211



รูปที่ 4.211 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่น ENR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต กับพอลิยูรีเทน

4.6.2.1 การเตรียมการเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

การเคลือบแผ่น ENR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรดังหัวข้อ 3.4.5 โดยทำการเคลือบในเพลตกระจกที่มีฝาปิด ที่ประกอบด้วย ไดเอทิลีนไกลคอลกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ไดบิวทิน ไดลอเรต ทำการเคลือบโดยการใส่แผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมขนาด 13 x 13 cm แช่ไว้เป็นเวลา 10 นาที นำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 วัน ซึ่งลักษณะของแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต (NCO-ENR/PVA) กับพอลิยูรีเทน จะมีลักษณะคล้ายๆ หยดน้ำมันเกาะกระจายอยู่บนผิวของแผ่น NCO-ENR/PVA ภายหลังการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน(NCO-ENR/PVA-PU) แต่ภายหลังการวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ได้แผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่มีลักษณะแข็งและมีผิวลื่นและเรียบมากขึ้นซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับแผ่น NCO-NR/PVA-PU

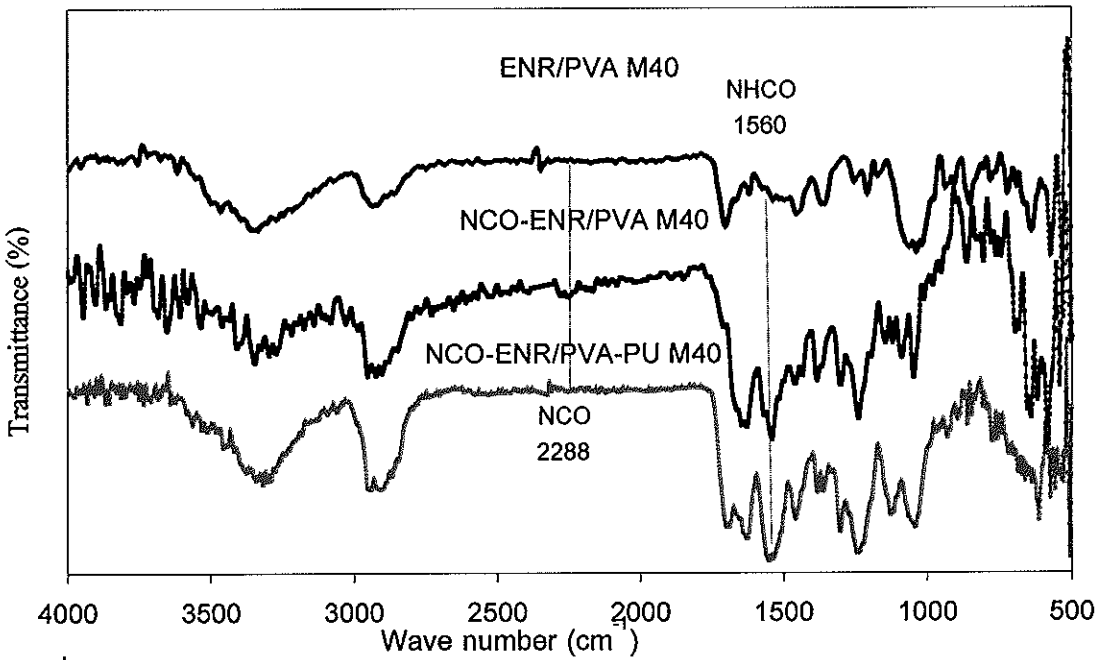


NCO-ENR/PVA-PU M0 NCO-ENR/PVA-PU M40

รูปที่ 4.212 ลักษณะของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M0 และ NCO-ENR/PVA-PU M40

4.6.2.2 โครงสร้างทางเคมีของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

จากรูปที่4.213 สเปคตรัมอิฟราเรดของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิด40% โดยแผ่น ENCO-NR/PVA-PU จะแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2288 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO หลังจากที่เคลือบพอลิเมอร์ผสม NCO-ENR/PVA ด้วยพอลิยูรีเทน ซึ่งมีสารขยายสายโซ่คือบิวเทนไดออลมาต่อเมื่อหลังจากที่ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเกิดปฏิกิริยาจะทำให้พีคตำแหน่งนี้ลดลง (F.Burel *et al.*, 2005) แต่จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1560 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.201

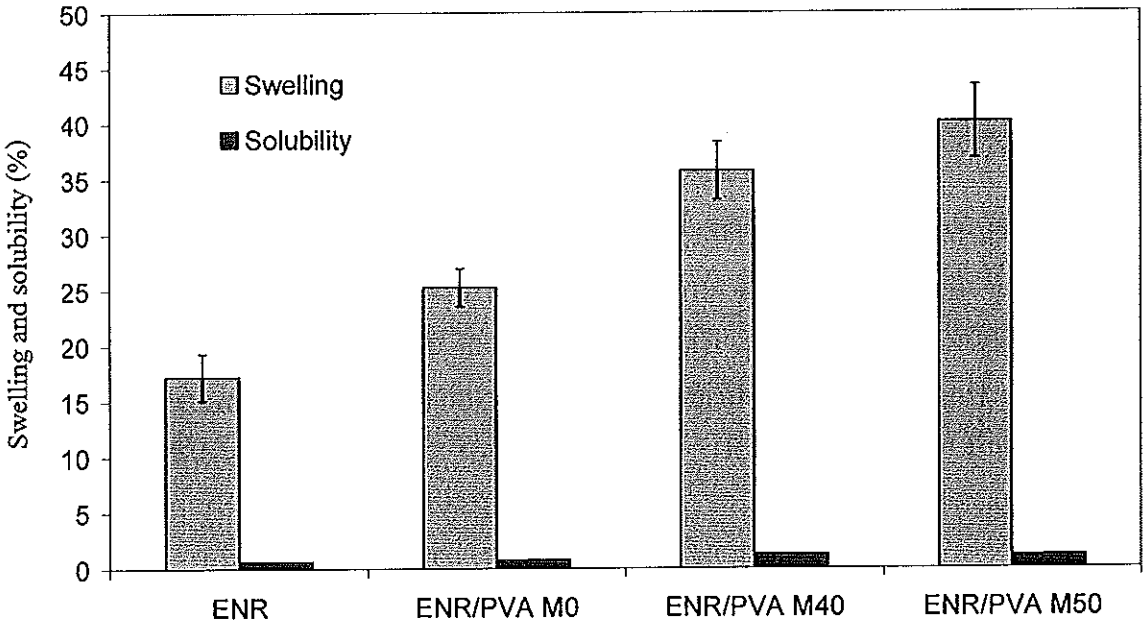


รูปที่ 4.213 สเปคตราอินฟราเรดของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU

4.6.2.3 การบวมตัวของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

ก. การบวมตัวในน้ำ

จากรูปที่ 4.214 การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% พบว่าแผ่น NCO-ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน มีการบวมตัวในน้ำและความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตดังในหัวข้อ 4.4.2.1 และแผ่น NCO-ENR/PVA-PU มีการบวมตัวที่ใกล้เคียงกับแผ่น NCO-ENR/PVA สำหรับความสามารถในการละลายน้ำของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU มีค่าต่ำกว่าแผ่น NCO-ENR/PVA เล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าแผ่น NCO-ENR/PVA มีการเกิดปฏิกิริยากับพอลิยูรีเทนดังรูปที่ 4.201

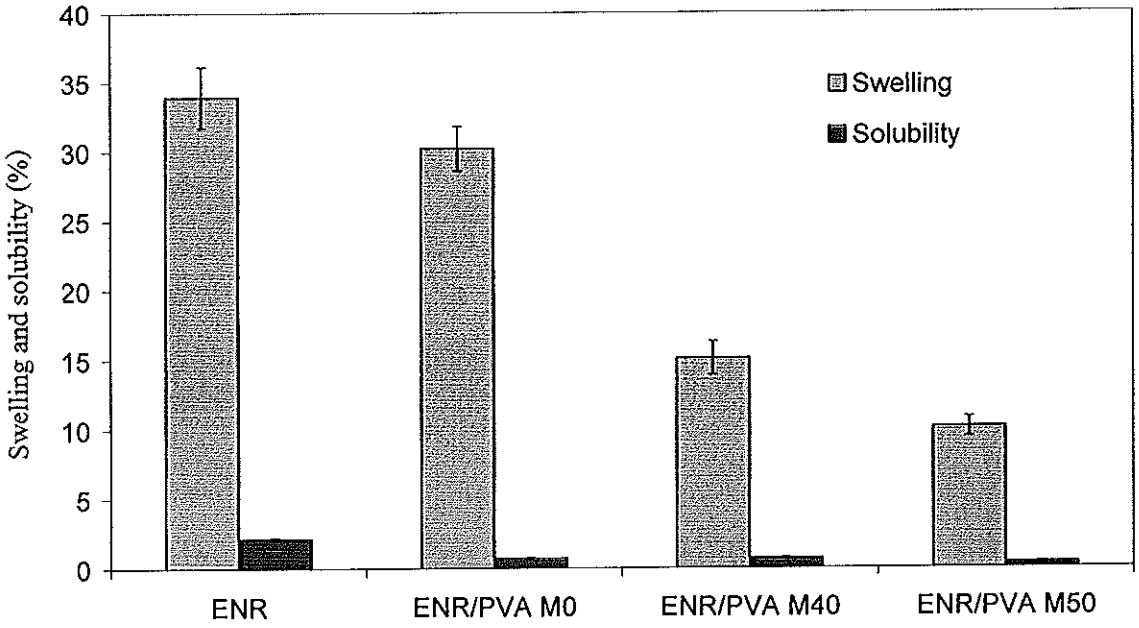


รูปที่ 4.214 การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU

ข. การบวมตัวในโทลูอีน

จากรูปที่ 4.215 การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% พบว่าแผ่น NCO-ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนมีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟ

โรนไดไอโซไซยาเนต ดังหัวข้อที่ 4.4.2.2 ซึ่งการละลายในโทลูอีนที่ลดลงแสดงถึงแผ่น NCO-ENR/PVA-PU มีความทนทานต่อโทลูอีนมาก

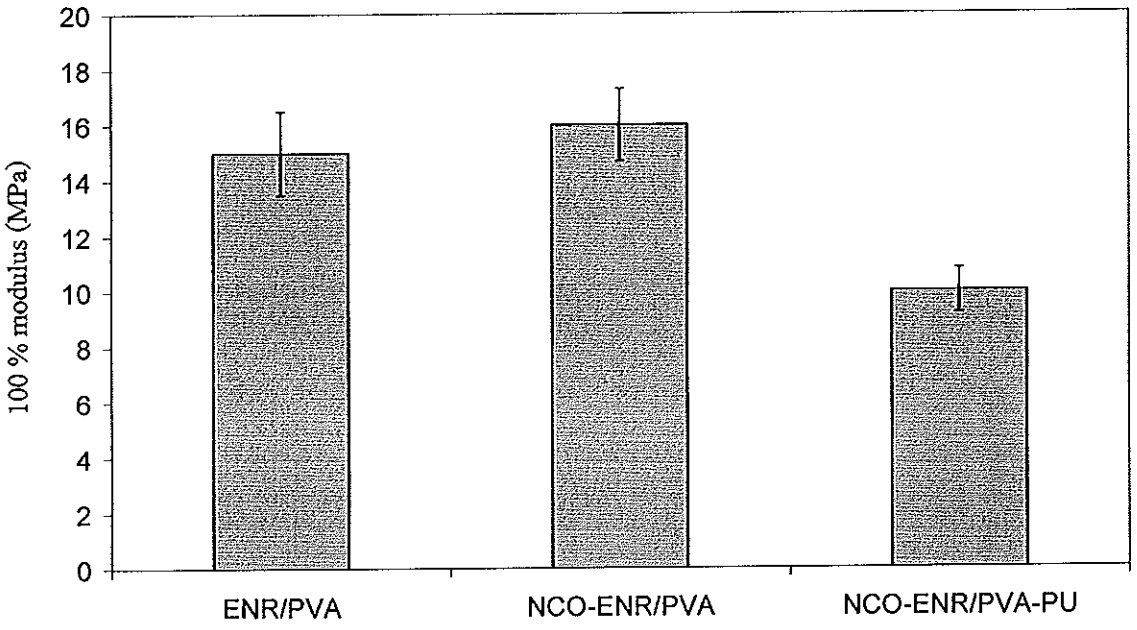


รูปที่ 4.215 การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU

4.6.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

ก. 100 % โมดูลัส

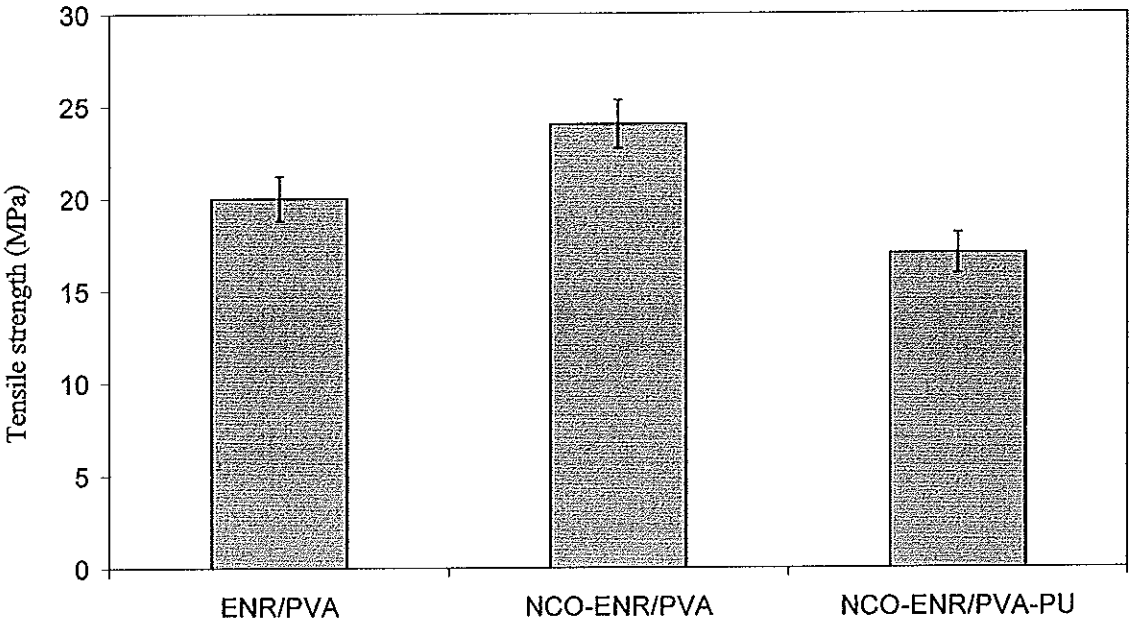
จากรูปที่ 4.216 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU เปรียบเทียบกับแผ่น NCO-ENR/PVA และแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 พบว่าแผ่น NCO-ENR/PVA-PU มีค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่น NCO-ENR/PVA และแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40



รูปที่ 4.216 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU

ข. ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

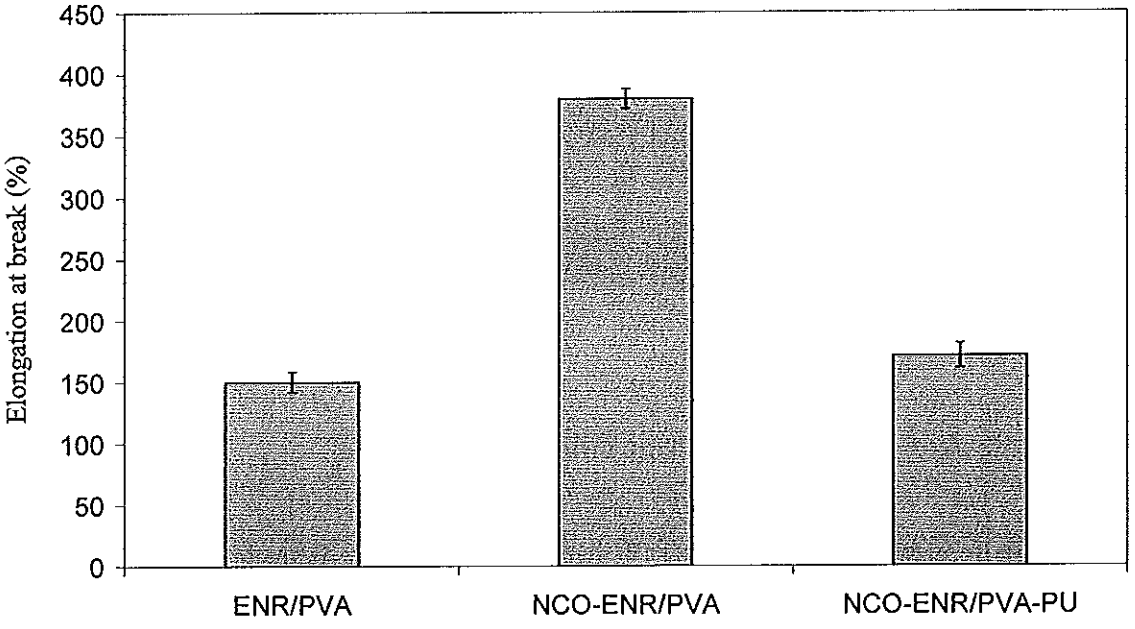
จากรูปที่4.217 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU เปรียบเทียบกับแผ่น NCO-ENR/PVA และแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 พบว่าแผ่น NCO-ENR/PVA-PU มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่น NCO-ENR/PVA และแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 แต่มีค่าสูงกว่า แผ่น NCO-NR/PVA-PU เล็กน้อย



รูปที่ 4.217 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU

ค. สมบัติด้านความสามารถในการยืด

จากรูปที่ 4.218 ค่าความสามารถในการยืดของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU เปรียบเทียบกับแผ่น NCO-ENR/PVA และแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 พบว่าแผ่น NCO-ENR/PVA-PU มีค่าความสามารถในการยืดที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่น NCO-ENR/PVA และแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40



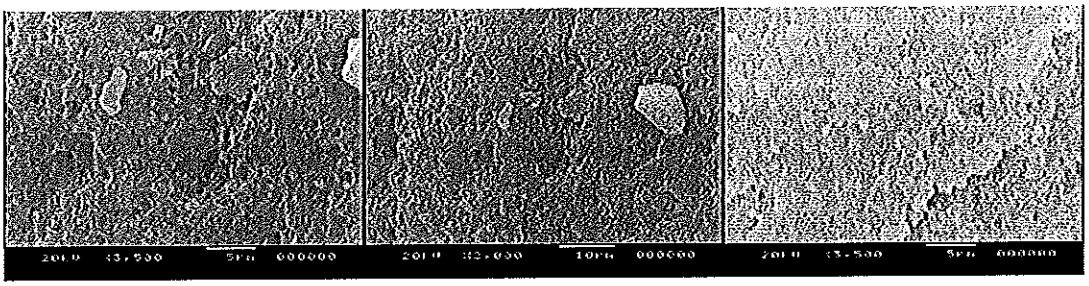
รูปที่ 4.218 ค่าความสามารถในการยืดของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU

4.6.2.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

4.6.2.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU โดยแปรปริมาณกรด มาลีอิคที่ใช้เป็น 0 20 และ 40% ทำการทดสอบเปรียบเทียบผล ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน (ชิ้นตัวอย่างหลังจากการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีนมาอบแห้งก่อนนำมาตรวจดูลักษณะทางสัณฐานวิทยา) โดยใช้เครื่อง JSM JEOL 2000 ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นตัวอย่างมาทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจน พื้นผิวที่ผ่านการทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจนแล้วมาทำการเคลือบด้วยทองก่อนที่จะนำมาทดสอบ

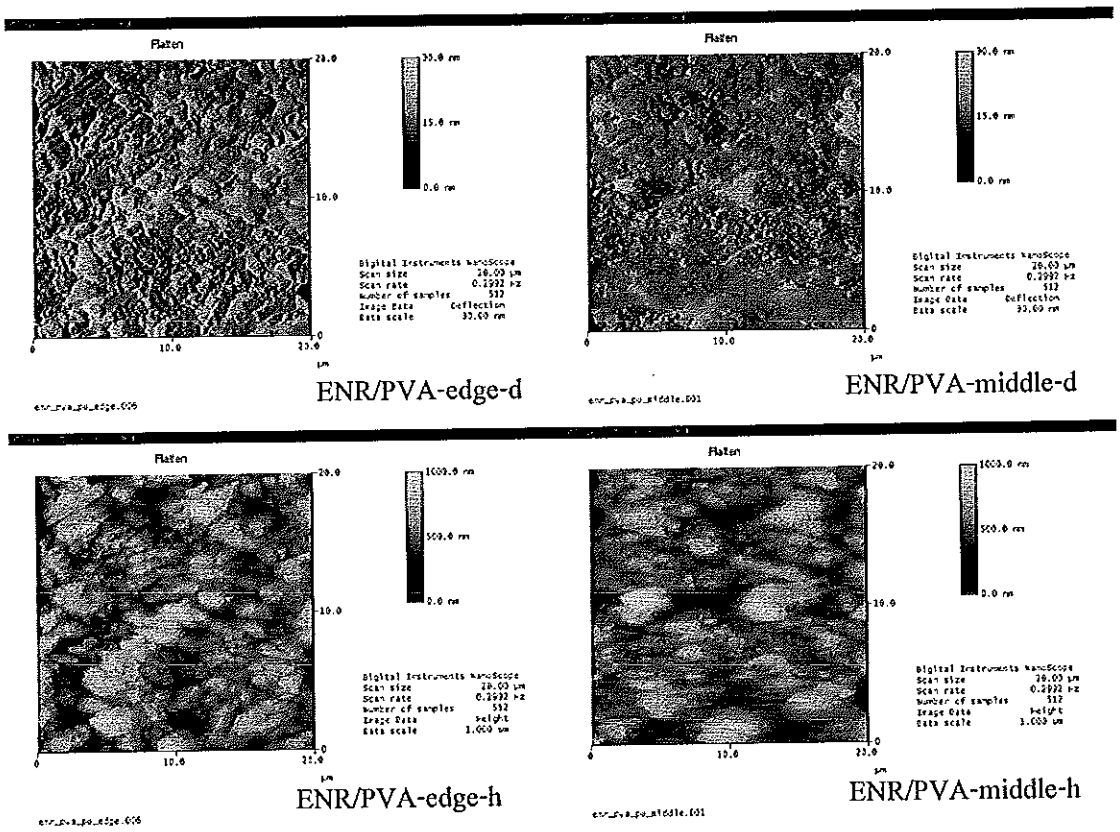
จากรูปที่ 4.219 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ40 หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน พบว่าแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ไม่มีสารเชื่อมโยงหลังจากทดสอบการบวมตัวในโทลูอีนจะเห็นได้ว่ามีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่มีลักษณะที่เป็นรูพรุนเนื่องจากมีส่วนที่ถูกละลายด้วยโทลูอีน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงเป็น 20 และ 40 ตามลำดับ จะไม่พบลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เป็นรูพรุนอีก



รูปที่ 4.219 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน A) M0 B) M20 และ C) M40

4.6.2.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

จากรูปที่ 4.220 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M40 จากเครื่อง AFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height พบว่าแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M40 มีเฟสที่แตกต่างกันกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงให้เห็นถึงพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดี



รูปที่ 4.220 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height

ตารางที่ 4.31 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M40 จากเครื่อง AFM

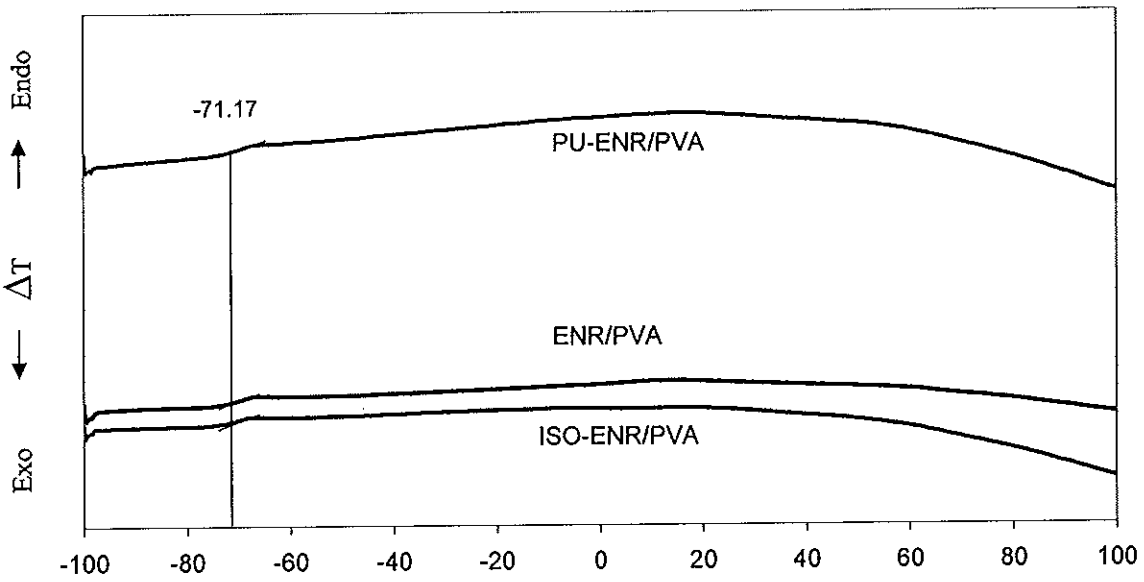
Sample	Adhesion force (N.m)			
	1	2	3	Average
EDGE	49.22	49.56	49.1	49.29
MIDDLE	22.94	24.16	24.57	23.89

ตารางที่ 4.31 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M40 จากเครื่อง AFM พบว่าค่าแรงยึดติดบริเวณผิวตัวอย่างมีค่ามากกว่าภายในตัวอย่าง

4.6.2.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU เพื่อตรวจดูความเข้ากันของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU คือ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 4.221 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M20 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต พบว่าแผ่น NCO-ENR/PVA M20 หลังเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนยังคงมีสมบัติของความเป็นยางอยู่เนื่องจากแสดงค่า T_g ที่ -71.17 ^{o}C

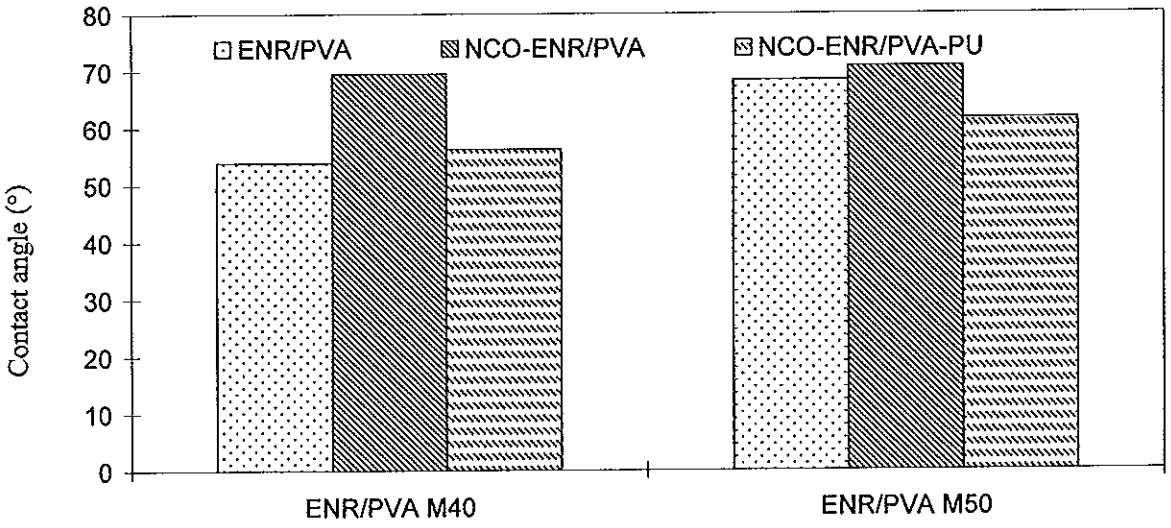


รูปที่ 4.221 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU M20

4.6.2.7 การวัดมุมสัมผัส

การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.13 ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ซึ่งมีผลการทดลองดังรูปที่ 4.222

จากรูปที่ 4.222 ค่ามุมสัมผัสของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40 และ 50 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40 และ 50 หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตพบว่ามีค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากส่วนที่ชอบน้ำคือหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA เมื่อมีการทำปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจึงทำให้ความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ลดลง และหลังจากเคลือบแผ่น NCO-ENR/PVA ด้วยพอลิยูรีเทนจึงทำให้แผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ได้กลับมามีความชอบน้ำที่มากขึ้นอีกครั้ง



รูปที่ 4.222 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40 และ 50%

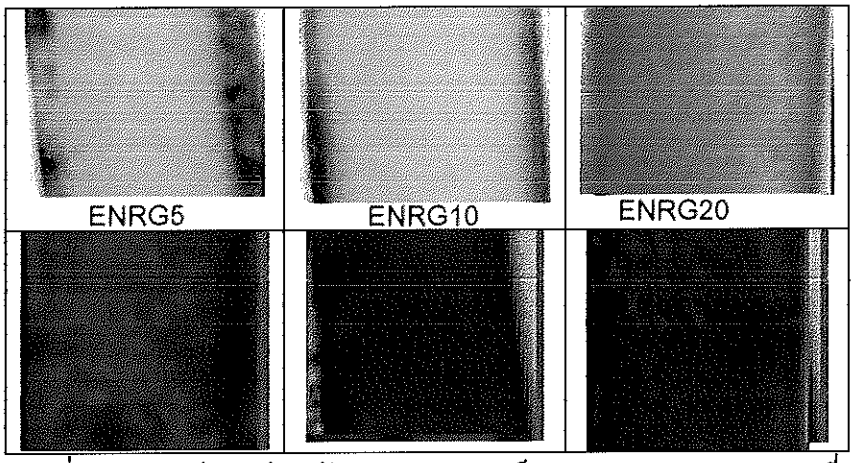
4.6.2.5การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.15 การศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA โดยการนำชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% เปรียบเทียบกับ ENR

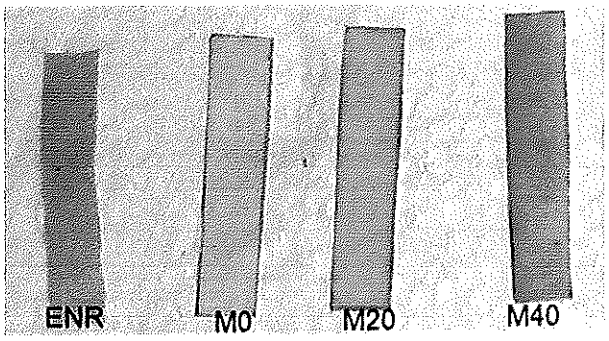
ลักษณะพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ที่ปริมาณกลีเซอรอล 5 10 และ 20%ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพแสดงรูปที่ 4.223 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ที่ปริมาณกลีเซอรอล 5 10 และ 20% หลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีลักษณะที่เปลี่ยนเป็นสีดำแสดงให้เห็นถึงการมีแนวโน้มที่สามารถย่อยสลายได้เองทางชีวภาพ โดยปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีแนวโน้มย่อยสลายได้ง่ายมากขึ้น สังเกตจากพื้นผิวของตัวอย่างที่มีความขรุขระมากกว่า

จากรูปที่ 4.224 เปรียบเทียบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA NCO-ENR/PVA และ NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มสามารถย่อยสลายเองได้ทางชีวภาพโดยสังเกตจากลักษณะสีที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพและชิ้นตัวอย่างมีลักษณะขาดเป็นริ้วๆ แต่หลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน ชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มย่อยสลายได้น้อยลง โดยมีเพียงสีที่เปลี่ยนเป็นสีดำ แต่ไม่มีลักษณะการขาดของชิ้นตัวอย่างเกิดขึ้นเนื่องจากพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จากการตรวจสอบข้างต้นมีการผสมเข้ากันได้ดีและมีความแข็งแรงจากการเชื่อมขวางของ PVA กับกรดมาลีอิคเกิดเป็นลักษณะโครงสร้าง

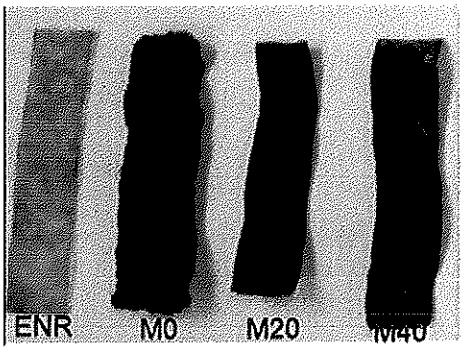
IPN แต่หากเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบนานขึ้นพอลิเมอร์ผสมอาจมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ เนื่องจากมีส่วนของ PVA ที่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่มีการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตและเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่มีการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตและเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนย่อยสลายได้ยากกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่มีการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตและเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน สำหรับที่สามารถสังเกตได้ชัดเจนคือ NCO-ENR/PVA-PU กล่าวคือพอลิเมอร์ผสม NCO-ENR/PVA หลังเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนแล้วไม่มีแนวโน้มที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้



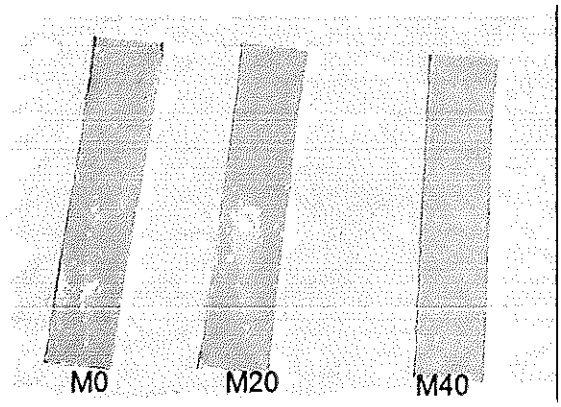
รูปที่ 4.223 เปรียบเทียบลักษณะพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ที่ปริมาณกลีเซอรอล 5 10 และ 20% ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ



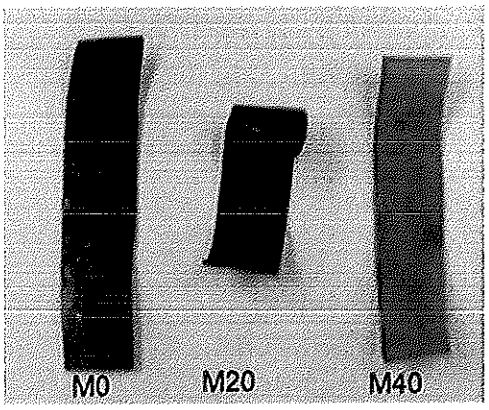
ENR/PVA ก่อนการทดสอบ



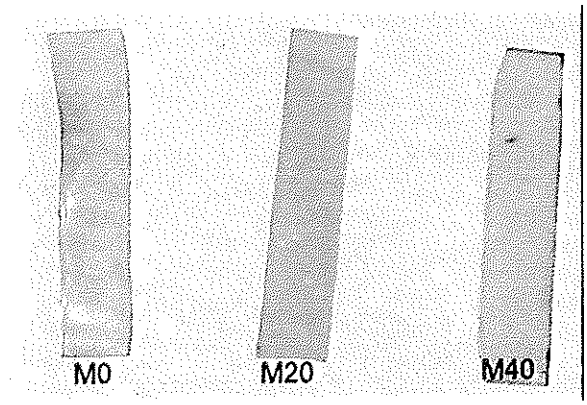
ENR/PVA หลังการทดสอบ



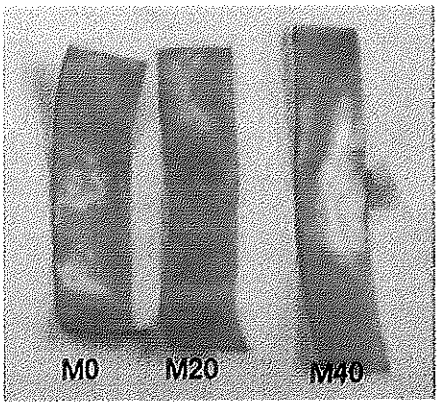
NCO-ENR/PVA ก่อนการทดสอบ



NCO-ENR/PVA หลังการทดสอบ



NCO-ENR/PVA-PU ก่อนการทดสอบ



NCO-ENR/PVA-PU หลังการทดสอบ

รูปที่ 4.224 เปรียบเทียบลักษณะพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA NCO-ENR/PVA และ NCO-ENR/PVA-PU ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ กับ ENR

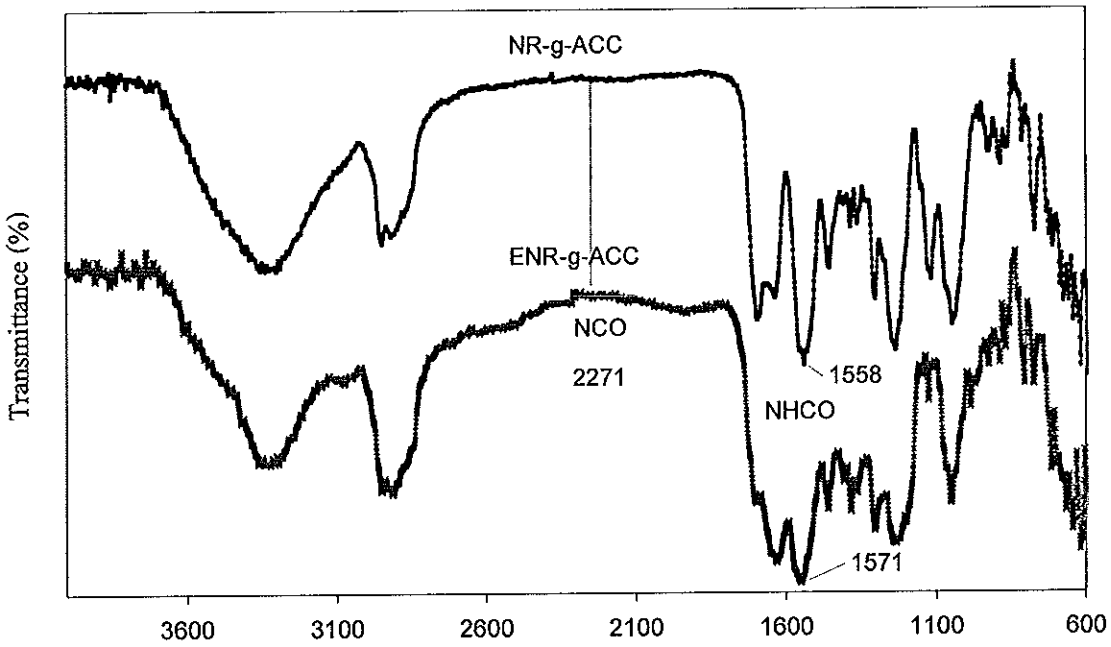
4.6.3 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค

4.6.3.1 การเตรียมการเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

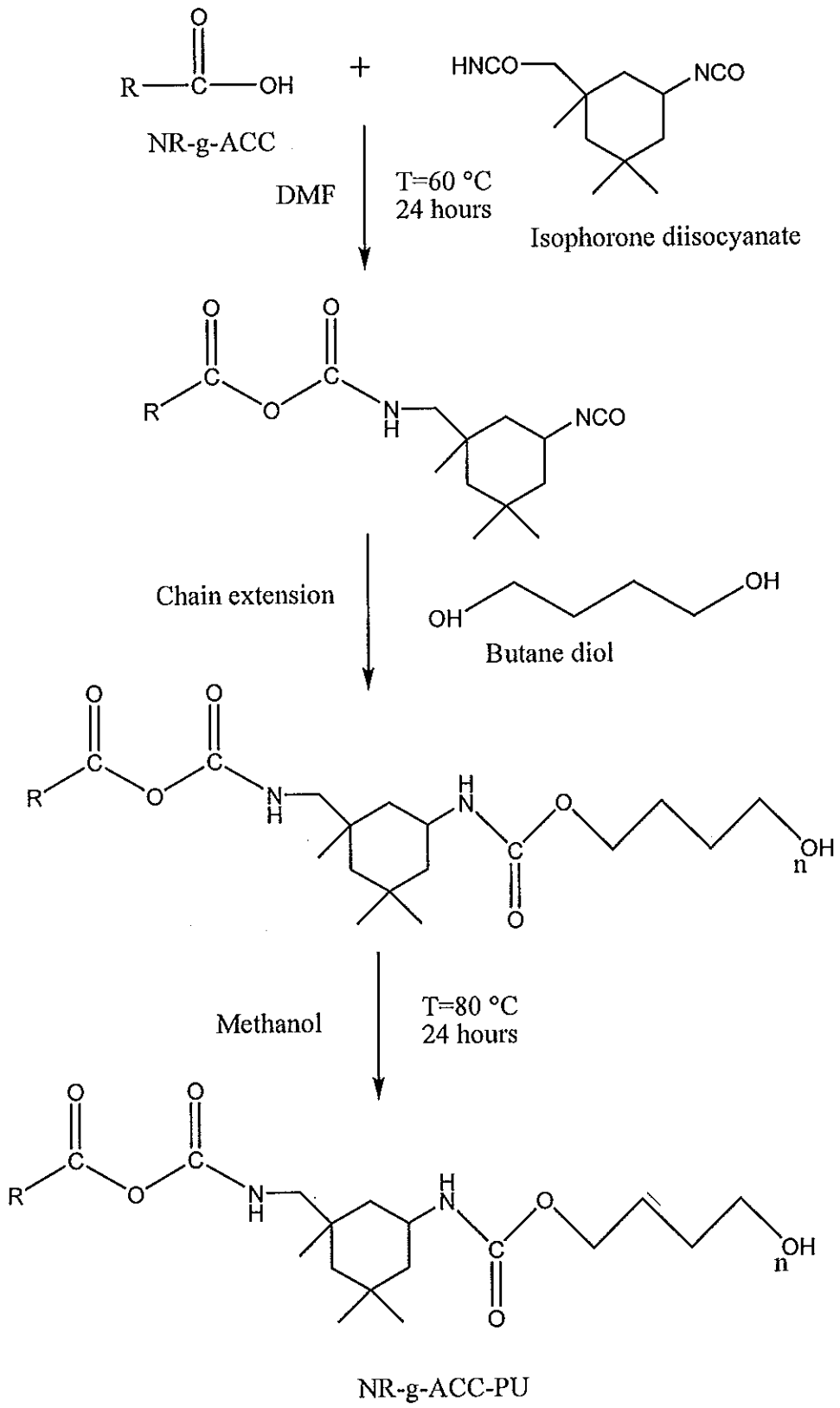
การเคลือบแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต (NCO-NR-g-ACC และ NCO-ENR-g-ACC) ดังหัวข้อ 3.4.5 โดยทำการเคลือบในเพลตกระจกที่มีฝาปิด ที่ประกอบด้วย ไดเอทิลีนไกลคอลกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก ไดบิวทิน ไดลอเรต ทำการเคลือบโดยการใส่แผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมขนาด 13 x 13 cm แช่ไว้เป็นเวลา 10 นาที นำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 ºC เป็นเวลา 1 วัน ซึ่งลักษณะของแผ่น NCO-NR-g-ACC และ NCO-ENR-g-ACC หลังการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน (NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU) จะมีลักษณะคล้ายๆหยดน้ำมันเกาะกระจายอยู่บนผิวของแผ่น NCO-ENR/PVA แต่ภายหลังการวัลคาไนซ์ที่ 80 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ได้แผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU ที่มีลักษณะแข็งและมีผิวลื่นและเรียบมากขึ้นซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับแผ่น NCO-NR/PVA-PU และแผ่น NCO-ENR/PVA-PU

4.6.3.2 โครงสร้างทางเคมีของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

จากรูปที่4.225 สเปคตรัมอิฟราเรดของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU ไม่พบพีคที่ตำแหน่ง 2271 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO แสดงให้เห็นว่าหมู่ NCO ได้ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเป็นพอลิยูรีเทนหมดแล้ว (F.Burel *et al.*, 2005) ซึ่งจะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} สำหรับแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และที่ตำแหน่ง 1571 cm^{-1} สำหรับแผ่น NCO-ENR-g-ACC-PU ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง หมู่คาร์บอกซิลิค กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.226



รูปที่ 4.225 โครงสร้างทางเคมีของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU



NR-g-ACC-PU

R = แผ่น NR-g-ACC

รูปที่ 4.226 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับแผ่น NR-g-ACC

4.6.3.3 การบวมของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

การทดสอบการบวมตัวของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU โดยทำการทดสอบการบวมตัวในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วันได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.31

จากตารางที่ 4.31 การบวมตัวในน้ำของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU เปรียบเทียบกับแผ่น NR-g-ACC NCO-NR-g-ACC ENR-g-ACC และ NCO-ENR-g-ACC พบว่าแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีการบวมตัวในน้ำต่ำลงหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนตามลำดับ

ตารางที่ 4.32 การบวมตัวในน้ำของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU

Formula	Swelling (%)
NR-g-ACC	16.25
NCO-NR-g-ACC	17.43
NCO-NR-g-ACC-PU	16.32
ENR-g-ACC	41.54
NCO-ENR-g-ACC	22.34
NCO-ENR-g-ACC-PU	20.25

4.6.3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปร

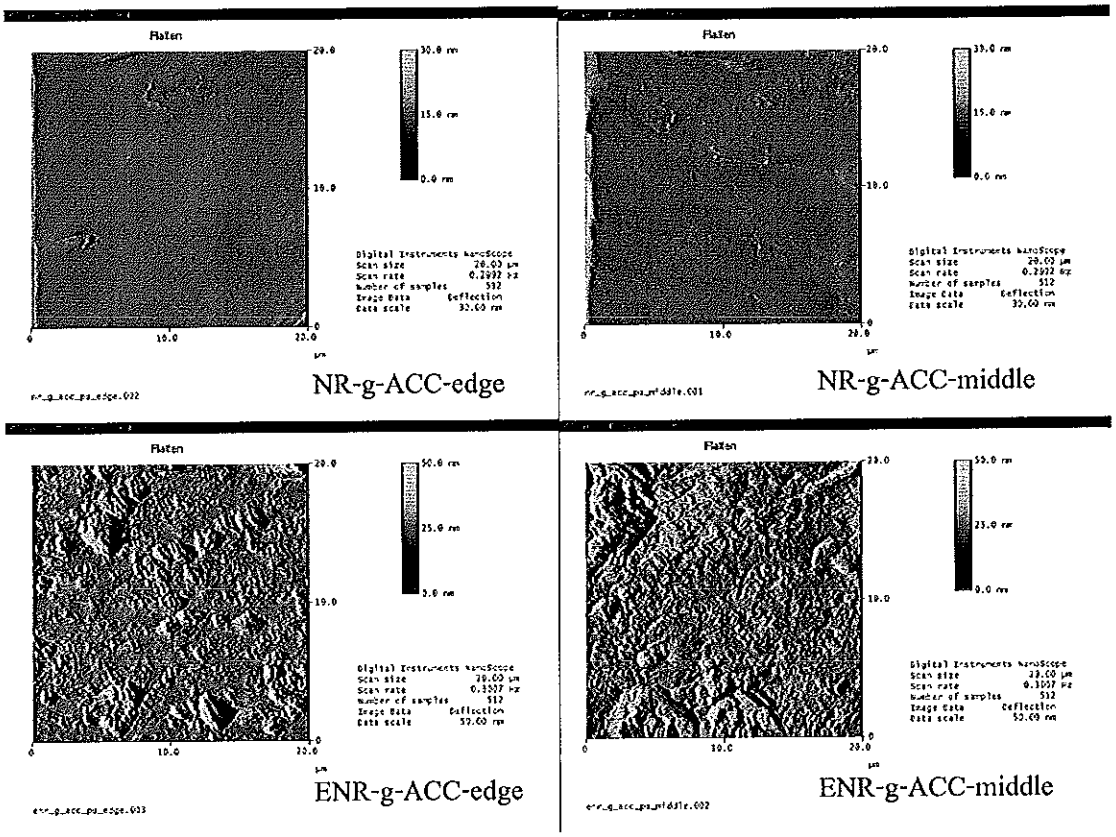
สมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU การทดสอบ พบว่าสมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU ค่าที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยาง NR และ ENR เกิดบนผิวเท่านั้น จึงได้นำเอาผลการทดลองสูตรที่ดีที่สุดของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังเคลือบ ไอโซไซยาเนตเปรียบเทียบกับแผ่นยาง NR และ ENR

ตารางที่ 4.33 สมบัติเชิงกลแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU

No.	Formula	Elongation (%)	100%modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
1	NR	>800	1.2	4.1
2	NR/ACC	>800	1.46	4.14
3	NCO-NR/ACC	>800	1.21	5.52
4	NCO-NR/ACC-PU	>800	1.19	4.86
5	ENR	500	2.3	3.5
6	ENR/ACC	485	2.4	3.7
7	NCO-ENR/ACC	354	1.78	4.52
8	NCO-ENR/ACC-PU	264.1	1.46	4.78

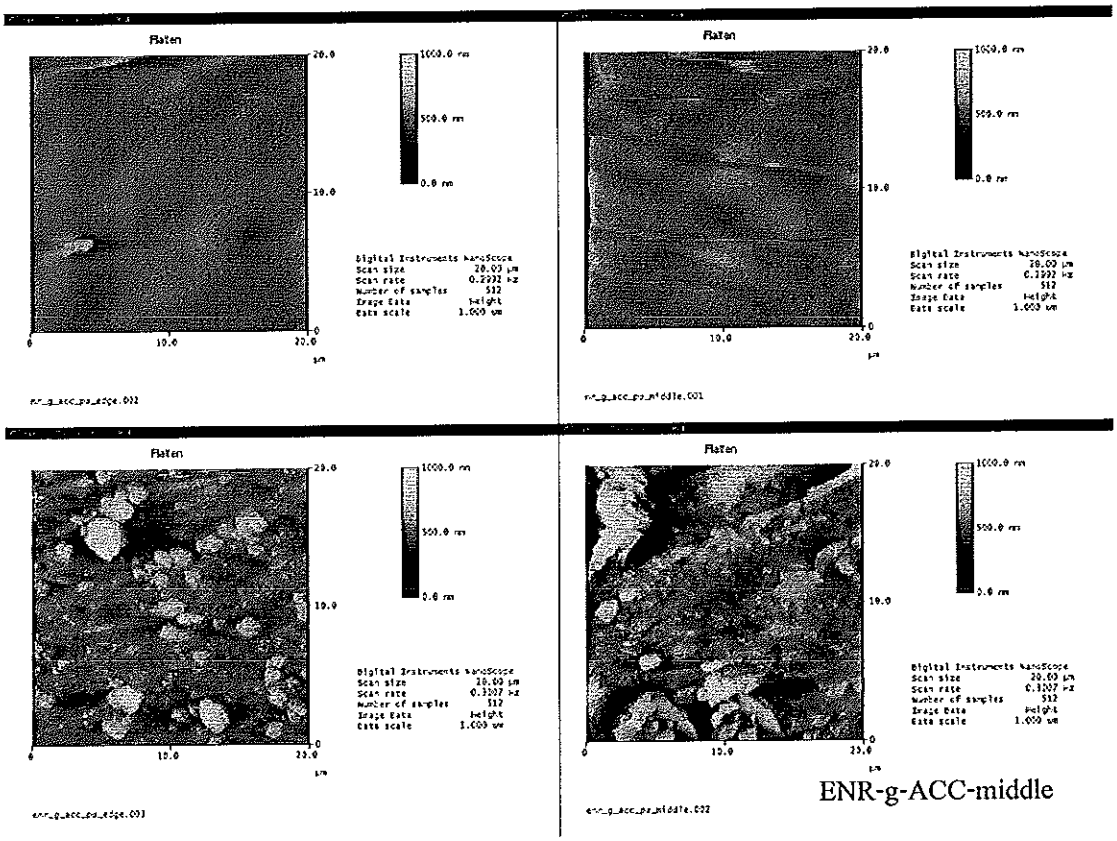
4.6.3.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นเคลือบพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

จากรูปที่ 4.227 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ แผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง โดยการทดสอบแบบ deflection เป็นการบ่งบอกค่าแรงของแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ จากการทดลองพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ แผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU จะมีลักษณะคล้ายพื้นผิวที่มีความขรุขระซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงหลังจากการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน โดย NCO-ENR-g-ACC-PU จะมีลักษณะเฟสที่ขรุขระสังเกตได้ชัดเจนกว่าแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU แสดงว่าการดัดแปรด้วยไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง NCO-ENR-g-ACC เกิดได้ดีกว่ายาง NCO-NR-g-ACC



รูปที่ 4.227 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PUจากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection

จากรูปที่ 4.1228 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ที่ด้านข้างและตรงกลางตัวอย่าง การทดสอบแบบ height เป็นการบ่งบอกระดับความสูงของแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ จากการทดลองพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ แผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU จะมีลักษณะคล้ายพื้นผิวที่มีความขรุขระซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงหลังจากการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน โดย NCO-ENR-g-ACC-PU จะมีลักษณะเฟสที่ขรุขระสังเกตได้ชัดเจนกว่า NCO-NR-g-ACC-PU แสดงว่าหลังการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน บนแผ่นยาง NCO-ENR-g-ACC เกิดได้ดีกว่ายาง NCO-NR-g-ACC ซึ่งมีผลการทดลองสอดคล้องกับการทดสอบในโหมด deflection



รูปที่ 4.228 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height

ตารางที่ 4.34 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของแผ่นยาง NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU จากเครื่อง AFM

Sample		Adhesion force (N.m)			
		1	2	3	Average
NR-g-ACC	EDGE	17.4	17.34	17.31	17.35
	MIDDLE	47.7	47.66	47.32	47.56
ENR-g-ACC	EDGE	9.46	9.77	9.91	9.71
	MIDDLE	10.69	12.51	12.49	11.89

จากตารางที่ 4.33 แสดงค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของแผ่นยาง NCO-NR-g-ACC-PU และ NCO-ENR-g-ACC-PU จากเครื่อง AFM พบว่า NCO-ENR-g-ACC-PU มีค่ายึดติดบริเวณขอบและตรงกลางตัวอย่างต่ำกว่า NCO-NR-g-ACC-PU

4.6.4 การทดสอบความต้านทานการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

การทดสอบความต้านทานต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย เพื่อเป็นการดูความเป็นไปได้ในการนำแผ่นพอลิเมอร์ผสมหลังจากการดัดแปรไปประยุกต์ใช้งาน โดยทำการทดสอบความต้านทานต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียบนแผ่นทดสอบชนิดต่างๆคือ แผ่นยาง ENR แผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 แผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 แผ่นพอลิเมอร์ผสมดัดแปรด้วยพอลิยูรีเทน PU-NR/PVA M40 และ PU-ENR/PVA M40 ทำการทดสอบโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆคือ *Stapphylococus aureus Escherichia coli* และ *Acinnetobacter baumannii* ได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.33 และตารางที่ 4.34

จากตารางที่ 4.35 ความกว้างของ Clear zone ที่เป็นขอบเขตในการยับยั้งจุลินทรีย์ชนิดต่างๆไม่ให้เจริญเติบโตบนแผ่นทดสอบชนิดต่างๆ พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ทุกชนิด และมีขอบเขตการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างกว้างที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นพอลิเมอร์อื่นๆที่มีการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ โดยในแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์คือ *Acinnetobacter baumannii* และ *Stapphylococus aureus* ได้เช่นเดียวกับแผ่น PU-ENR/PVA M40 หลังดัดแปรเป็นพอลิยูรีเทน ส่วนแผ่นยาง ENR และแผ่นพอลิเมอร์ผสม PU-NR/PVA M40 ไม่สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้

ตารางที่ 4.36 ความสามารถในการยึดติดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (1 mm^2) ของ *Stapphylococus aureus Escherichia coli* และ *Acinnetobacter baumannii* บนแผ่นทดสอบชนิดต่างๆ พบว่าไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆบนผิวพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 เป็นการแสดงให้เห็นว่าแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีที่สุด สำหรับแผ่นพอลิเมอร์อื่นๆ พบว่ามีการตรวจพบเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆในหนึ่งหน่วยพื้นที่ในปริมาณต่างๆกล่าวคือแผ่น PU-NR/PVA M40 มีการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างได้ดีที่สุด โดยปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่พบบนแผ่น PU-NR/PVA M40 ของ *Acinnetobacter baumannii* มีค่าเท่ากับ $(132 \pm 1.41) \times 10^6$ Escherichia coli มีค่าเท่ากับ $(155.6 \pm 21.70) \times 10^6$ และ*Stapphylococus aureus* มีค่าเท่ากับ $(13.33 \pm 17.91) \times 10^6$

ตารางที่ 4.35 ความกว้างของ Clear zone ที่เป็นขอบเขตในการยับยั้งจุลินทรีย์ชนิดต่างๆไม่ให้เจริญเติบโตบนแผ่นทดสอบชนิดต่างๆ

Sample	*A. baumanii*	*E. coli*	*S. aureus*
PU-NR/PVA M40	-	-	-
PU-ENR/PVA M40	16.33 ± 0.57	-	17.67 ± 0.57
	16.33 ± 0.57	-	18.67 ± 1.15
NR/PVA M40	23 ± 1	24.7 ± 0.6	30.67 ± 3.21
	23.33 ± 1.15	25.3 ± 0.6	31.33 ± 3.05
ENR/PVA M40	13.5 ± 0.7	-	19.33 ± 1.15
	15.5 ± 0.7	-	21.33 ± 1.15
ENR	-	-	-

ตารางที่ 4.36 ความสามารถในการยึดติดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (1 mm^2) ของ *Stapphylococus aureus Escherichia coli* และ *Acinnetobacter baumannii* บนแผ่นทดสอบชนิดต่างๆ

Sample	CFU/mL		
	S. aureus	*E. coli*	*A. baumanii*
PU-NR/PVA M40	(132 ± 1.41) × 10^6	(155.6 ± 21.70) × 10^6	(13.33 ± 17.91) × 10^6
PU-ENR/PVA M40	(120.5 ± 6.36) × 10^5	(65 ± 64.13) × 10^5	(24.67 ± 11.31) × 10^4
NR/PVA M40	-	-	-
ENR/PVA M40	(109 ± 28.28) × 10^5	(97.7 ± 21.21) × 10^6	(27.17 ± 3.53) × 10^5
ENR	(44.5 ± 9.19) × 10^6	(50 ± 21.63) × 10^6	(24.33 ± 21.21) × 10^6

4.6.5 สรุปผลการทดลองตอนที่ 6

- พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

ประสบความสำเร็จในการเตรียมการเคลือบแผ่น NCO-NR/PVA ด้วยไดเอทิลีนไกลคอล กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก วัลคาไนซ์ที่ 80 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แผ่นที่ได้มีลักษณะแข็งและมีผิวลื่นและเรียบมากขึ้น ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแผ่น NCO-NR/PVA-PU ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2268 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แผ่น NCO-NR/PVA-PU ที่ได้มีความทนทานต่อน้ำและโทลูอีนมากขึ้น สมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-NR/PVA-PU ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบตัวอย่างไม่ได้ดัดแปลงด้วย ไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA-PU จากเทคนิค SEM และ AFM มีลักษณะที่เข้ากันได้ดี และมีเฟสที่ต่อเนื่องกัน พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ย่อยสลายได้ดีที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่ำๆ และมีความสามารถในการย่อยสลายได้น้อยลงเมื่อดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนตามลำดับ

- พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

ประสบความสำเร็จในการเตรียมการเคลือบแผ่น NCO-ENR/PVA ด้วยไดเอทิลีนไกลคอลกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก วัลคาไนซ์ที่ 80 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แผ่นที่ได้มีลักษณะแข็งและมีผิวลื่นและเรียบมากขึ้น ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2288 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1560 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ได้มีความทนทานต่อน้ำและโทลูอีนมากขึ้น สมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU จากเทคนิค SEM และ AFM มีลักษณะที่เข้ากันได้ดี และมีเฟสที่ต่อเนื่องกัน แผ่น NCO-ENR/PVA-PU ยังคงแสดงสมบัติของความเป็นยาง โดยการวิเคราะห์จากเครื่อง DSC พบค่า T_g เท่ากับ -71.17 ^{o}C ค่ามุมสัมผัสของแผ่น ENR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และลดลงอีกครั้งหลังจากเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ย่อยสลายได้ดีที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่ำๆ และมีความสามารถในการย่อยสลายได้น้อยลงเมื่อดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และหลังเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนพอลิเมอร์ผสมไม่มีแนวโน้มย่อยสลายได้อีก โดยพอลิเมอร์ผสม NR/PVA สามารถย่อยสลายทาชีวภาพได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA

- ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค

ประสบความสำเร็จในการเคลือบแผ่น NCO-NR-g-ACC และแผ่น NCO-ENR-g-ACC ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} สำหรับแผ่น NCO-NR-g-

ACC-PU และที่ตำแหน่ง 1571 cm^{-1} สำหรับแผ่น NCO-ENR-g-ACC-PU ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง หมู่คาร์บอกซิลิค กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต แผ่นยาง NCO-NR-g-ACC และแผ่นยาง NCO-ENR-g-ACC มีความทนทานต่อน้ำเพิ่มขึ้นหลังจากเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน แต่ไม่ทนต่อโทลูอีน สมบัติเชิงกลแผ่นยาง NCO-NR-g-ACC และแผ่นยาง NCO-ENR-g-ACC หลังเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง NCO-NR-g-ACC และแผ่นยาง NCO-ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีความขรุขระเพิ่มขึ้น

- การทดสอบความต้านทานการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Stapphylococus aureus Escherichia coli* และ *Acinnetobacter baumannii* ได้ดีที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และ ข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะของการปรับปรุงผิวยางธรรมชาติในรูปแผ่นโดยการดัดแปรด้วย ไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต เริ่มตั้งแต่การเตรียมการผสมจากยางธรรมชาติ และสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในสภาวะน้ำยางกับสารละลายพอลิไวนิลแอกอฮอล์เพื่อเป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้กับผิวยางธรรมชาติ และการเตรียมการกราฟต์กรดอะคริลิคบนผิวยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลิค จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซ่ไซยาเนต และพรีพอลิยูรีเทนตามลำดับ โดยมีรายละเอียดของบทสรุปรวมถึงข้อเสนอแนะ 5 หัวข้อ ได้แก่ 1) การศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA 2) การศึกษาการเตรียมยาง NR–g-ACC และ ENR- g-ACC 3) การดัดแปรแผ่นยางผสมด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต 4) การเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตด้วยพอลียูรีเทน และ 5) ข้อเสนอแนะ โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

5.1 ศึกษาการเตรียมและ สมบัติของพอลิเมอร์ผสมจาก NR/PVA และพอลิเมอร์ผสมจาก ENR/PVA

5.1.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

- สัดส่วนของ PVA ในพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้นโดยเฉพาะค่ามอดูลัส
- ปริมาณกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น
- อุณหภูมิในการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น
- ระยะเวลาในการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

5.1.2 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม

- ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ C=O ที่ 1663 cm^{-1} คือ O-H ที่ 1293 cm^{-1} และคือ C-O-C ที่ 1152 cm^{-1}
- การลดลงของความผลึกของ PVAที่ตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 40° จากเทคนิค XRD แสดงถึงการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค กรดมาเลอิกสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาส่วนที่ผลึกของ PVA ได้

5.1.3 สมบัติเชิงกล

- ค่า 100% 300% และค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังบ่มเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น
- ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังบ่มเร่งมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น
- ค่า 100% 300% และค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการเชื่อมขวางมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M60 มีค่า 32 MPa เปรียบเทียบกับยาง ENR ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพียง 2 MPa
- ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิคมีค่าลดลง
- สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดีกว่าของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA เนื่องจากการเข้ากันได้ระหว่าง PVA และ ENR มากกว่าพอลิเมอร์ผสม PVA และ NR
- สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 10% โดยสามารถทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สูงถึง 45 MPa

5.1.4 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย

- การบวมตัวและความสามารถในการละลายในน้ำและโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีค่าลดลงหลังการเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิค
- ปริมาณสารเชื่อมขวางคือกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้นทำให้การบวมตัวและความสามารถในการละลายในน้ำและโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีค่าลดลง
- การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สูงกว่า พอลิเมอร์ผสม NR/PVA แต่การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ต่ำกว่า ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA
- การละลายในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าใกล้เคียงกันกับ พอลิเมอร์ผสมNR/PVA ซึ่งมีค่าน้อยมาก ส่วนการละลายในโทลูอีนพอลิเมอร์ผสม NR/PVA สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA

5.1.5 ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

- พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA โดยเฟสของ PVA มีการแจกแจง และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเฟสของยาง NR และ ENR ซึ่ง PVA ที่เกิดการเชื่อมขวางสังเกตได้จากลักษณะที่นูนขึ้นจากภาพที่ได้จากเทคนิค SEM

- พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องมากกว่า พอลิเมอร์ผสม NR/PVA คือมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า

5.1.6 ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

- พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีความทนทานต่อความร้อนมากถึง 400°C และมีความทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น จากเทคนิค TGA

- การตรวจสอบสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ด้วยเทคนิค DMTA พอลิเมอร์ผสม NR/PVA สามารถเข้ากันได้ดีโดยแสดง T_g ค่าเดียวที่ประมาณ 20 °C ส่วน พอลิเมอร์ผสมENR/PVA แสดง T_g ค่าเดียวที่ประมาณ 0 °C (ยาง NR จะมี T_g ที่ประมาณ -60 °C PVA จะมี T_g ที่ประมาณ 35 °C)

5.1.7 การวัดมุมสัมผัส

- พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความชอบน้ำลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางคือกรดมาลีอิคเพิ่มขึ้น

- ความชอบน้ำ PVA > ENR > พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA > พอลิเมอร์ผสม NR/PVA > NR

5.1.8 การวัดความเสียดทานของพื้นผิว

- พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น

- สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ยาง ENR > NR > PVA > พอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 > พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 (ที่เติมกรดมาลีอิก 40% w/w)

5.1.9 ศึกษาการทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม

- พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สามารถทนทานต่อโอโซนได้ดี กล่าวคือไม่มีรอยแตกเกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR และ ENR ที่มีรอยแตกเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

5.1.10 สูตรที่ดีที่สุด

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่เติมกรดมาลีอิก 40% w/w

5.2 การศึกษาการเตรียมยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

5.2.1 ศึกษาโครงสร้างทางเคมี

- ปฏิกิริยาการการกราฟต์ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือคาร์บอนิลที่ 1740 cm^{-1} และไฮดรอกซิลที่ 1210 cm^{-1}

5.2.2 สมบัติเชิงกล

- ค่า 100% ของ NR และ ENR สูงขึ้นเล็กน้อยหลังจากให้แสงยูวี โดย ENR-g-ACC > ENR > NR-g-ACC > NR
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดของ NR และ ENR สูงขึ้นเล็กน้อยหลังจากให้แสงยูวี โดย NR-g-ACC > ENR-g-ACC

5.2.3 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย

- การบวมตัวและความสามารถในการละลายในน้ำ ENR-g-ACC มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น
- ENR-g-ACC มีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่สูงมากทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้

5.2.4 ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

- ยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีเฟสที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น
- เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง NR กับ ENR หลังจากการให้แสงยูวีพบว่ายาง ENR มีเฟสที่มีความขรุขระมากกว่ายาง NR เฟสขรุขระที่มากกว่าแสดงให้เห็นว่า ACC สามารถซึมเข้าไปภายในยาง ENR ได้มากกว่ายาง NR เนื่องมาจากยาง ENR มีหมู่อิพอกไซด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับ ACC

5.2.5 ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อน

- ENR-g-ACC มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่า NR-g-ACC

5.2.6 การวัดมุมสัมผัส

- หลังจากให้แสงยูวีเป็นระยะเวลา 60 นาทีค่ามุมสัมผัสของ NR และ ENR มีค่าลดลง
- ค่ามุมสัมผัสของ ENR-g-ACC มีค่าน้อยกว่า NR-g-ACC เนื่องจากอะไร

5.2.7 ศึกษาการทดสอบสมบัติทนต่อโอโซน

- ยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ไม่ทนทานต่อโอโซนเนื่องจากทำปฏิกิริยาที่ผิวของยางธรรมชาติ

5.2.8 สูตรที่ดีที่สุด

ENR- g-ACC ที่ฉายแสงยูวีเป็น60 นาที เนื่องจากปริมาณการกราฟต์ของ ACC บนแผ่นยางมากที่สุด

5.3 การดัดแปรแผ่นยางผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

5.3.1 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

- ประสบความสำเร็จในการเตรียมการดัดแปรแผ่นยางผสม NR/PVA ด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยการวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแผ่น NCO-NR/PVA ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2271 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1552 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO
- แผ่น NCO-NR/PVA ที่ได้มีความทนทานต่อน้ำและโทลูอีนมากขึ้น
- สมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-NR/PVA ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA จากเทคนิค SEM และ AFM มีลักษณะที่เข้ากันได้ดี และมีเฟสที่ต่อเนื่องกัน
- แผ่น NCO-NR/PVA ยังคงแสดงสมบัติของความเป็นยาง โดยการวิเคราะห์จากเครื่อง DSC พบค่า T_g เท่ากับ -68.5 °C
- ค่ามุมสัมผัสของแผ่น NCO-NR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

5.3.2 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

- ประสบความสำเร็จในการเตรียมการดัดแปรแผ่นยางผสม ENR/PVA ด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยการวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแผ่นที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองใส และสีเหลืองขุ่นที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่ำลง
- ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแผ่น NCO-ENR/PVA ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2268 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1551 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO
- แผ่น NCO-ENR/PVA ที่ได้มีความทนทานต่อน้ำและโทลูอีนมากขึ้น
- สมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-ENR/PVA ที่ได้มีค่าสูงกว่าแผ่น NCO-NR/PVA
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA จากเทคนิค SEM และ AFM มีลักษณะที่เข้ากันได้ดี และมีเฟสที่ต่อเนื่องกัน
- แผ่น NCO-ENR/PVA ยังคงแสดงสมบัติของความเป็นยาง โดยการวิเคราะห์จากเครื่อง DSC พบค่า T_g เท่ากับ -68.66 °C
- ค่ามุมสัมผัสของแผ่น ENR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

5.3.3 ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค

- ประสบความสำเร็จในการเตรียมการดัดแปรแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC โดยปริมาณการติดไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้แสงยูวีที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณการติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 60 นาที ของแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC เท่ากับ 18.09 และ 54.35% ตามลำดับ
- ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิคกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2271 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO
- แผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC มีความทนทานต่อน้ำเพิ่มขึ้นหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต แต่ไม่ทนต่อโทลูอีนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของแผ่นยางธรรมชาติเท่านั้น
- สมบัติเชิงกลแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตมีความขรุขระเพิ่มขึ้น
- แผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีความชอบน้ำที่ลดลง โดยมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 67.3 และ36.1 ตามลำดับ

5.4 การเคลือบแผ่นพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วยพอลียูรีเทน

5.4.1 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

- ประสบความสำเร็จในการเตรียมการเคลือบแผ่น NCO-NR/PVA ด้วยไดเอทิลีนไกลคอลกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก วัลคาไนซ์ที่ 80 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แผ่นที่ได้มีลักษณะแข็งและมีผิวลื่นและเรียบมากขึ้น
- ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแผ่น NCO-NR/PVA-PU ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2268 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO
- แผ่น NCO-NR/PVA-PU ที่ได้มีความทนทานต่อน้ำและโทลูอีนมากขึ้น
- สมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-NR/PVA-PU ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบตัวอย่างไม่ได้ดัดแปรด้วย ไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต

- ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-NR/PVA-PU จากเทคนิค SEM และ AFM มีลักษณะที่เข้ากันได้ดี และมีเฟสที่ต่อเนื่องกัน

- พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ย่อยสลายได้ดีที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่ำๆ และมีความสามารถในการย่อยสลายได้น้อยลงเมื่อดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนตามลำดับ

5.4.2 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

- ประสบความสำเร็จในการเตรียมการเคลือบแผ่น NCO-ENR/PVA ด้วยไดเอทิลีนไกลคอลกับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในอัตราส่วน 2:1 โดยน้ำหนัก วัลคาไนซ์ที่ 80 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แผ่นที่ได้มีลักษณะแข็งและมีผิวลื่นและเรียบมากขึ้น

- ยืนยันปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยการลดลงของพีคที่ตำแหน่ง 2288 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO และการเกิดขึ้นของพีคที่ตำแหน่ง 1560 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO

- แผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ได้มีความทนทานต่อน้ำและโทลูอีนมากขึ้น

- สมบัติเชิงกลของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น

- ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่น NCO-ENR/PVA-PU จากเทคนิค SEM และ AFM มีลักษณะที่เข้ากันได้ดี และมีเฟสที่ต่อเนื่องกัน

- แผ่น NCO-ENR/PVA-PU ยังคงแสดงสมบัติของความเป็นยาง โดยการวิเคราะห์จากเครื่อง DSC พบค่า T_g เท่ากับ -71.17 ^{o}C

- ค่ามุมสัมผัสของแผ่น ENR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และลดลงอีกครั้งหลังจากเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน

- พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ย่อยสลายได้ดีที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่ำๆ และมีความสามารถในการย่อยสลายได้น้อยลงเมื่อดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และหลังเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนพอลิเมอร์ผสมไม่มีแนวโน้มย่อยสลายได้อีก โดยพอลิเมอร์ผสม NR/PVA สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA

5.4.3 ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค

- ประสบความสำเร็จในการเคลือบแผ่น NCO-NR-g-ACC และแผ่น NCO-ENR-g-ACC ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR โดยปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} สำหรับแผ่น NCO-NR-g-ACC-PU และที่ตำแหน่ง 1571 cm^{-1} สำหรับแผ่น NCO-ENR-g-ACC-PU ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง หมู่คาร์บอกซิลิค กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

- แผ่นยาง NCO-NR-g-ACC และแผ่นยาง NCO-ENR-g-ACC มีความทนทานต่อน้ำเพิ่มขึ้นหลังจากเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน แต่ไม่ทนต่อโทลูอีน
- สมบัติเชิงกลแผ่นยาง NCO-NR-g-ACC และแผ่นยาง NCO-ENR-g-ACC หลังเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
- ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นยาง NCO-NR-g-ACC และแผ่นยาง NCO-ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีความขรุขระเพิ่มขึ้น

5.4.4 การทดสอบความต้านทานการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

- พอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Stapphylococus aureus Escherichia coli* และ *Acinnetobacter baumannii* ได้ดีที่สุด

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. นำพอลิเมอร์ผสมไปประยุกต์ใช้งานการดูดซับน้ำมัน
2. เปลี่ยนสารเชื่อมขวางจากกรดมาลีอิกมาเป็นกรดมาลีอิกแอนไฮไดรด์
3. ใช้ไอโซไซยาเนตตัวอื่นแทนที่ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต
4. ใช้น้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์แทนที่ยางธรรมชาติ
5. ใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นแทนที่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เช่น แป้ง
6. ใช้สารจากธรรมชาติแทนที่บิวเทนไดออลในการเตรียมพรีพอลิยูรีเทน เช่น การดัดแปรน้ำมัน

บรรณานุกรม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2547 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC. เข้าถึงได้จาก http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_2.html. (วันที่สืบค้น 20 กุมภาพันธ์ 2553)

สุวิทย์ ไชยพลบาล. 2548. ยางธรรมชาติทนไฟจากยางธรรมชาติที่ดัดแปลงโมเลกุลด้วยไดบิวทิลฟอสเฟต. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี.

Abdelmouleh , S. Boufi , M.N. Belgacem, A. Dufresne. 2006. Composites Science and Technology.

Abu-Isa. 1973. *Polym.- Plast. Technol. Eng.*, 2, 29.

Adamson and A. H. Sporer, 1958. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 8, 209.

Aji . Mathew a, S. Packirisamy, Sabu Thomas. 2001. Studies on the thermal stability of natural rubber/polystyrene interpenetrating polymer networks: thermogravimetric analysis. Polymer Degradation and Stability. 72. 423–439.

Aleksey . Drozdov, Al Dorfmann. 2002. The nonlinear viscoelastic response of carbon black-filled natural rubbers. International Journal of Solids and Structures. 39. 5699–5717.

Bajpai. 2007. Blood protein adsorption and macroporous semiinterpenetrating polymer networks of poly(ethylene glycol) PEG and poly(2-hydroxyethyl methacrylate) (PHEMA) and assessment of in vitro blood compatibility. Polym Int, 56:231–44.

Bajpai, Mishra A. 2005. Preparation and characterization of tetracycline-loaded interpenetrating polymer networks of carboxymethyl cellulose and poly(acrylic acid) water sorption and drug release study. Polym Int, 54:1347–56.

Bakar, J. Ismail, M. Abu Bakar. 2010. Silver nanoparticles in polyvinylpyrrolidone grafted natural rubber Reactive & Functional Polymers 70 168–174.

Blaiss, D. J. Carlsson, G. W. Csullog and D. M. Wiles. 1974. *J. Colloid Interface Sci.*, 47,636.

Bamford and J. C. Ward. 1961. *Polymer*, 22, 277.

Baszkin, M. Deyme, M. Nishino and L. Ter-Minassian-Saraga. 1976. *Prog. Colloid Polym. Sci.*, 61, 97.

Binnig, H. Recher, C. Gerber and E. Weibel. 1982. *Phys. Rev. Let.*, 49, 57.

Briggs and D. M. Brewis. 1981. *Polymer*, 22, 7.

Briggs and C. R. Kendall. 1982. *Int. J. Adhesion Adhesives.*, 2, 13.

Briggs and C.R. Kendall. 1979. *Polymer*, 20, 1053.

Briggs, D. M. Brewis and M. B. Konieczko. 1979. *J. Mater. Sci.* 14, 1344.

Burel, A. Feldman, C. Bunel. 2005. Hydrogenated hydroxy-functionalized polyisoprene (H-HTPI) and isocyanurate of isophorone diisocyanates (I-IPDI): reaction kinetics study using FTIR spectroscopy. Polymer 46. 15–25.

Cataldo and Angelini, 2006. Some aspects of the ozone degradation of poly(vinyl alcohol). Polymer Degradation and Stability 91 2793-2800

Cevdet Kaynak, Cengiz Celikbilek, Guneri Akovali. 2003. European Polymer Journal, 39 1125–1132.

Chapiro. 1975. *J. Polym. Sci, Polym. Symp.* 50, 181.

Chen, R. Zhang, M. Kodama and T. Nakaya. 1999. *J. Biomater. Sci., Polym. Ed.*, 10, 901.

DeMerlis, D.R. Schoneker. 2003. Review of the oral toxicity of polyvinyl alcohol (PVA). Food and Chemical Toxicology. 41. 319–326.

Dilks. 1981. in *Electron Spectroscopy- Theory, Techniques and Applications*, Ed. C. R. Brundle and A. D. Baker, Vol. 4, Academic Press, London.

Dylan . Nagle, Mathew Celina, Llewellyn Rintoul, Peter M. Fredericks. 2007. Infrared microspectroscopic study of the thermo-oxidative degradation of hydroxy-terminated polybutadiene/isophorone diisocyanate polyurethane rubber. Polymer Degradation and Stability 92 1446-1454.

Franchina and T. J. McCarthy. 1991. *Macromolecules*, 24, 3045 .

Gaczynski and B. Krajewska. 1985. *Polimery* (Polish) 30, 349.

Garbassi, E. Occhiello and F. Polato. 1987. *J. Mater. Sci.*, 22, 207.

Gardella, G. L. GorobeIII, W. L. Hopson and E. M. Eyring. 1984. *Anal Chem.*, 56, 1169.

Gerenser, J. F. Elman, M.G. Mason and A. B. Wootton. 1983. *Polymer*, 24, 47.

Gohil, A. Bhattacharya and P. Ray. 2006. Journal of Polymer Research 13, 161–169.

Goizutea, T. Chiba and T. Inoue. 1993. *Polymer*, 34, 253.

Harrick. 1967. *Internal Reflection Spectroscopy*; Interscience, New York.

Hjertberg, B. A. Sultan, and E. M. Sorvik. 1989. *J. Appl. Polym. Sci.*, 37, 1183.

Hollaender, J. Behnisch and H. Zimmermann. 1993. *J. Appl. Polym. Sci.*, 49, 1857.

http://www.rmutphysics.com/charud/naturemystery/afm/How%20AFM%20works.htm

Jacqueline, R. L. Dooley and S. W. Shalaby. 2000. *J. Appl. Polym. Sci.* 76,1865.

Jayaseksekara, I. Harding, I. Bowater, G.B.Y. christie, G.T. Lonergan. 2004. Preparation, surface modification and characterization of solution cast starch PVA blend films Polymer testing 23, 17-27.

Jihuai Wu, Jinling Huang, Naisheng Chen, Congrong Wei, Yike Chen. 2003. Journal of Materials Processing Technology, 137, 40–44.

Junyan, SuiW, Ruifeng Z. 2006. Ion-imprinted IPNs for preconcentration and determination of Cd(II) by flame atomic absorption spectrometry. Chem Anal (Warsaw). 51, 701–13.

Brydson. 1998. J.A. *Rubber Material and Their Compounds*. Elsevier Applied Science, 82.

Kashani, J. A. Barrie and M. H. George. 1978. *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.* 16, 533 ().

Kato, Yamanobe S, Sakai Y, Takahashi F. 2001. Magnetically activated swelling for thermosensitive gel composed of IPN constructed with PAAm and PAA. Anal Sci, 17, 1125–8.

Kato. 1968. *Polymer*, 9, 419.

Kellner, G. Gidaly and F. Unger. 1982. *Adv. Biomater.*, 3, 423.

Klemberg-Sapieha, L.K. Martinu and M.R. Wertheimer. 1992. *Met. Plast.*, 2, 315.

Leung and M. C. Goh. 1992. *Science*, 255, 64.

Lanauze and D. L. Myers. 1990. *J. Appl. Polym. Sci.*, 40, 595.

Lee and T. J. McCarthy. 1988. *Macromolecules*, 21, 2318.

Lee and T. J. McCarthy. 1988. *Macromolecules*, 21, 3353.

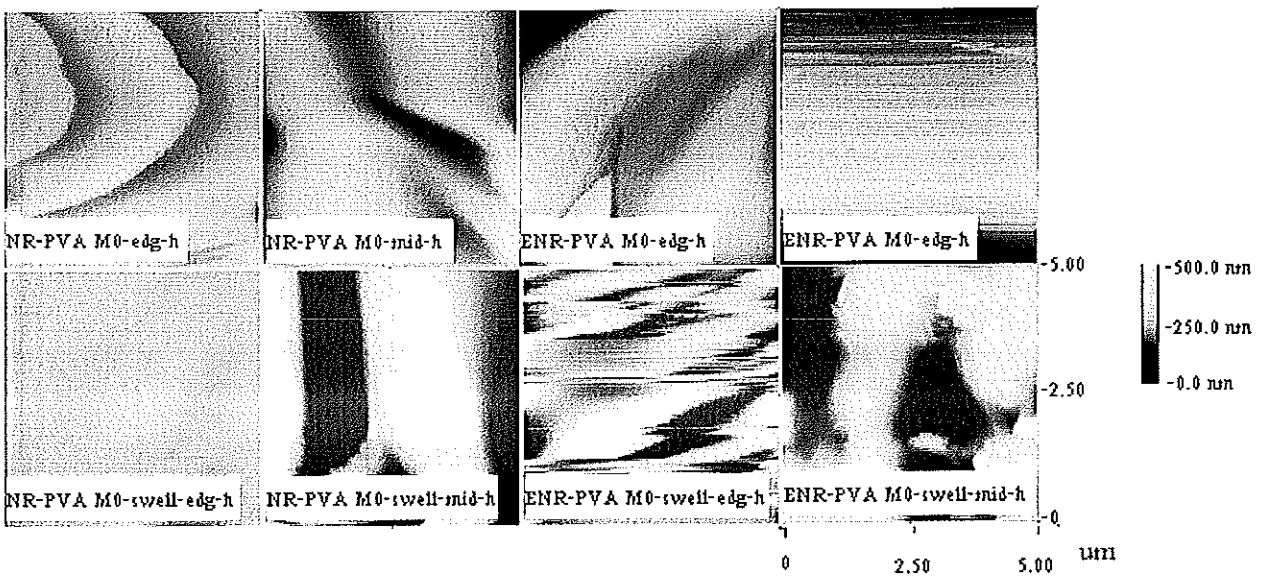
Lee, Ging-Ho Hsiue, Patricia Chuen-Thuen Chang and Chen-Yu Kao. 1996. Plasma-induced grafted polymerization of acrylic acid and subsequent grafting of collagen onto polymer film as biomaterial. *Biomoterials* 17, 1599-1608.

Lehman and P. Dreyfuss. 1979. *Adv. Chem. Ser.*, 176, 587.

Lehrle and S. L. Willis. 1997. *Polymer*, 38, 5937.

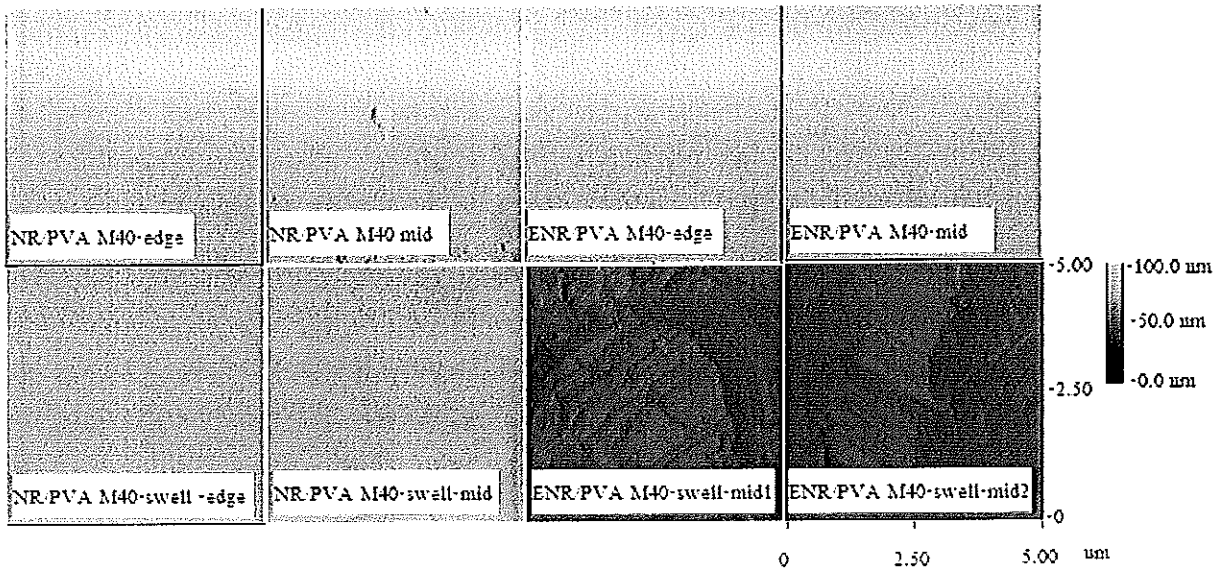
Lenka, P. L. Nayak and A. Basak. 1986. *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, 24, 3139.

Leung and M. C. Goh. 1992. *Science*, 255, 64.



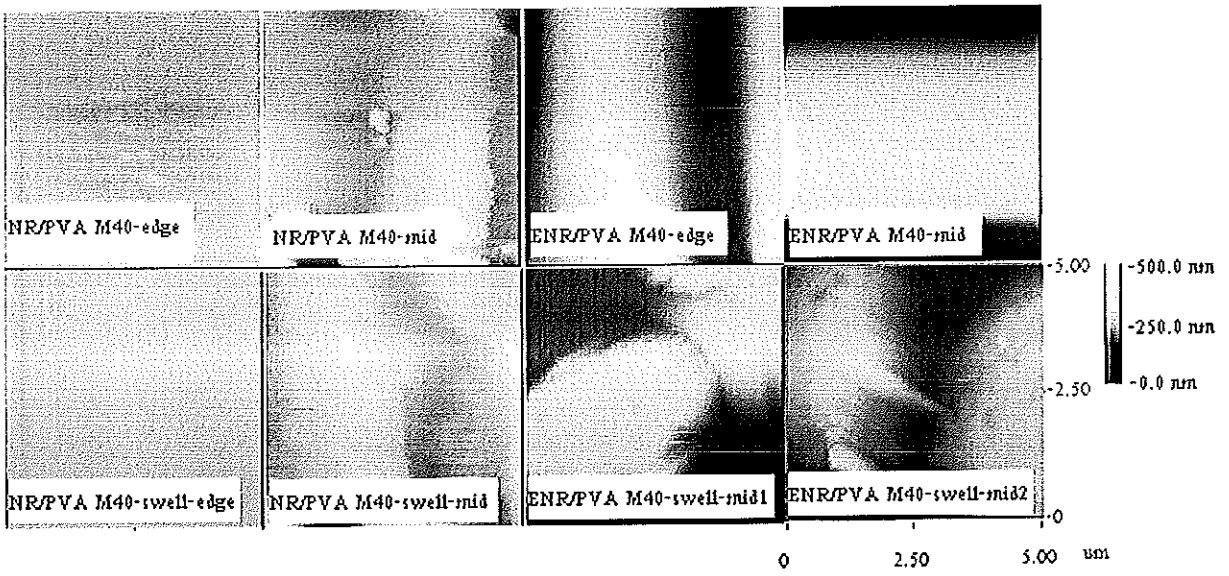
รูปที่ 4.139 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M0 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

จากรูปที่ 4.140 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 มีค่าแรงในแต่ละตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันแสดงให้ให้เห็นถึงความเข้ากันได้ดีของพอลิเมอร์ผสม และเมื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการทดสอบละลายน้ำพบว่าค่าแรงในแต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวยังคงมีความใกล้เคียงกันไม่มีส่วนที่ละลายออกเนื่องจากพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดมีการเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิคในปริมาณ 40%



รูปที่ 4.140 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

จากรูปที่ 4.141 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA มีระดับความสูงที่แตกต่างกันน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA



รูปที่ 4.141 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA M40 จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ height ก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ

ตารางที่ 4.15 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ

Sample	Adhesion force (N.m)			
	EDGE		MIDDLE	
	Before swelling	After swelling	Before swelling	After swelling
NR/PVA M0	11.54	0	80.54	144.38
NR/PVA M40	19.99	17.55	153.81	5.27
ENR/PVA M0	6.11	4.38	166.22	168
ENR/PVA M40	0.19	1.61	36.41	117.88

จากตารางที่4.14 แสดงค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับพื้นผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% ก่อนและหลังการทดสอบการบวม

ตัวในน้ำ พบว่าค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับตัวอย่างมีค่าต่ำ ณ ตำแหน่งบริเวณผิวของตัวอย่าง และมีค่าสูง ณ บริเวณภายในตัวอย่าง

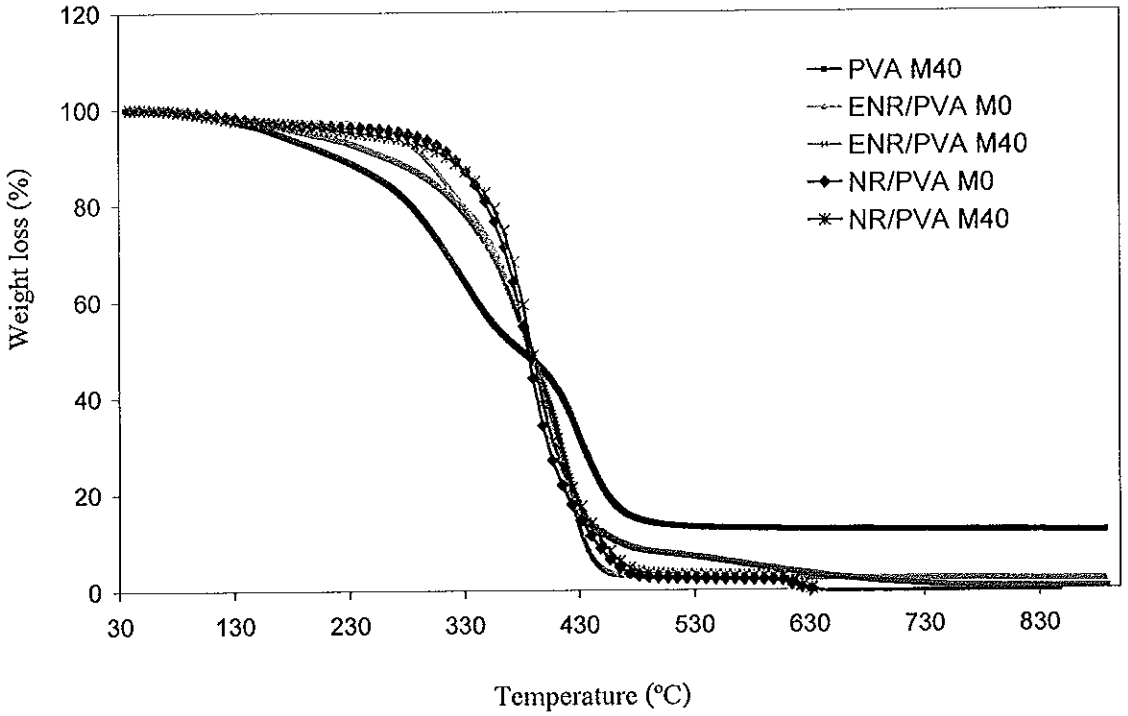
4.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เพื่อตรวจดูความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ในงานวิจัยครั้งนี้มีอยู่ด้วยกัน 3 เทคนิคคือ 1) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA 2) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA และ3) การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

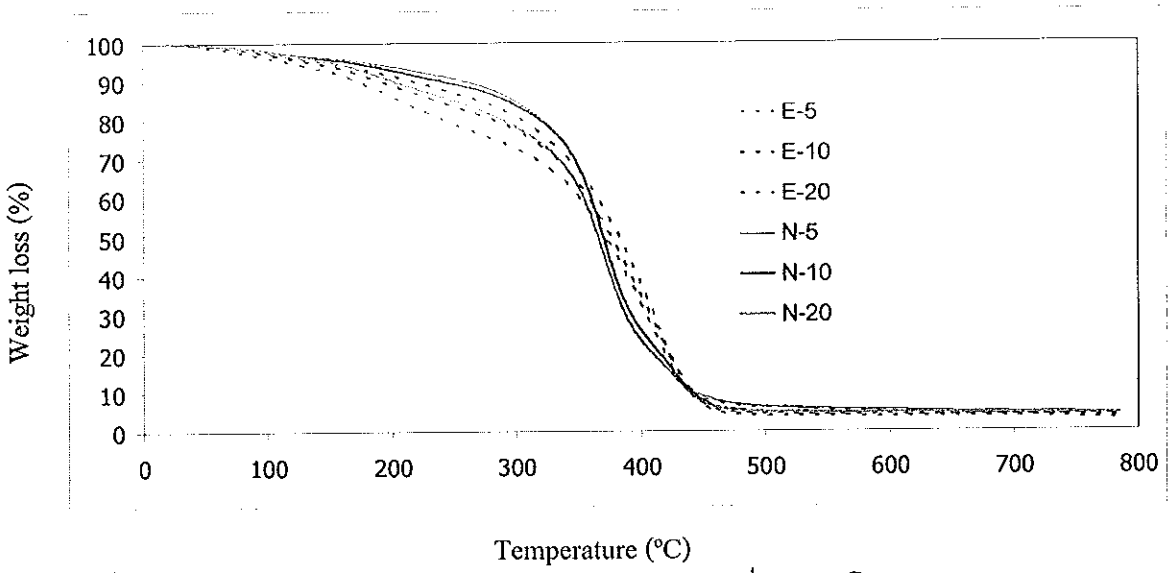
4.4.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริก

เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ด้วยเครื่อง TGA ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.142 และ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ดังรูปที่ 4.143

จากรูปที่ 4.142 และรูปที่ 4.143 เปรียบเทียบความทนทานต่อการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA กับ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่า พอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 และมากกว่าพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิดที่ไม่มีสารเชื่อมขวาง แต่น้อยกว่า PVA สำหรับแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ที่อุณหภูมิของการสลายตัวทางความร้อนที่ต่ำ โดยต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA เนื่องจากแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีการกราฟต์เกิดขึ้นแค่ผิวของตัวอย่างเท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่า ENR/ACC มีความทนทานต่อความร้อนสูงกว่า NR-g-ACC เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า ENR-g-ACC เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ได้ดีกว่า NR-g-ACC



รูปที่ 4.142 สมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริกของพอลิเมอร์ผสม NR/PVAและ ENR/PVA

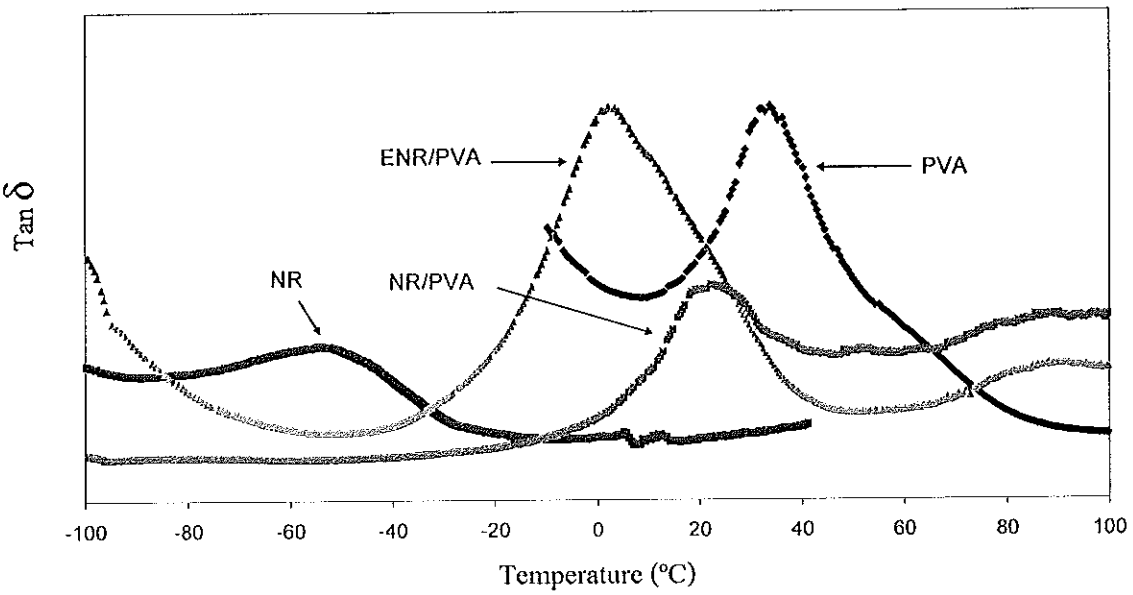


รูปที่ 4.143 สมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริกของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

4.4.5.2 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต

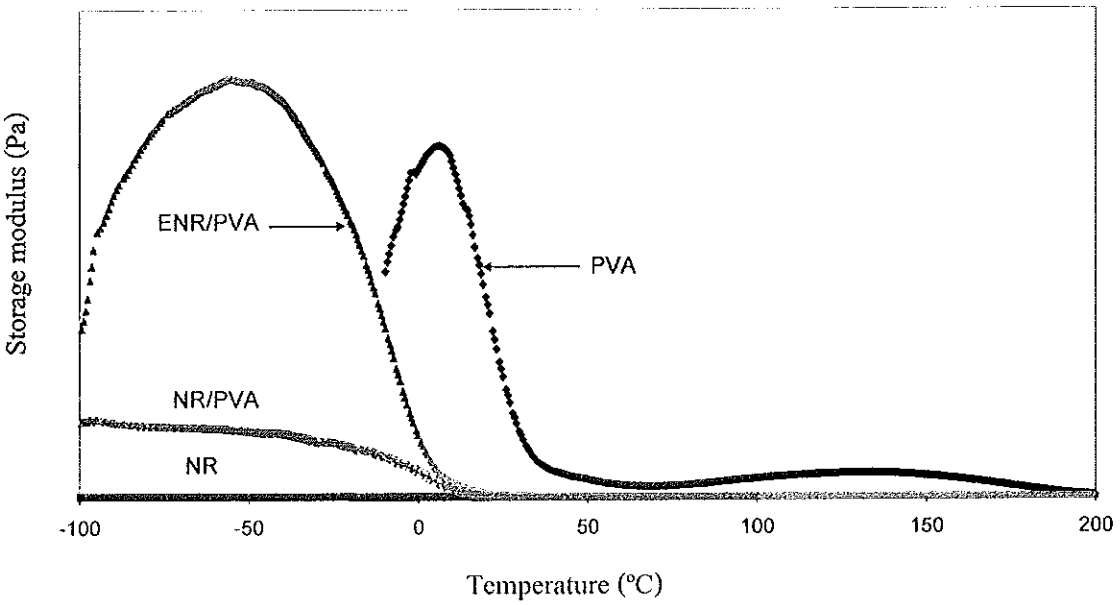
เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ด้วยเครื่อง DMTA ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.142

จากรูป 4.144 การเปรียบเทียบค่า Tan δ ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA M40 NR และ PVA พบว่ายาง NR จะมี T_g ที่ประมาณ -60 °C PVA จะมี T_g ที่ประมาณ 35 °C ส่วนพอลิเมอร์ผสม NR/PVA จะมี T_g ที่ประมาณ 20 °C และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มี T_g ที่ประมาณ 0 °C เห็นได้ว่าสามารถผสมพอลิเมอร์ระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA จะแสดง T_g เพียงค่าเดียวที่ประมาณ 20 °C และ0 °C ตามลำดับ โดยพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จะแสดง T_g ที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA



รูปที่ 4.144 Tan δ กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA NR และ PVA

จากรูปที่ 4.145 ค่ามอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA M40 NR และ PVA พบว่าค่ามอดุลัสสะสมของยาง NR มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ PVA สำหรับค่ามอดุลัสสะสมเมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เมื่อใช้ปริมาณกรดมาลีอิค 40% พบว่า พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่า NR/PVA และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ยังมีค่ามอดุลัสสะสมมากกว่า PVA แสดงให้เห็นการผสมเข้ากันที่ดีเนื่องจากมีการเชื่อมโยงของ PVA กับกรดมาลีอิค ตามปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.49

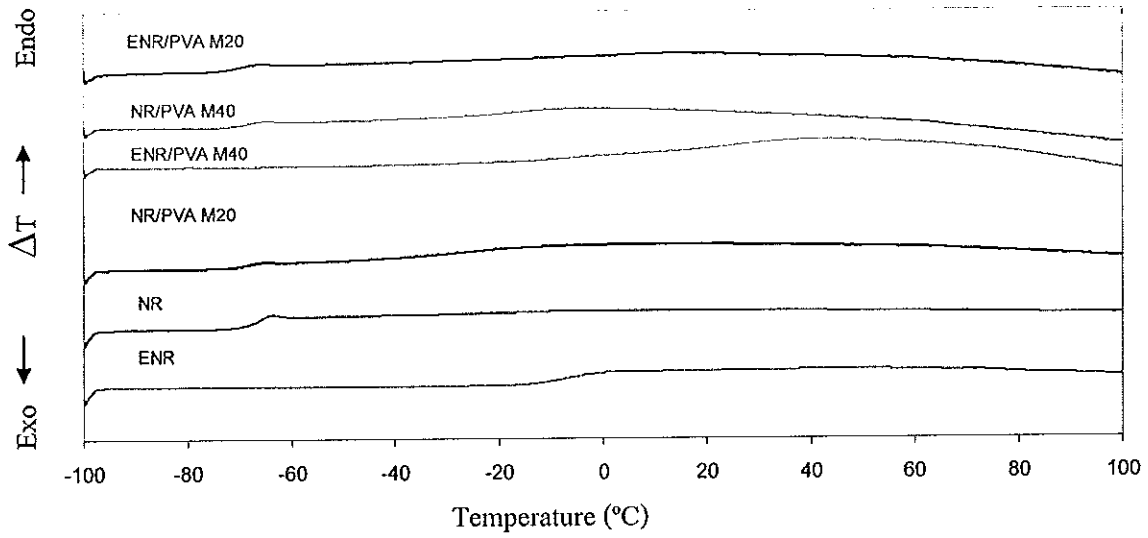


รูปที่ 4.145 มอดุลัสสะสมกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ENR/PVA NR และ PVA

4.4.5.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งคัลลอริเมตรี

เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ด้วยเครื่อง DSC ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.145

จากรูปที่ 4.146 เป็นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เปรียบเทียบกับยาง NR และ ENR เพื่อตรวจดูอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M20 NR/PVA M40 และENR/PVA M20 จะแสดง T_g ที่ประมาณ -67 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเดียวกันกับยาง NR แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมยังคงคุณสมบัติของความเป็นยางอยู่ โดยยาง ENR ที่มี T_g ที่ประมาณ -8 °C แสดงให้เห็นว่าหลังจากดัดแปลงยาง NR เป็นยาง ENR ทำให้ค่า T_g สูงขึ้น สำหรับพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ไม่อาจวิเคราะห์ค่า T_g จากเทคนิคนี้ได้ เนื่องจากไม่อาจเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนที่สามารถสังเกตได้ แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMTA ค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีค่าประมาณ 0 °C



รูปที่ 4.146 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA เปรียบเทียบกับ ENR

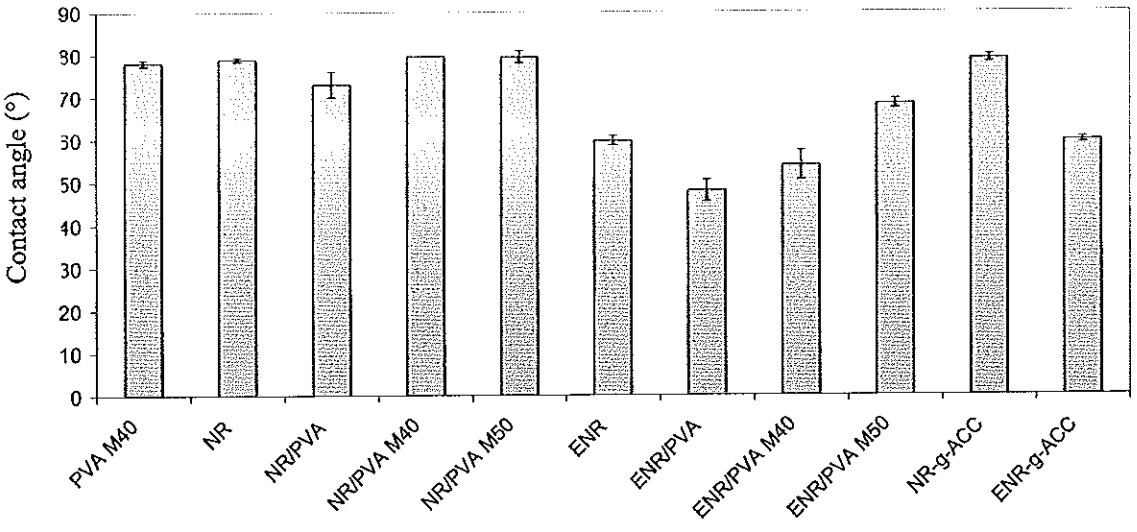
4.4.6 การวัดมุมสัมผัส

ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสมNR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% PVA ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.147

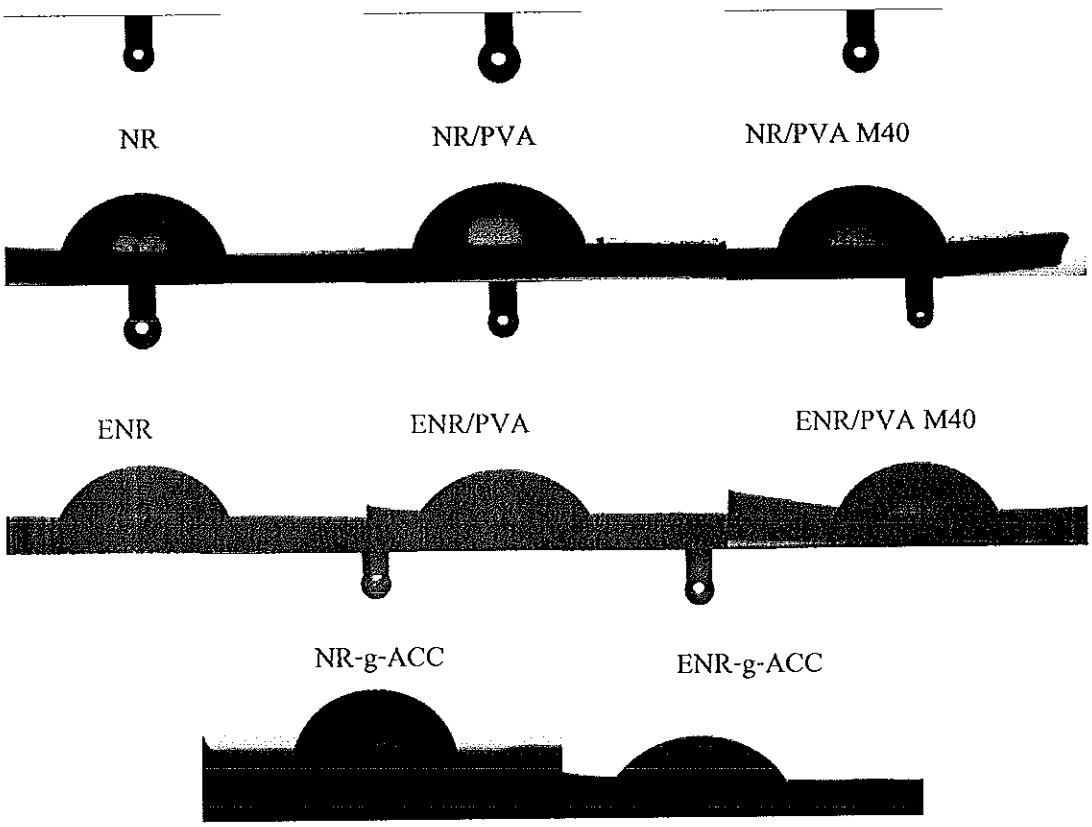
จากรูปที่ 4.147 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% NR ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จะมีค่ามุมสัมผัสน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่นๆ โดยค่ามุมสัมผัสน้อยเป็นการแสดงถึงชอบน้ำมาก ดังนั้นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA จึงชอบน้ำมากกว่าสูตรอื่นๆ สำหรับการเปรียบปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณกรดมาลีอิคเชื่อมขวางในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงเนื่องจากว่าปริมาณกรดมาลิอิคมากขึ้นทำให้การเชื่อมขวางระหว่าง PVA มีมากขึ้น ทำให้ปริมาณของหมู่ไดรอกซิลภายใน PVA ลดลง ความชอบน้ำจึงลดลง สำหรับ PVA จากรูปมีค่ามุมสัมผัสสูงนั่นเพราะ PVA มีการเชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิคปริมาณ 40 phr ทำให้ความชอบน้ำจึงลดลงเนื่องจากการเชื่อมโยงของกรดมาลีอิคจะทำให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ภายใน PVA ลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA กับ ENR/PVA พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความชอบน้ำมากกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่า ENR-g-ACC มีความชอบน้ำมากกว่า NR-g-ACC

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% PVA ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

No.	Formula	Contact angle (°)			
		1	2	3	Average
1	PVA M40	78.2	78.4	77.5	78.03
2	NR	79.5	78.2	79	78.90
3	NR/PVA	68.5	75.2	75.2	72.96
4	NR/PVA M40	79.5	79.5	79.5	79.50
5	NR/PVA M50	78.5	78.2	81.5	79.40
6	ENR	61.1	59.8	58	59.63
7	ENR/PVA	44.2	50.2	49.5	47.96
8	ENR/PVA M40	48.9	54.5	58.4	53.93
9	ENR/PVA M50	69.5	69	66.5	68.33
10	NR-g-ACC	79.5	77.6	79.6	78.90
11	ENR-g-ACC	59.8	60.5	58.6	59.63



รูปที่ 4.147 เปรียบเทียบมุมสัมผัส ของพอลิเมอร์ผสมNR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% PVA NR ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC



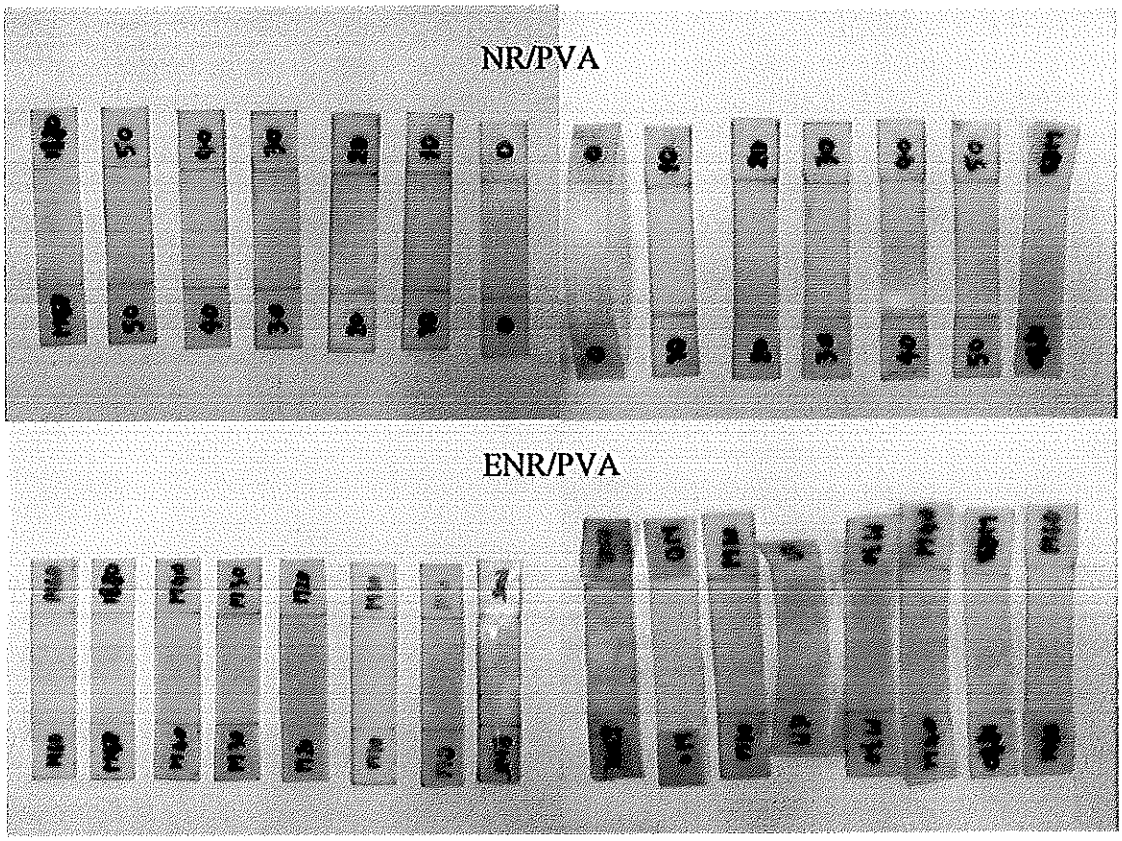
รูปที่ 4.148 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัส ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 และ 40% NR ENR รวมทั้ง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC

4.4.7 การทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม

ทำการทดสอบโอโซนเพื่อศึกษาลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบที่ความเข้มโอโซนที่ 50 ± 5 pphm อุณหภูมิที่ใช้ 40 ± 2 ° C และยืดตัวอย่างไว้ 20 % ใส่ในตู้โอโซนเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จึงนำมาตรวจรอยแตก ได้ผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองที่ได้ ตารางที่ 4.16 พบว่ามีเพียงลักษณะของชิ้นตัวอย่างยาง NR และ ENR สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน โดยมีจำนวนรอยแตกต่อพื้นที่เท่ากับ 16 และ 7 รอยแตก และความยาวเฉลี่ยของรอยแตกเท่ากับ 2.33 และ1.85 มิลลิเมตรตามลำดับ สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นรอยแตกได้เลย แต่มีการเปลี่ยนแปลงสี และชิ้นตัวอย่างมีการบิดเบี้ยวไปจากเดิมเล็กน้อย สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในสูตร ENR/PVA M0 โดยมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองไปเป็นสีขาวซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับโอโซน ดังในรูปที่ 4.99 จากการทดสอบความทนทานต่อโอโซนแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง

NR/PVA และ ENR/PVA มีความทนทานต่อโอโซนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างยาง NR และ ENR เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.149 ลักษณะของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบโอโซน

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบโอโซน รอยแตกที่เห็นได้ด้วยตาเปล่า จำนวนรอยแตกต่อพื้นที่และความยาวเฉลี่ยของรอยแตก

Formulation	Observation	Crack number /area	Average Length crack (mm)
1.NR	appearance	16	2.33
2.M0	none	-	-
3.M10	none	-	-
4.M20	none	-	-
5.M30	none	-	-
6.M40	none	-	-
7.M50	none	-	-
8.M60	none	-	-
9.ENR	appearance	7	1.85
10.M0	none	-	-
11.M10	none	-	-
12.M20	none	-	-
13.M30	none	-	-
14.M40	none	-	-
15.M50	none	-	-
16.M60	none	-	-

4.1.8 สรุปผลการทดลองตอนที่ 4

การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA และ ENR/PVA รวมไปถึงการกราฟต์กรดอะคริลิคบนแผ่นยางธรรมชาติเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการดัดแปรต่อในหัวข้อ 4.5 สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

- โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม

ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ C=O ที่ 1663 cm^{-1} คือ O-H ที่ 1293 cm^{-1} และคือ C-O-C ที่ 1152 cm^{-1} การลดลงของความผลึกของ PVAที่ตำแหน่ง 2-Theta เท่ากับ 40° จากเทคนิค XRD แสดงถึงการเชื่อมโยงระหว่าง PVA กับกรดมาลีอิค กรดมาลีอิกสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาส่วนที่เป็นผลึกของ PVA ได้ ส่วนปฏิกิริยาการกราฟต์ของ NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ยืนยันด้วยเทคนิค ATR-FTIR หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ คาร์บอนิลที่ 1740 cm^{-1} และไฮดรอกซิลที่ 1210 cm^{-1}

- สมบัติเชิงกล

ค่า 100% 300% และค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และพอลิเมอร์ผสมENR/PVA หลังการเชื่อมขวางมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M60 มีค่า 32 MPa เปรียบเทียบกับยาง ENR ที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพียง 2 MPa ความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังเชื่อมโยงด้วยกรดมาลีอิคมีค่าลดลง สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดีกว่าของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ พอลิเมอร์ผสมENR/PVA ให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเติมกลีเซอรอลในปริมาณ 10% โดยสามารถทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สูงถึง 45 MPa สำหรับค่า 100% ของ NR และ ENR สูงขึ้นเล็กน้อยหลังจากให้แสงยูวี โดย ENR-g-ACC > ENR > NR-g-ACC > NR ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดของ NR และ ENR สูงขึ้นเล็กน้อยหลังจากให้แสงยูวี โดย NR-g-ACC > ENR-g-ACC

- ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย

การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สูงกว่า พอลิเมอร์ผสม NR/PVA แต่การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA การละลายในน้ำของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าใกล้เคียงกันกับพอลิเมอร์ผสมNR/PVA ซึ่งมีค่าน้อยมาก ส่วนการละลายในโทลูอีนพอลิเมอร์ผสม NR/PVA สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ส่วนการบวมตัวและความสามารถในการละลายในน้ำ ENR-g-ACC มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น ENR-g-ACC มีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่สูงมากทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้

- ศึกษาการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีลักษณะเป็นเฟสต่อเนื่องมากกว่า พอลิเมอร์ผสมNR/PVA คือมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า สำหรับยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC มีเฟสที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC พบว่ายาง ENR-g-ACC มีเฟสที่มีความขรุขระมากกว่ายาง NR-g-ACC เฟสขรุขระที่มากกว่าแสดงให้เห็นว่า ACC สามารถซึมเข้าไปภายในยาง ENR ได้มากกว่ายาง NR เนื่องมาจากยาง ENR มีหมู่อิพอกไซด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับ ACC

- ศึกษาการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA มีความทนทานต่อความร้อนมากถึง 400°C และมีความทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น จากเทคนิค TGA การตรวจสอบสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลศาสตร์ด้วยเทคนิค DMTA พอลิเมอร์

ผสม NR/PVA สามารถเข้ากันได้ดีโดยแสดง T_g ค่าเดียวที่ประมาณ 20 °C ส่วน พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA แสดง T_g ค่าเดียวที่ประมาณ 0 °C ENR-g-ACC มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่า NR-g-ACC

- การวัดมุมสัมผัส

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความชอบน้ำลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ความชอบน้ำ PVA > ENR > พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA > พอลิเมอร์ผสม NR/PVA > NR สำหรับยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังจากให้แสงยูวีเป็นระยะเวลา 60 นาที ค่ามุมสัมผัสของ ENR-g-ACC มีค่าน้อยกว่า NR-g-ACC

- การวัดความเสียดทานของพื้นผิว

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ยาง ENR > NR > PVA > พอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 > พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40

- ศึกษาการทดสอบสมบัติทนต่อโอโซนของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ พอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สามารถทนทานต่อโอโซนได้ดี กล่าวคือไม่มีรอยแตกเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR และ ENR ที่มีรอยแตกเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

- สูตรที่ดีที่สุด

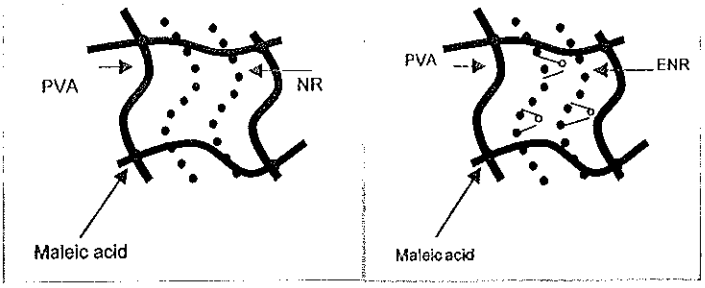
พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่เติมสารเชื่อมขวาง 40% w/w และENR- g-ACC ที่ฉายแสงยูวีเป็น60 นาที เนื่องจากปริมาณการกราฟต์ของ ACC บนแผ่นยางมากที่สุด

4.5 การดัดแปรแผ่นยางผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

การทดลองดังหัวข้อ 3.4.4 การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเป็นขั้นตอนเริ่มต้นเพื่อนำไปสู่การเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน การทำการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสมด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตก่อนทำการเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนก็เพื่อทำให้แผ่นฟิล์มสามารถเคลือบพอลิยูรีเทนได้ง่ายขึ้น สำหรับผลการทดลองในตอนนี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วนย่อยคือ ส่วนที่ 1 การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ส่วนที่ 2 การดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA และส่วนที่ 3 การดัดแปรแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

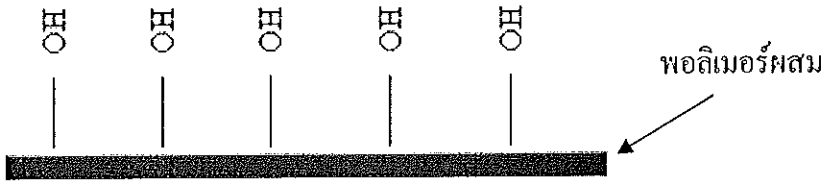
4.5.1 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์

การผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ PVA โดยใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางทำให้สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่เรียกว่า IPN ขึ้นมาได้จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ซึ่งพอลิเมอร์ผสม IPN ที่เตรียมได้นี้จะมีประโยชน์คือเป็นการประยุกต์ทำให้ธรรมชาติมีขั้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.150 ในงานวิจัยนี้จึงนำไปดัดแปรต่อด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาดังต่อไปนี้



NR/PVA ENR/PVA

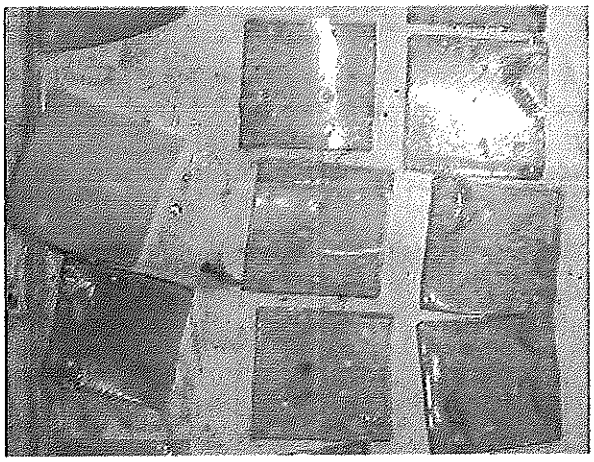
รูปที่ 4.150 ลักษณะการเกิดโครงสร้างร่างแหแบบกึ่งสอดไขว้ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA และ ENR/PVA



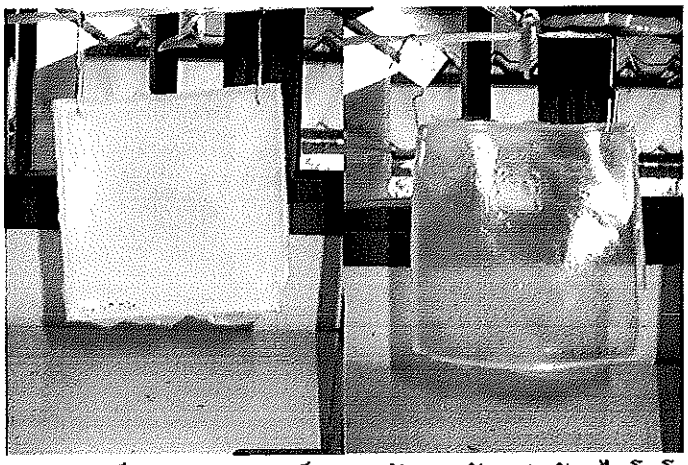
รูปที่ 4.151 แสดงแผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่นพอลิเมอร์ผสม

4.5.1.1 การเตรียมการดัดแปรแผ่นยางผสม

การดัดแปรแผ่นยางผสม NR/PVA ดังในหัวข้อ 3.4.4 ซึ่งมีวิธีการดัดแปรอยู่ 2 วิธี *วิธีแรก* เป็นการศึกษาโดยการดัดแปรในขวดทำปฏิกิริยาที่ประกอบด้วย ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต เจือจางด้วยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (50/50 % V) ไดบิวทิลทิน ไดลอเรต ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยมีการต่อ N_2 เพื่อป้องกันไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งสามารถเตรียมแผ่นฟิล์มจากการดัดแปรได้สำเร็จ แต่มีข้อด้อยก็คือสามารถเตรียมการดัดแปรแผ่นฟิล์มขนาดเล็กๆคือประมาณ 2 x 2 cm (ดังรูป 4.151) จึงมีการหาวิธีการใหม่เพื่อให้สามารถดัดแปรพอลิเมอร์ผสมได้ในปริมาณที่มากขึ้นดังวิธีการที่ 2 ซึ่งเป็นการเตรียมการดัดแปรในเพลตกระจกที่ออกแบบให้มีฝาปิดเพื่อป้องกันไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตออกซิเจนในอากาศ สำหรับการเตรียมไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจะทำคล้ายกันกับวิธีการที่ 1 คือ เจือจางด้วยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (50/50 % V) ไดบิวทิลทินไดรอเรต แต่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที จึงนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ได้ดังรูปที่ 4.153 และตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.152 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยใช้วิธีที่ 1



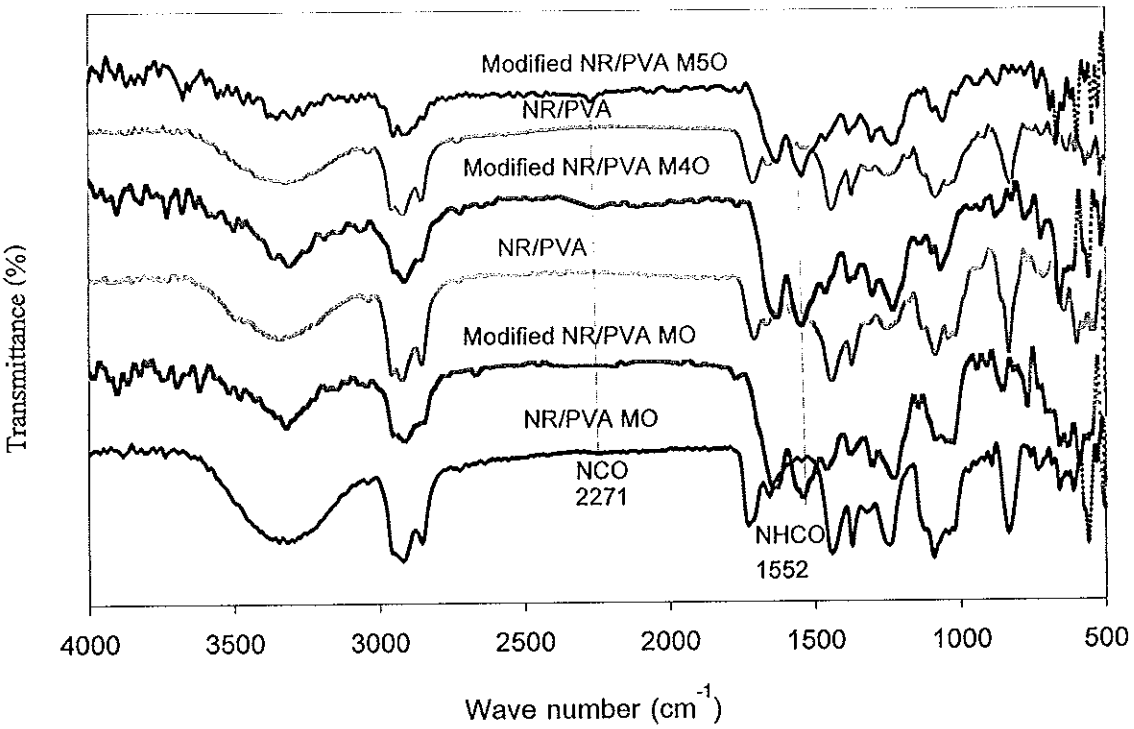
รูปที่ 4.153 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยใช้วิธีที่ 2

ตารางที่ 4.18 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตก่อนและหลังวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Formula	After modified isophorone	After cured
1.NR/PVA M0	Not change	Brightness, hard
2.NR/PVA M40	Not change	Brightness, hard
3.NR/PVA M50	Not change	Brightness, hard
4.NR	Not change	Softener than other samples

4.5.1.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสม

สเปคตรัมอิฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่างๆก่อนและหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.154 โดยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2271 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO หลังจากที่ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเกิดปฏิกิริยาจะทำให้พีคตำแหน่งนี้ลดลง (F.Burel *et al.*, 2005) แต่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1552 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.157



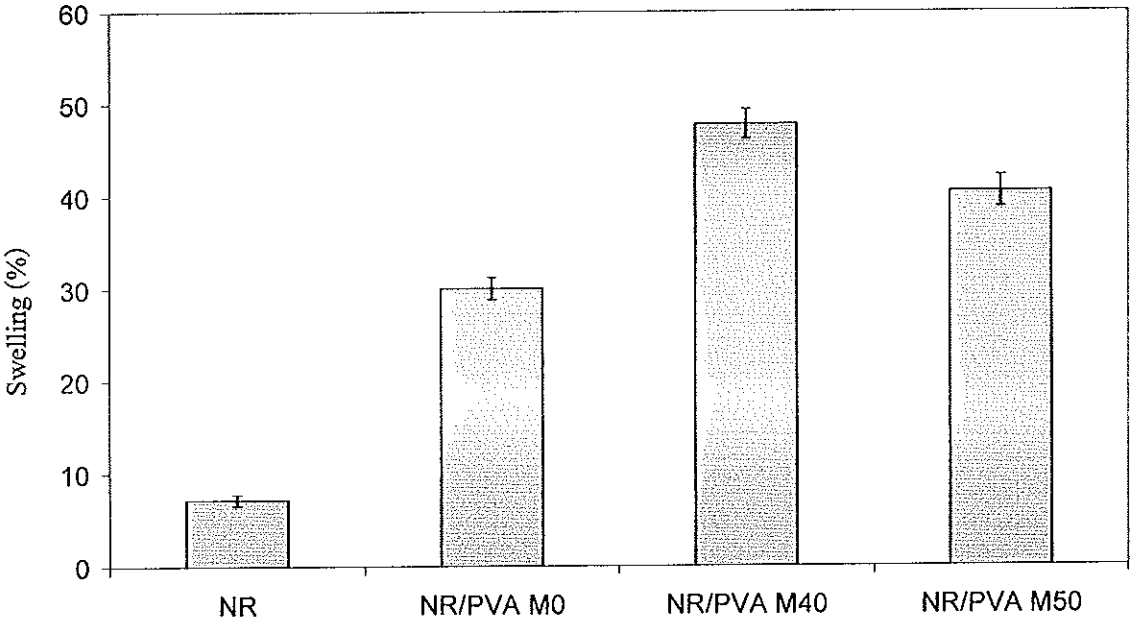
รูปที่ 4.154 สเปคตราอิฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิคต่าง ๆ ก่อนและหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.1.3 ศึกษาความต้านทานต่อตัวทำละลาย

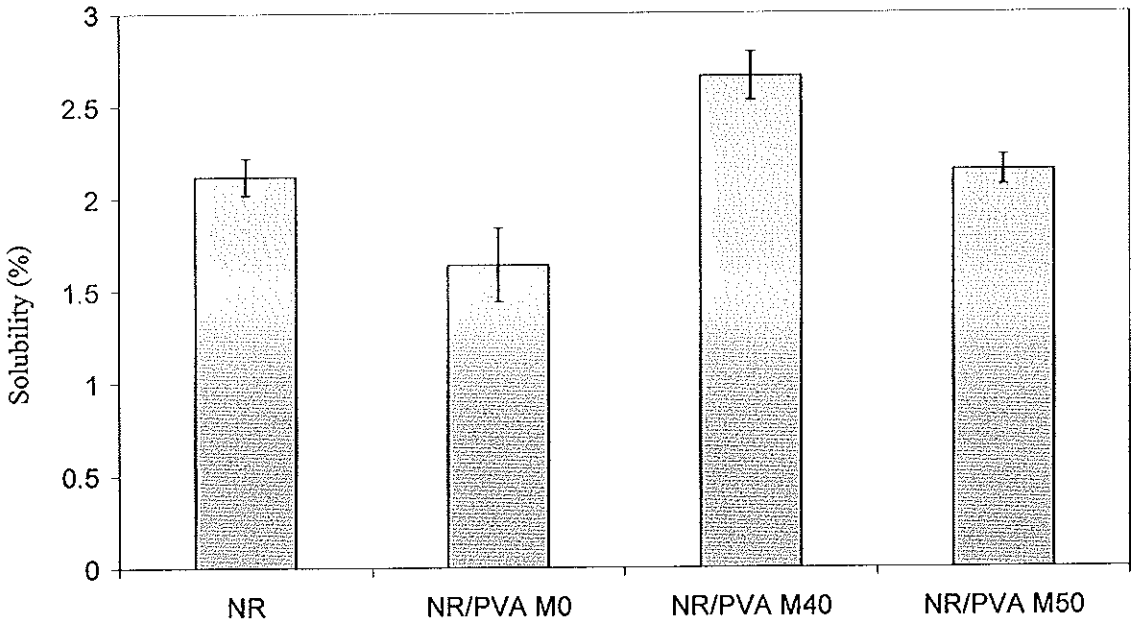
การศึกษาสมบัติทางด้านความทนทานต่อตัวทำละลาย เพื่อเป็นการตรวจสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการดัดแปร โดยทำการทดสอบสูตรต่าง ๆ คือ พอลิเมอร์ผสมNR/PVA M0 NR/PVA M40 และ NR/PVA M50 เปรียบเทียบกับยาง NR โดยทำการศึกษาในตัวทำละลายคือ น้ำและโทลูอีน ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองต่าง ๆ ดังหัวข้อต่างๆต่อไปนี้

ก. การบวมตัวและความสามารถในการละลายน้ำ

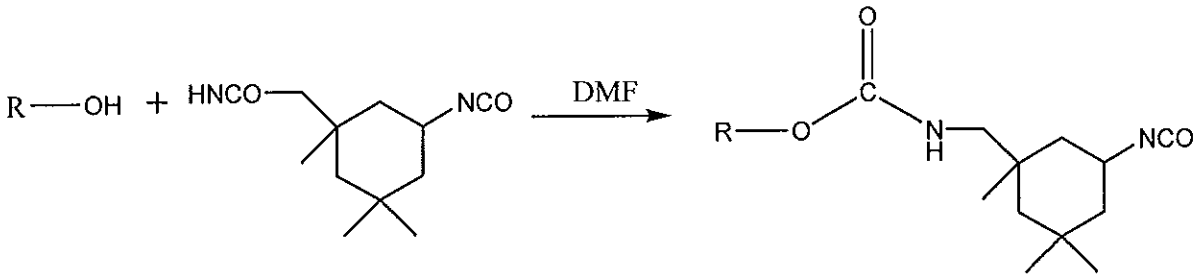
การบวมตัวในน้ำและความสามารถในการละลายในน้ำของ NR/PVA หลังจากการดัดแปร ดังรูปที่ 4.155 และ 4.156 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแล้วพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ยังมีการบวมตัวในน้ำในระดับที่สูง แต่ผลที่มีความน่าสนใจก็คือความสามารถในการละลายในน้ำ โดยพบว่าความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแล้ว อยู่ในระดับที่ต่ำมาก แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรมีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.157 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ส่วนของ PVA เพียงเล็กน้อยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาที่ถูกละลายออกไป



รูปที่ 4.155 การบวมตัวในน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.156 ความสามารถในการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

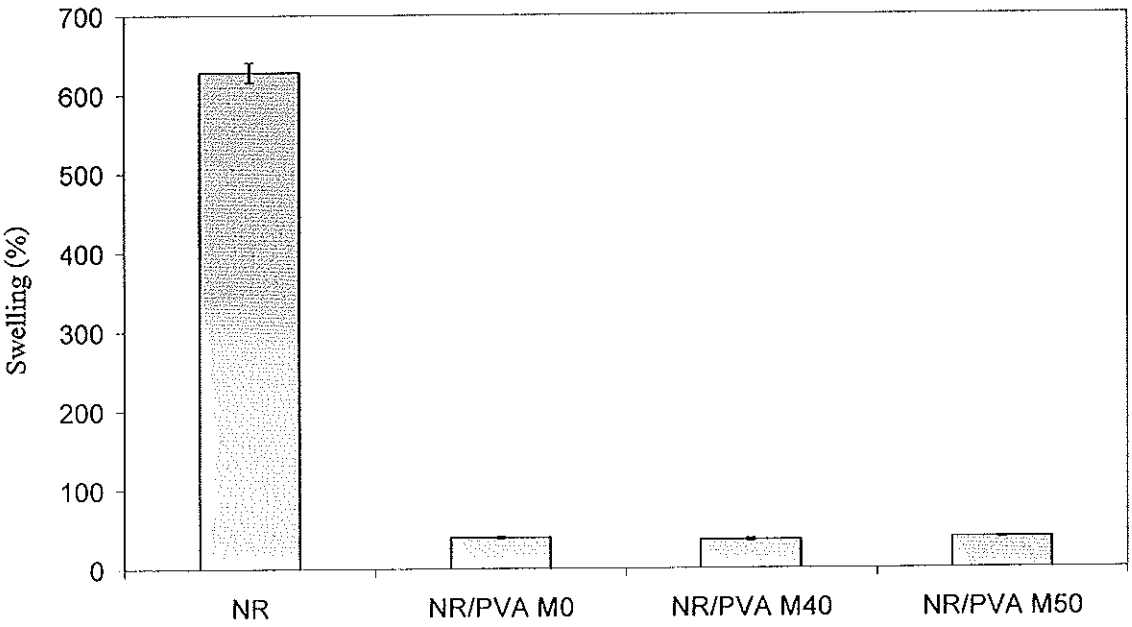


R = แผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

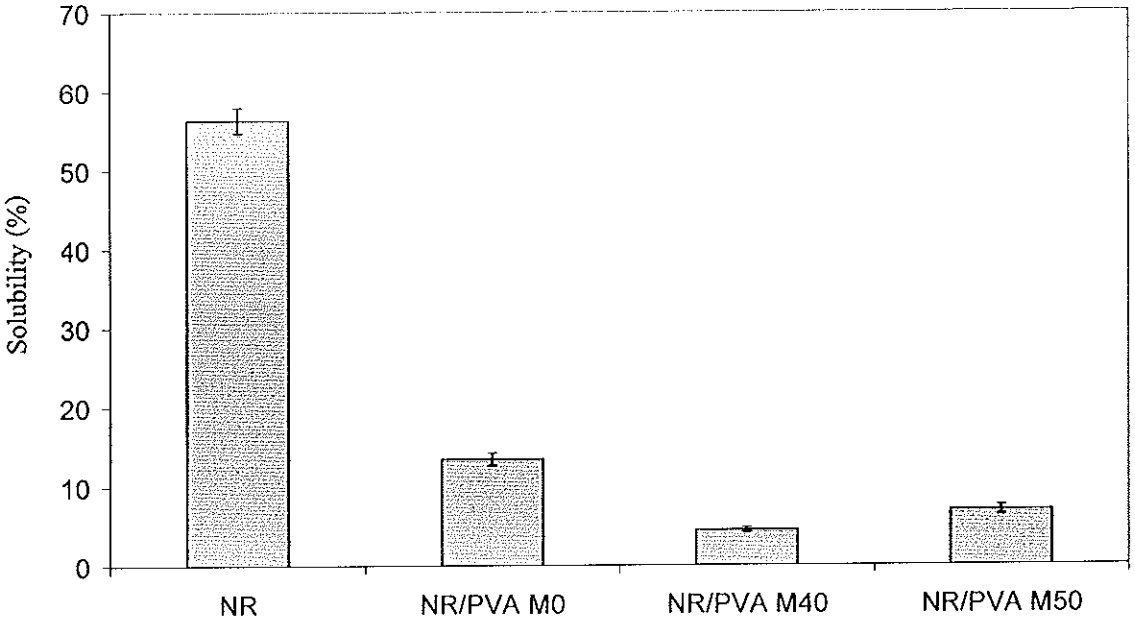
รูปที่ 4.157 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA

ข. การบวมตัวในโทลูอีนความสามารถในการละลายโทลูอีน

การบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.158 และรูปที่ 4.159 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่ลดลงหลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.158 การบวมตัวในโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

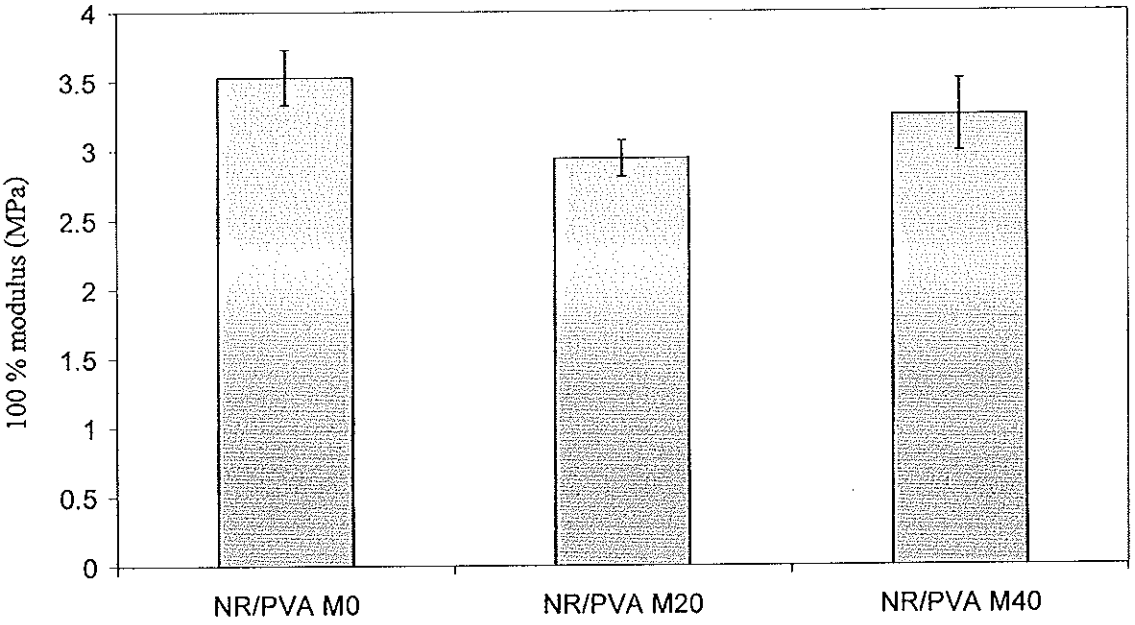


รูปที่ 4.159 ความสามารถในการการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณเกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

ก. มอดุลัสที่ระยะยืด 100 %

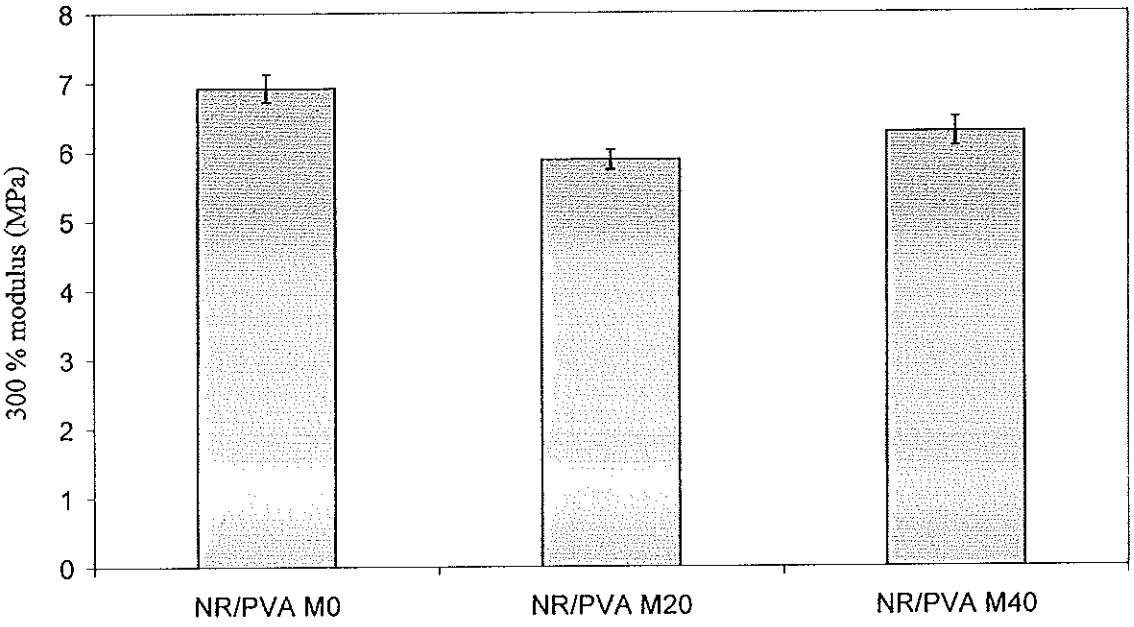
ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.160 พบว่าค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังในหัวข้อ 4.4.3.1 แสดงว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีการเกิดปฏิกิริยาขึ้นหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.160 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ข. มอดุลัสที่ระยะยืด 300 %

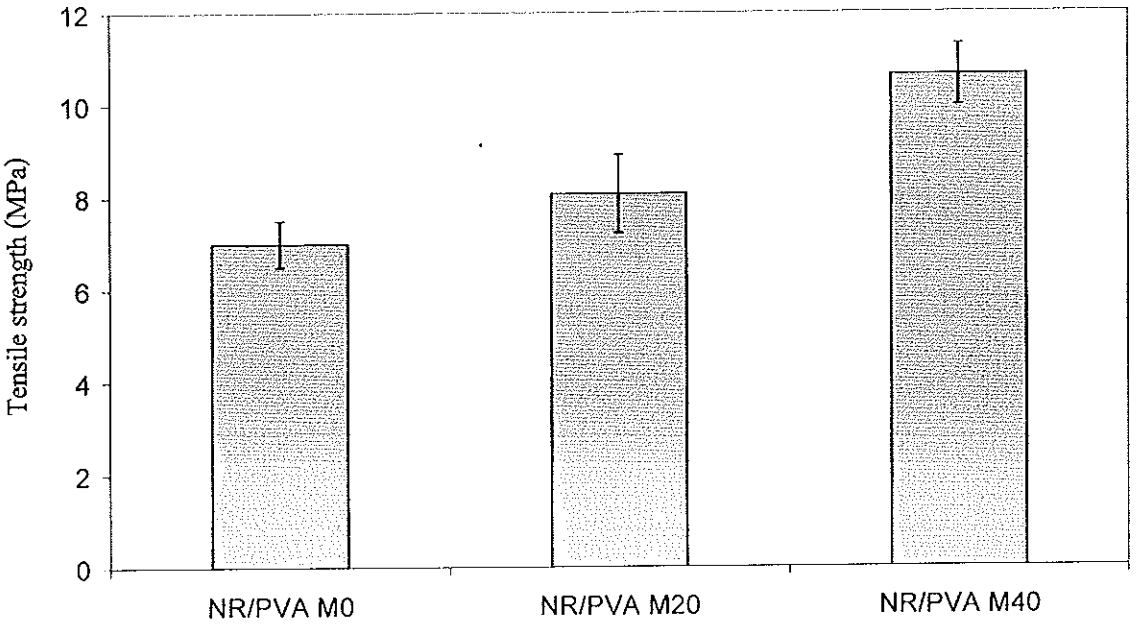
ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.161 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA มีค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ที่เพิ่มขึ้นดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเช่นเดียวกับค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% สำหรับค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมโยงมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่มีการเชื่อมขวางด้วยกรดมาลีอิคเนื่องมาจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีกรดมาลีอิคยังมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มากจึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้มากกว่า ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตทำให้ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.161 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ค. ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

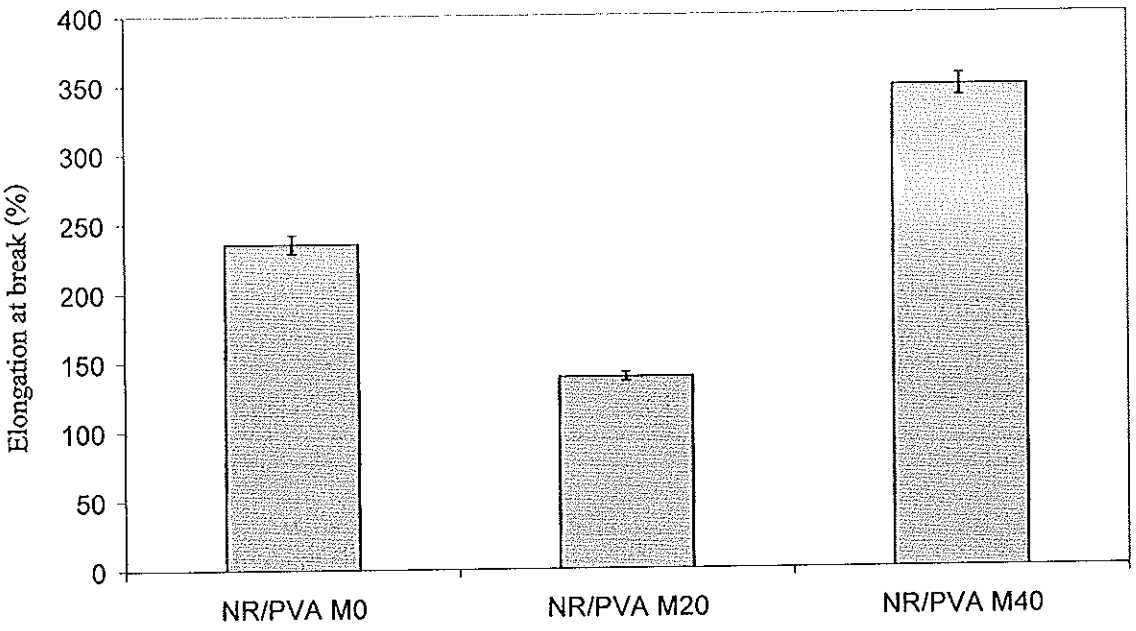
ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.162 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตในหัวข้อที่ 4.4.3.3 และพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นโดยพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% หลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าสูงถึง 11 MPa เปรียบเทียบกับก่อนการดัดแปรที่มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพียง 5 MPa



รูปที่ 4.162 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ง. สมบัติด้านความสามารถในการยืด

ค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.163 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าความสามารถในการยืดที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต เนื่องจากพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีความแข็งแรงมากขึ้นดูจากการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ซึ่งการที่พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงที่มากขึ้นทำให้มีความสามารถในการยืดที่ลดลงไปตามลำดับ



รูปที่ 4.163 ค่าความสามารถในการยืด ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.1.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

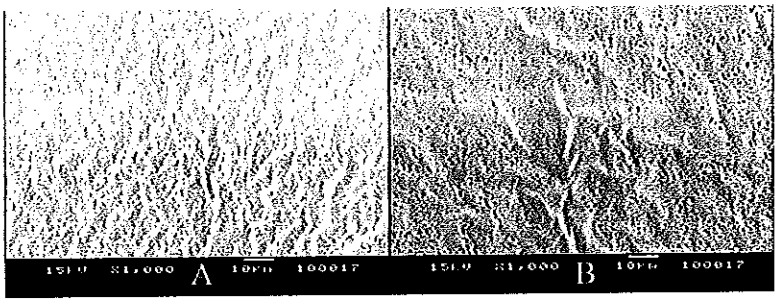
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนตเพื่อเป็นการตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด โดยในงานวิจัยครั้งนี้มีเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA อยู่ 2 วิธีคือ 1) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM 2) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย AFM

4.5.1.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

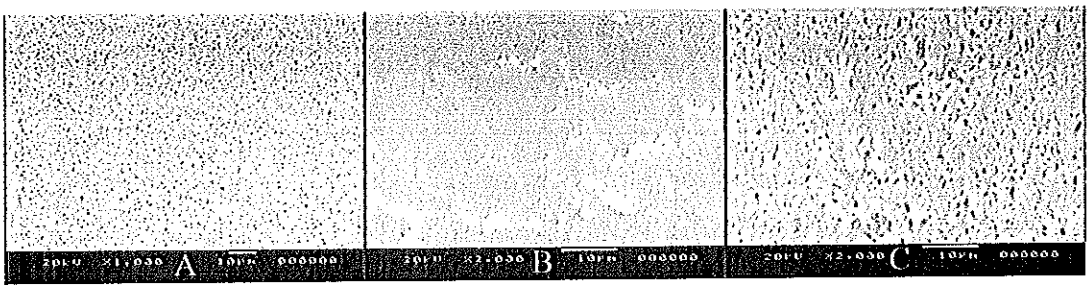
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนต ทำการทดสอบเปรียบเทียบผล ก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีน (ชิ้นตัวอย่างหลังจากการทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีนมาอบแห้งก่อนนำมาตรวจดูลักษณะทางสัณฐานวิทยา) โดยใช้เครื่อง JSM JEOL 2000 ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นตัวอย่างมาทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจน พื้นผิวที่ผ่านการทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจนแล้วมาทำการเคลือบด้วยทองก่อนที่จะนำมาทดสอบ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีนตามลำดับ ดังรูปที่ 4.164 และรูปที่ 4.165 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

และทดสอบการบวมตัวในน้ำและโทลูอีนแล้วยังมีส่วนที่สามารถละลายออกไปได้เนื่องจากเป็นการทดสอบชิ้นตัวอย่างโดยการหักชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ภาพที่ได้จึงเป็นส่วนของลักษณะภายในตัวอย่างซึ่งไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั่วถึงทั้งหมด



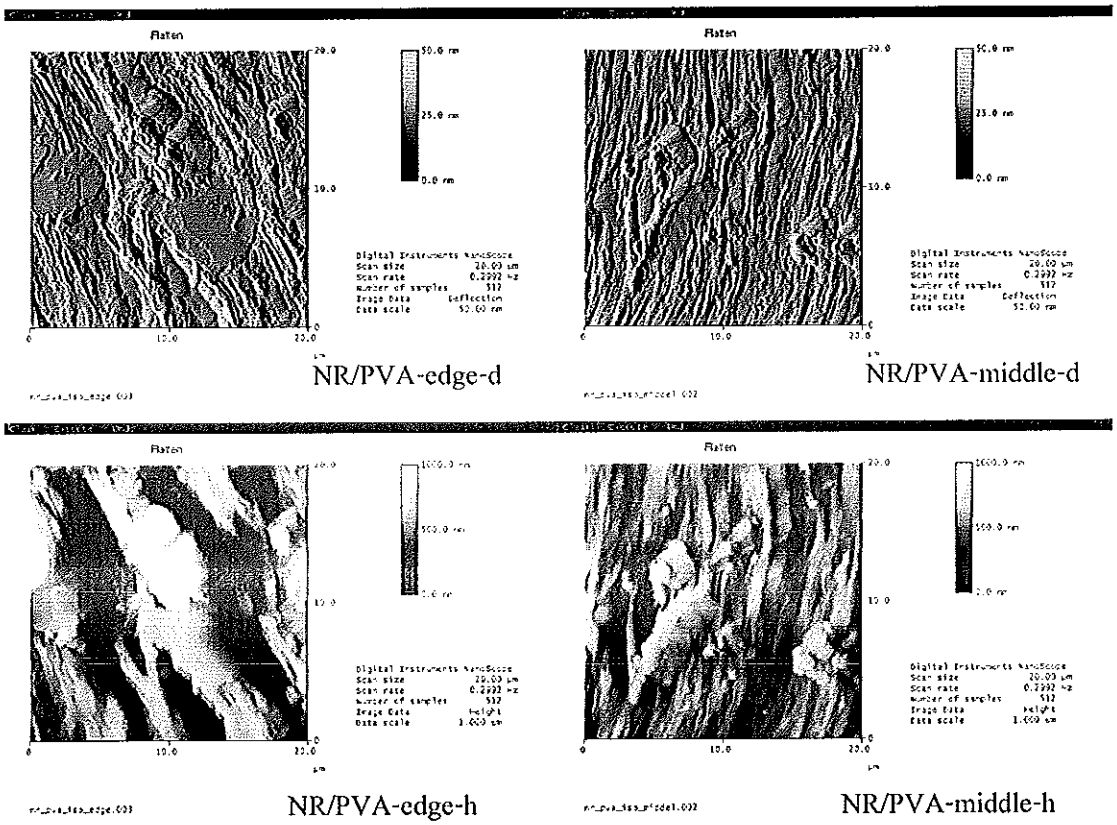
รูปที่ 4.164 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังการทดสอบการบวมตัวในน้ำ A) M20 และ B) M40



รูปที่ 4.165 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน A) M0 B) M20 และ C) M40

4.5.1.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height ดังรูปที่ 4.166 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 มีเฟสที่แตกต่างกันกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงให้เห็นถึงพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดี



รูปที่ 4.166 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height

จากตารางที่ 4.19 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM พบว่าบริเวณภายในตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีค่าแรงยึดติดมากกว่าบริเวณผิวตัวอย่าง เนื่องจากตัวอย่างหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต บริเวณผิวตัวอย่างส่วนที่มีความเป็นขั้วเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ส่วนที่เป็นขั้วลดลงทำให้ค่าแรงยึดติดลดลงไปด้วย

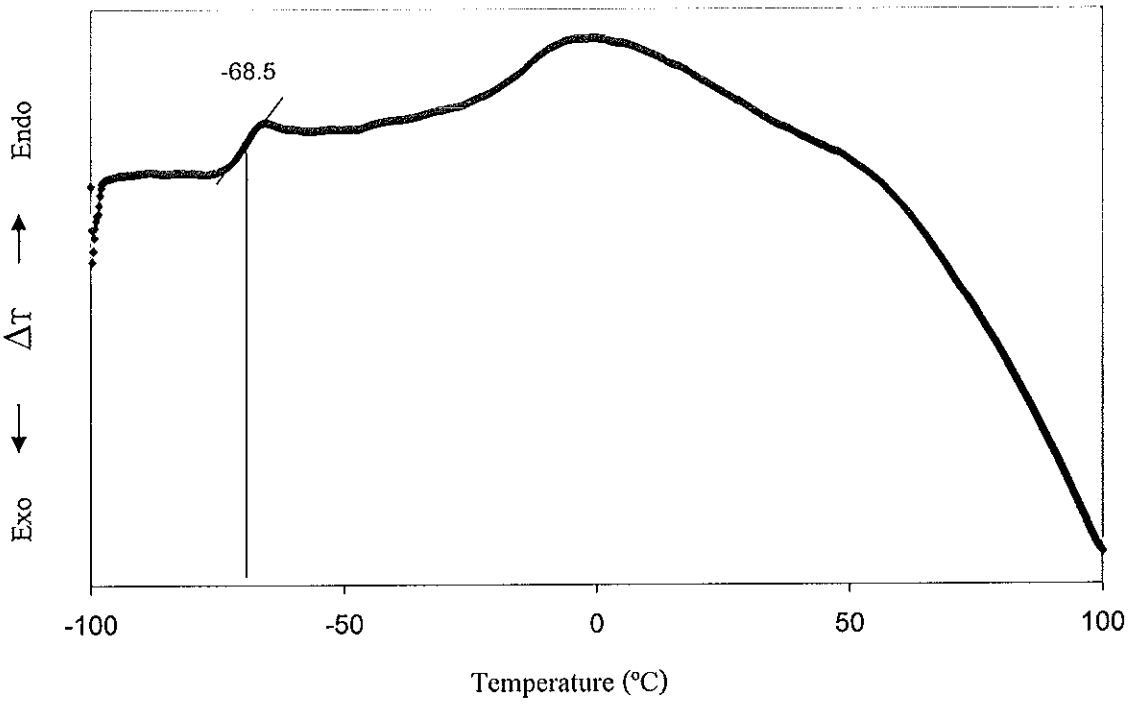
ตารางที่ 4.19 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่องAFM

Sample	Adhesion force (N.m)			
	1	2	3	Average
EDGE	18.71	20.71	20.07	19.83
MIDDLE	52.6	52.08	52.81	52.5

4.5.1.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนต เพื่อตรวจดูความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนตคือ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.167 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตยังคงมีสมบัติของความเป็นยางอยู่เนื่องจากแสดงค่า T_g ที่ -68.5 °C



รูปที่ 4.167 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.1.7 การวัดมุมสัมผัส

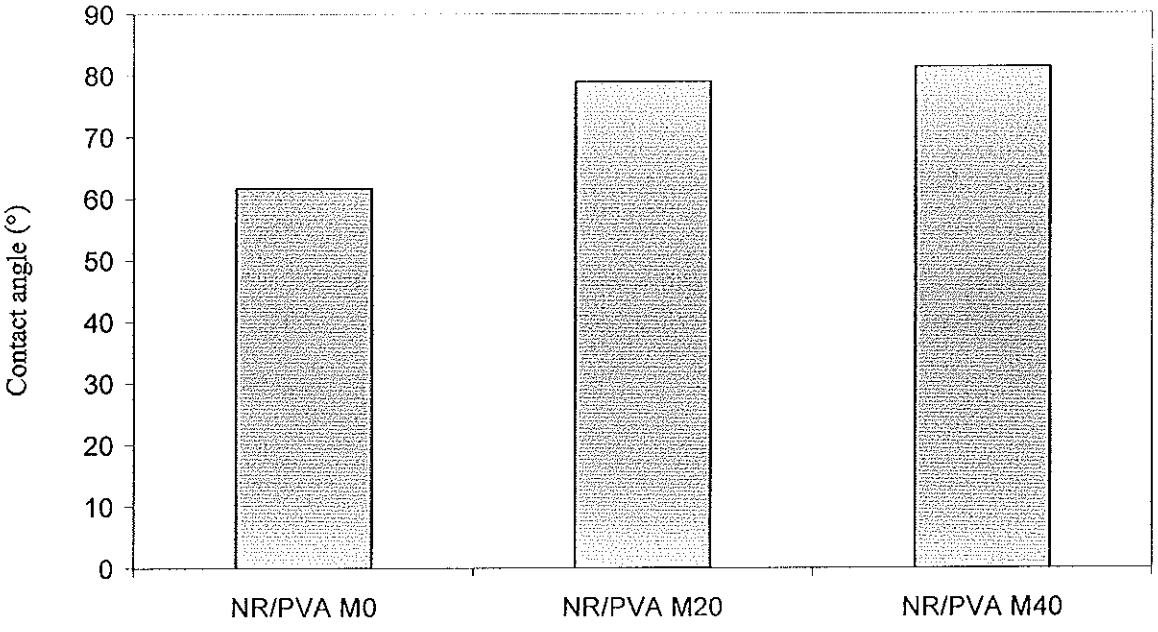
การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.13 ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.168

ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.168 พบว่าพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรด

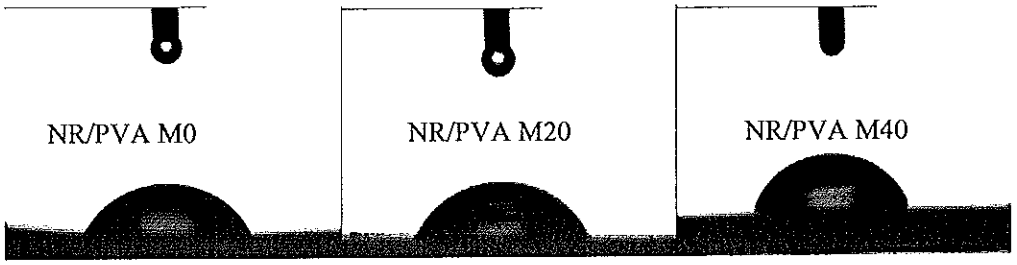
มาลีอิค 20 และ 40 หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตพบว่ามีค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น (ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 20 และ 40 ก่อนดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตดังหัวข้อ 4.4.6 มีค่า 79.50 และ 79.40 ตามลำดับ) แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางมีค่ามุมสัมผัสที่ลดลง (ก่อนดัดแปรมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 72.96) เนื่องจากในขั้นตอนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีการเจือจางไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตก่อนทำการดัดแปรด้วยไดเมทิลฟอร์มาไมด์ ซึ่งสามารถละลายส่วนของยาง NR ได้เพราะพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ไม่มีสารเชื่อมโยง เมื่อมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (NR) ถูกละลายออกทำให้เหลือส่วนที่ชอบน้ำ (PVA) พอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจึงมีความชอบน้ำมากขึ้น

ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

Formula	Contact angle (°)
NR/PVA M0	61.67
NR/PVA M20	79.00
NR/PVA M40	81.33



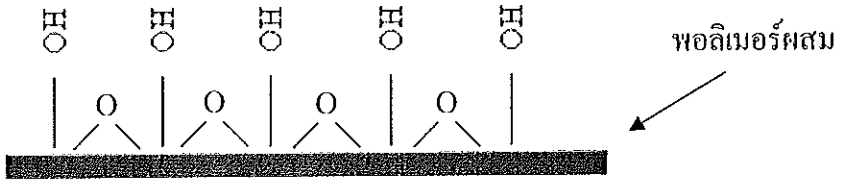
รูปที่ 4.168 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.169 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.2 พอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับ PVA โดยใช้กรดมาลีอิคเป็นสารเชื่อมขวางทำให้สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่เรียกว่า IPN ขึ้นมาได้จากที่ได้กล่าวมาแล้วดังรูปที่ 4.150 ในหัวข้อ 4.5.1ซึ่งพอลิเมอร์ผสม IPN ที่เตรียมได้นี้จะมีประโยชน์คือเป็นการประยุกต์ทำให้ธรรมชาติมีขั้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลายกหลายมากขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.170 ในงานวิจัยนี้จึงนำไปดัดแปรต่อด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาดังต่อไปนี้

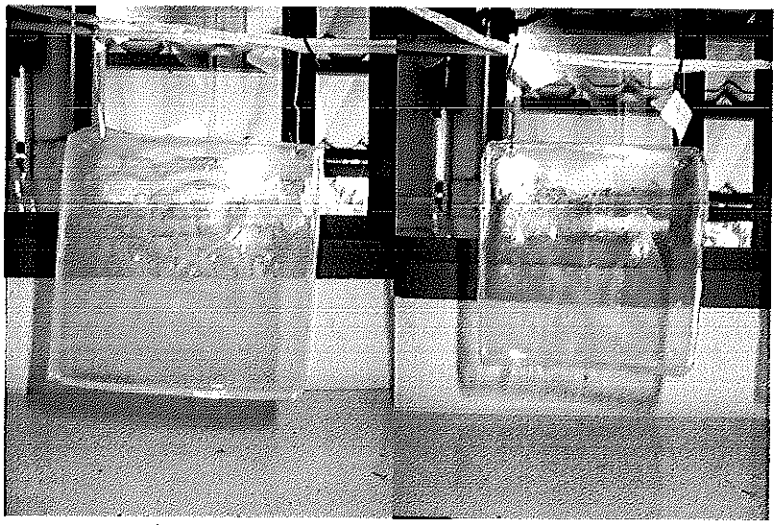


รูปที่ 4.170 แผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่นพอลิเมอร์ผสม

4.5.2.1 การเตรียมการดัดแปรแผ่นยางผสม

วิธีการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ทำเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.5.1.1 วิธีการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ได้ดังรูปที่ 4.171 และตาราง 4.20 ซึ่งพบว่าแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีการบวมตัวเล็กน้อยหลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีและแข็งขึ้นหลังจากการวัลคาไนซ์ โดยพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมขวางมีลักษณะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองขุ่นและแข็งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้มากกว่า พอลิเมอร์ผสม

ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40 และ 50 % สำหรับแผ่นยาง ENR มีลักษณะที่บวมตัวมาก เนื่องจากในขั้นตอนการดัดแปรมีการเจือจางไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตด้วย DMF และหลังจากวัลคาไนซ์แล้วแผ่นยาง ENR มีลักษณะบิดเบี้ยว ขุ่น และแข็ง แสดงให้เห็นว่าสามารถเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้มากที่สุด ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การติดมากถึง 182.01% ของแผ่นฟิล์มขนาด 4×4 cm^2 จากตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA –ขนาด 1 cm^2 และ 4 cm^2 ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% เปรียบเทียบกับแผ่นยาง ENR แผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA –ขนาด 1 cm^2 และ 4 cm^2 มีเปอร์เซ็นต์การติดที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดแผ่นที่ใช้ดัดแปรไม่ค่อยมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต



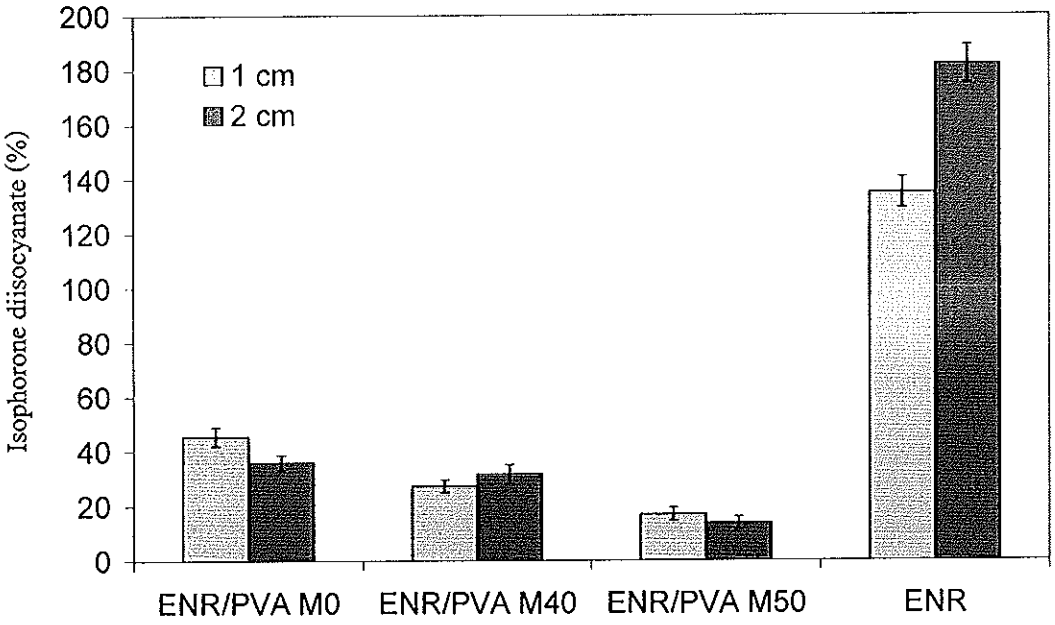
รูปที่ 4.171 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยใช้วิธีที่ 2

ตารางที่ 4.21 ลักษณะแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตก่อนและหลังวัลคาไนซ์ที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Formula	After modified isophorone	After cured
1.ENR/PVA M0	Less swelling	Yellowish and harder
2.ENR/PVA M40	Less swelling	Yellowish and harder
3.ENR/PVA M50	Less swelling	Yellowish and harder
4.ENR	Highly swelling and gel	Distortion stability and hardness

ตารางที่ 4.22 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ขนาด 1 cm^2 และ 4 cm^2 ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% เปรียบเทียบกับแผ่นยาง ENR

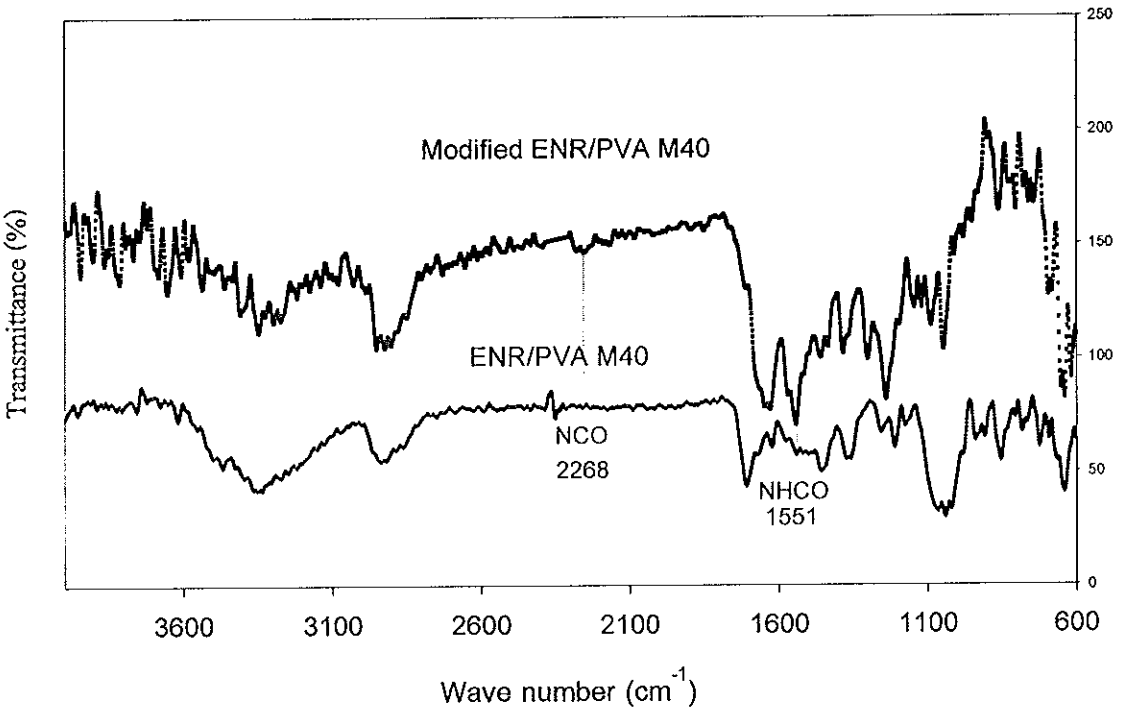
		Isophorone (%)	
No.	Formula	1 cm^2	4 cm^2
1	ENR/PVA M0	45.55	36.09
2	ENR/PVA M40	27.36	31.71
3	ENR/PVA M50	16.99	13.77
4	ENR	134.94	182.01



รูปที่ 4.172 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ขนาด 1 cm^2 และ 4 cm^2 ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% เปรียบเทียบกับแผ่นยาง ENR

4.5.2.2 โครงสร้างทางเคมี

สเปคตราอินฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค40% ก่อนและหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่4.173 โดยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจะแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2268 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO หลังจากที่ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเกิดปฏิกิริยาจะทำให้พีคตำแหน่งนี้ลดลง (F.Burel *et al.*, 2005) แต่จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1551 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.157

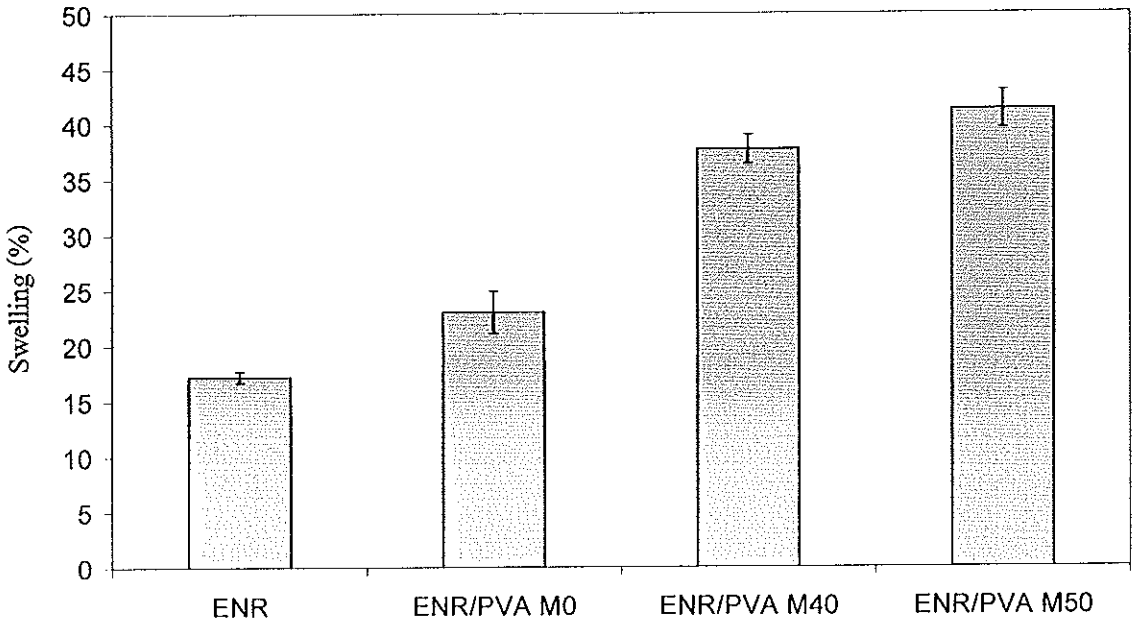


รูปที่ 4.173 สเปคตราอินฟราเรดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ก่อนและหลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

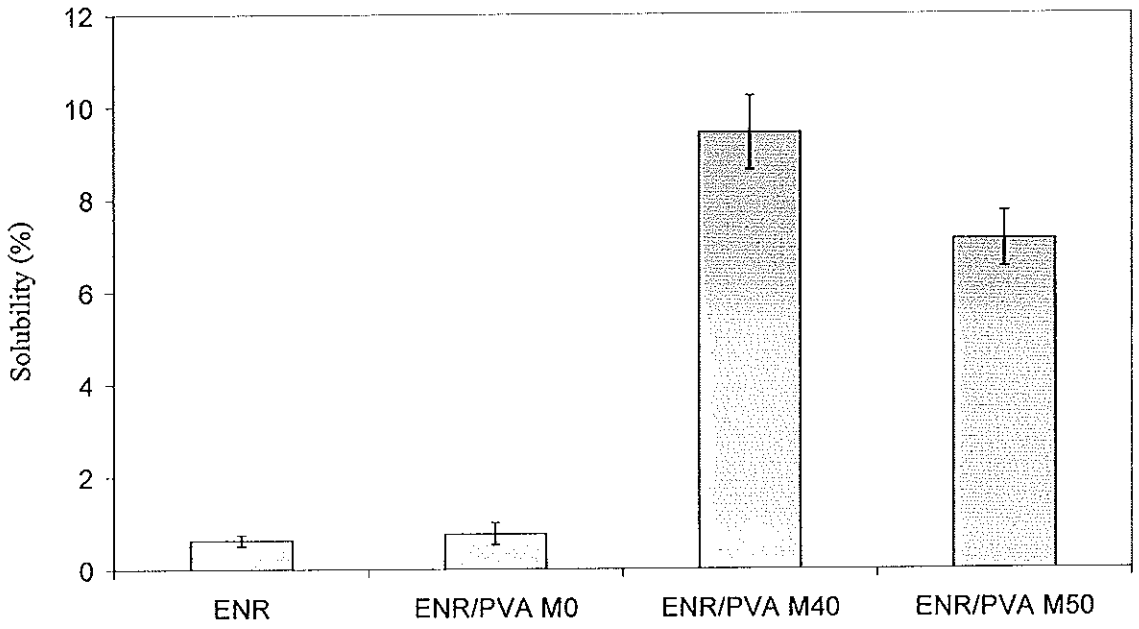
4.5.2.3 การบวมของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปร

ก. การบวมตัวในน้ำ

การบวมตัวในน้ำและความสามารถในการละลายน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.174 และรูปที่ 4.175 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต มีการบวมตัวในน้ำและความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตดังในหัวข้อ 4.4.2.1 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA สามารถเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้

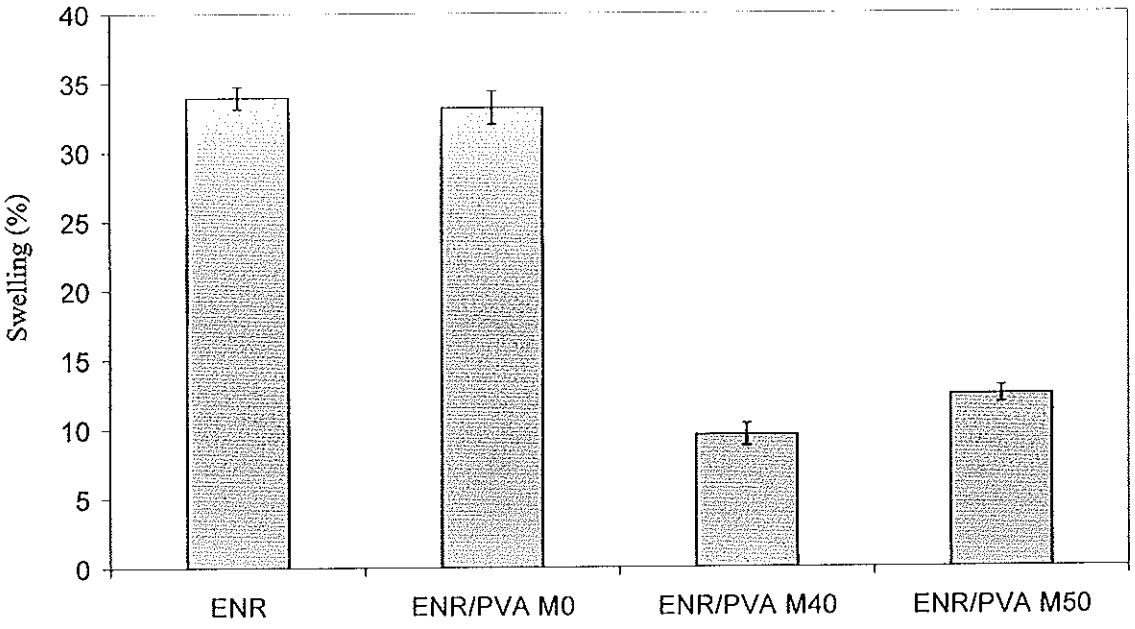


รูปที่ 4.174 การบวมตัวในน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

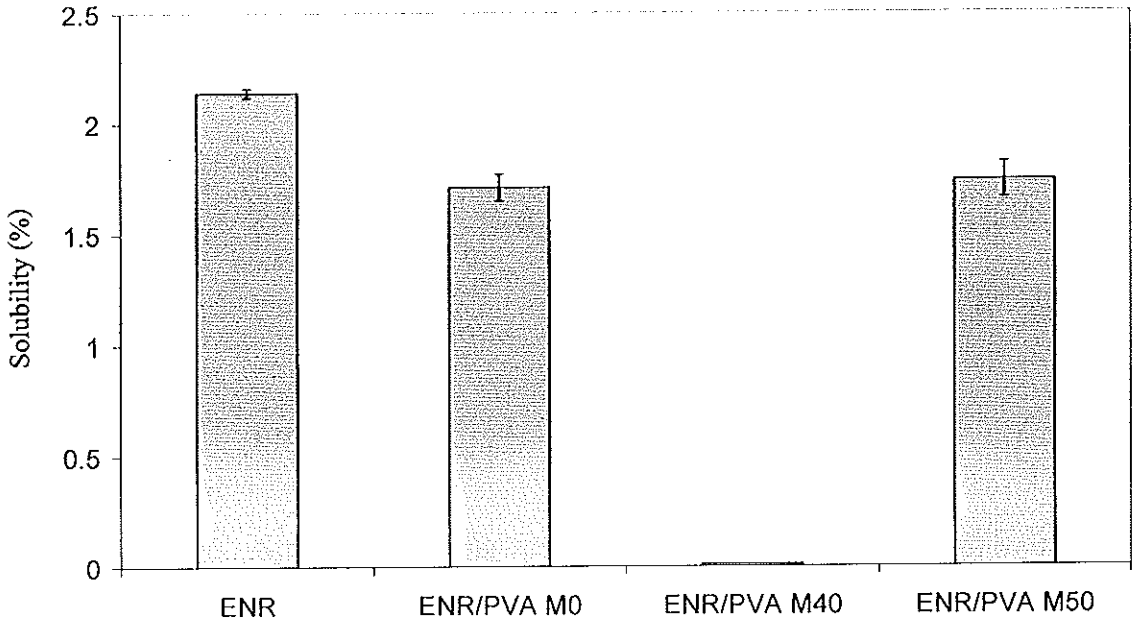


รูปที่ 4.175 ความสามารถในการละลายน้ำของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ข. การบวมตัวในโทลูอีน



รูปที่ 4.176 การบวมตัวในโทลูอีนของ ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50%หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



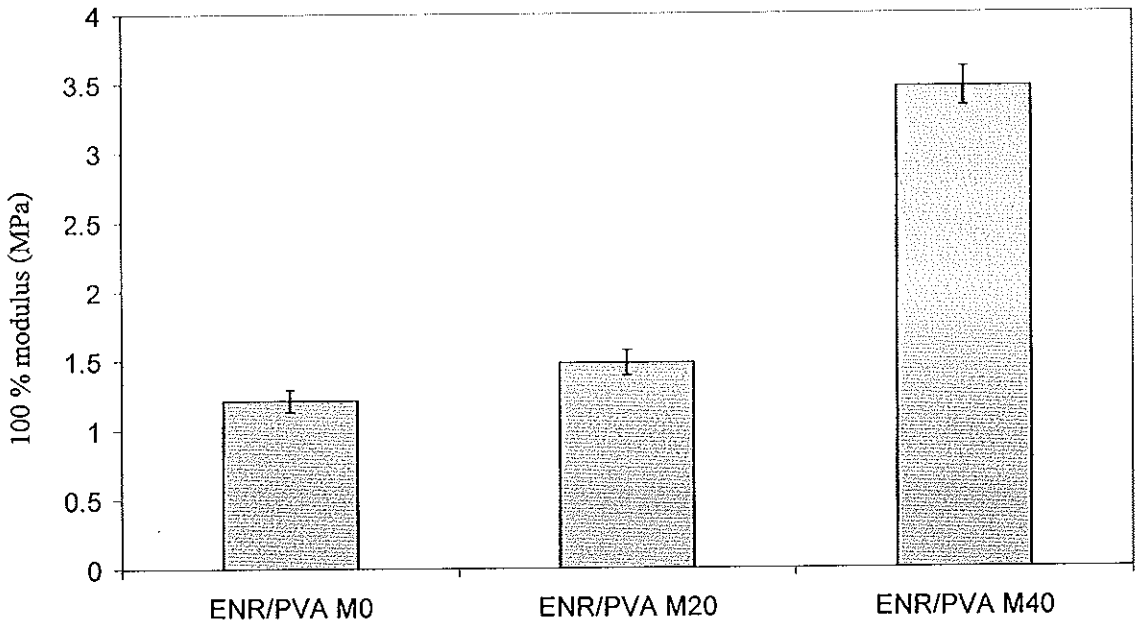
รูปที่ 4.177 ความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

การบวมตัวในโทลูอีนและความสามารถในการละลายโทลูอีนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 40 และ 50% หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.176 และรูปที่ 4.177 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต มีการบวมตัวในโทลูอีนและความสามารถในการละลายโทลูอีนที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังหัวข้อที่ 4.4.2.2 ซึ่งการละลายในโทลูอีนที่ลดลงแสดงถึงพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีความทนทานต่อโทลูอีนมากขึ้นหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมหลังการดัดแปร

ก. มอดุลัสที่ระยะยืด 100 %

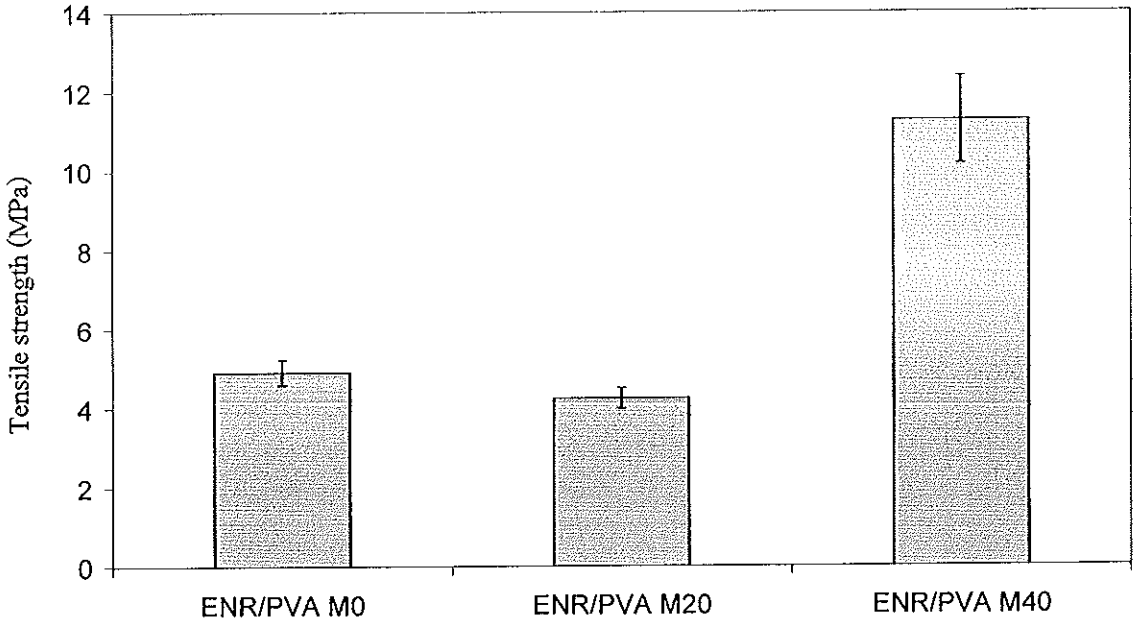
ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.178 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.178 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ข. ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

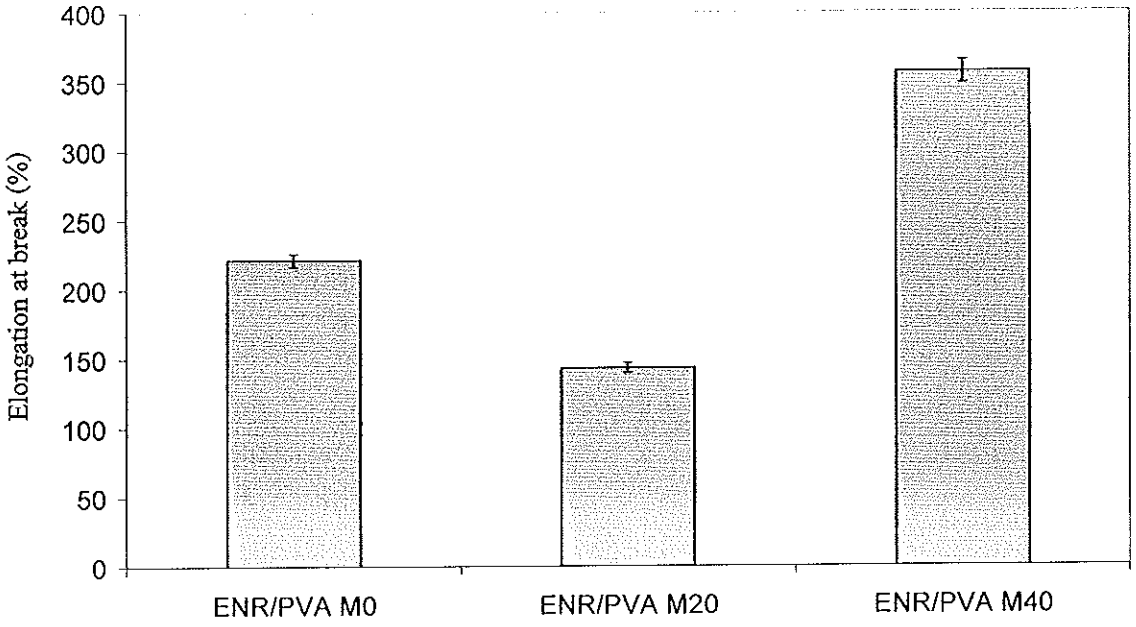
ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่4.179 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100%



รูปที่ 4.179 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

ค. สมบัติด้านความสามารถในการยืด

ค่าความสามารถในการยืด ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากรูปที่ 4.180 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40% มีค่าความสามารถในการยืดสูงที่สุดหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



รูปที่ 4.180 ค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

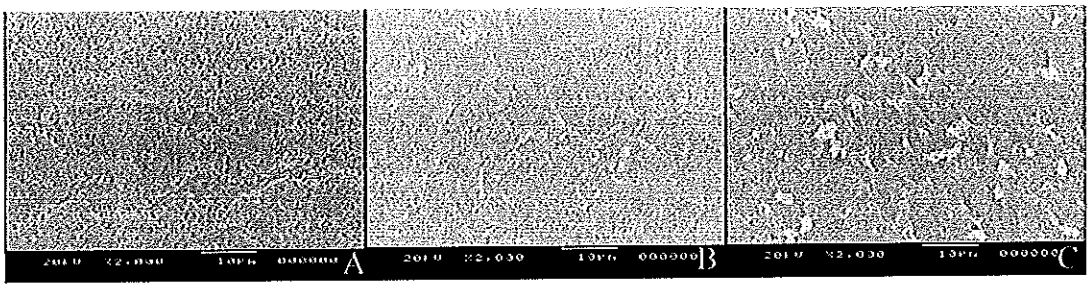
4.5.2.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต เพื่อเป็นการตรวจสอบความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองชนิด โดยในงานวิจัยครั้งนี้มีเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA อยู่ 2 วิธีคือ 1) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย และSEM 2) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย AFM โดยมีผลการทดลองจากเทคนิคต่างๆดังต่อไปนี้

4.5.2.5.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA โดยแปรปริมาณกรดมาลีอิคที่ใช้เป็น 0 20 และ 40% ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ทำการทดสอบเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน (ชิ้นตัวอย่างหลังจากการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีนมาอบแห้งก่อนนำมาตรวจดูลักษณะทางสัณฐานวิทยา) โดยใช้เครื่อง JSM JEOL 2000 ทำการทดสอบโดยการนำชิ้นตัวอย่างมาทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจน พื้นผิวที่ผ่านการทำให้แตกหักภายใต้สภาวะไนโตรเจนแล้วมาทำการเคลือบด้วยทองก่อนที่จะนำมาทดสอบ

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน ดังรูปที่ 4.181 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ไม่มีสารเชื่อมโยงหลังจากทดสอบการบวมตัวในโทลูอีนจะเห็นได้ว่ามีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่มีลักษณะที่เป็นรูพรุนเนื่องจากมีส่วนที่ถูกละลายด้วยโทลูอีน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางเป็น 20 และ 40 ตามลำดับ จะไม่พบลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เป็นรูพรุนอีก

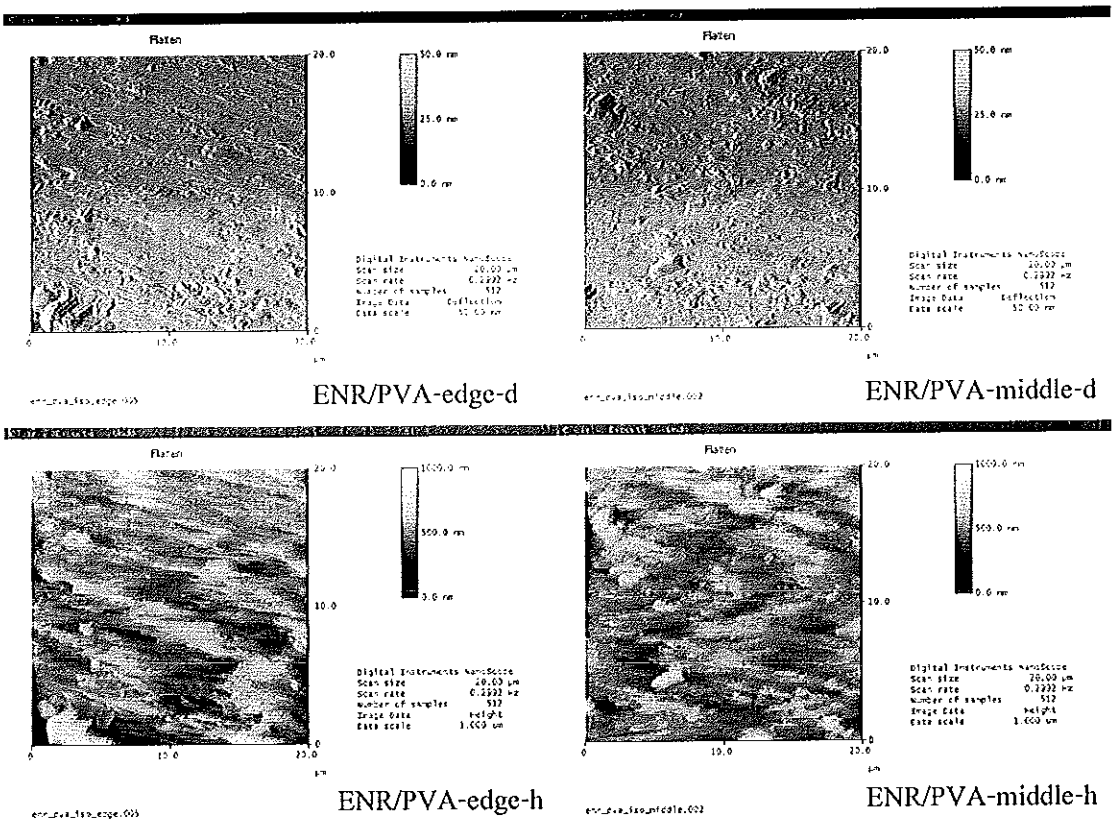


รูปที่ 4.181 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต หลังทดสอบการบวมตัวในโทลูอีน A) M0 B) M20 และ C) M40

4.5.2.5.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องอะตอมมิคฟอร์ซไมโครสโคป

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่อง AFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height ดังรูปที่ 4.182 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 มีเฟสที่แตกต่างกันกระจายอย่างสม่ำเสมอแสดงให้เห็นถึงพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดี

จากตารางที่ 4.22 แสดงค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่อง AFM พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตทำให้ค่าแรงยึดติดบริเวณผิวน้อยลง เป็นผลการทดลองที่สอดคล้องกันกับ ตารางที่ 4.19 กล่าวคือการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตทำให้ค่ายึดติดบริเวณผิวตัวอย่างต่ำกว่าภายในตัวอย่าง



รูปที่ 4.182 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจากเครื่องAFM ทดสอบแบบ deflection และแบบ height

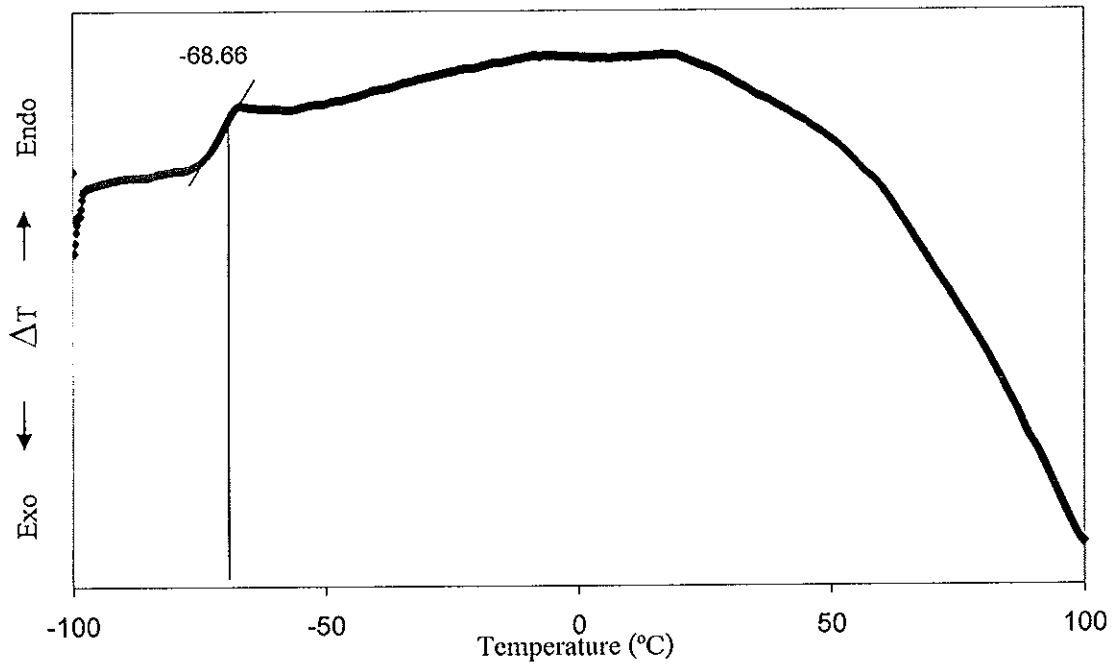
ตารางที่ 4.23 ค่าแรงยึดติดระหว่างเข็มกับผิวตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต จากเครื่อง AFM

Sample	Adhesion force (N.m)			
	1	2	3	Average
EDGE	19.05	19.62	20.11	19.59
MIDDLE	28.28	29.02	29.48	28.93

4.5.2.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนต เพื่อตรวจดูความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไอไอโซไซยาเนตคือ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.183 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตยังคงมีสมบัติของความเป็นยางอยู่เนื่องจากแสดงค่า T_g ที่ -68.66 $^{\circ}C$



รูปที่ 4.183 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.2.7 การวัดมุมสัมผัส

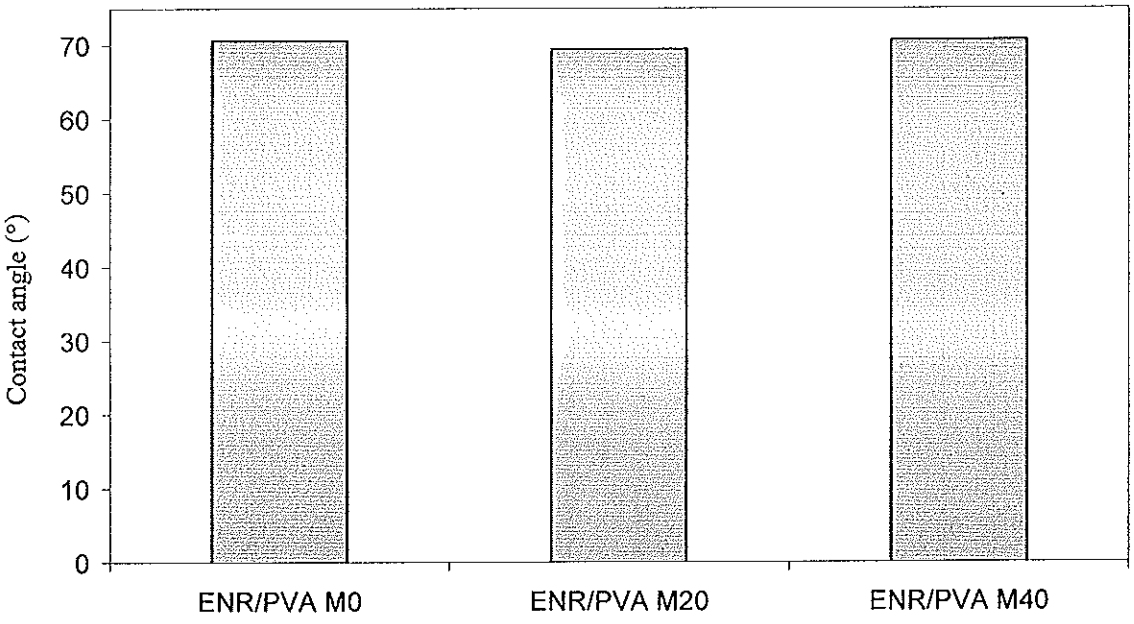
การทดสอบดังหัวข้อ 3.4.13 ทำการวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์ผสมกับหยดน้ำ เพื่อตรวจดูสมบัติทางด้านความชอบน้ำของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.184

ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.184 พบว่าพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตพบว่ามีค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้น (ค่ามุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ก่อนดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตดังหัวข้อ 4.4.6 มีค่า 47.96 53.93 และ 68.33 ตามลำดับ) เนื่องมาจากส่วนที่ชอบน้ำคือหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA เมื่อมีการทำปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจึงทำให้ความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ลดลง โดยที่ปริมาณสาร

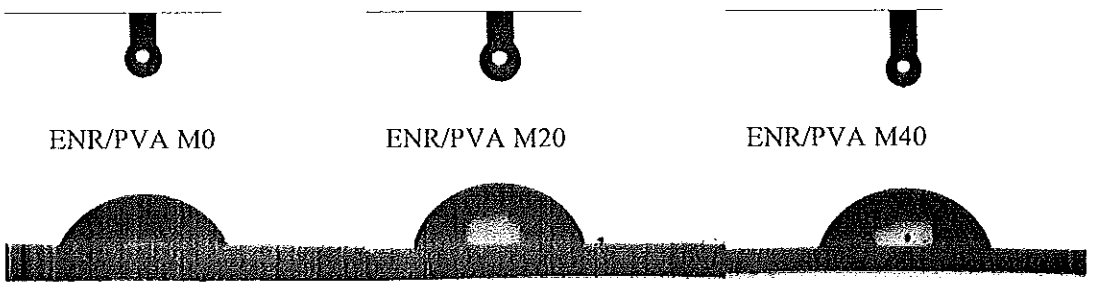
เชื่อมขวางต่าง ๆหลังจากการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต พบว่ามีความชอบน้ำที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.24 เปรียบเทียบมุมสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

Formula	Contact angle (°)
ENR/PVA M0	70.67
ENR/PVA M20	69.50
ENR/PVA M40	70.73



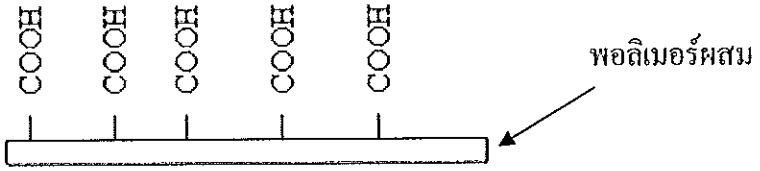
รูปที่ 4.184 เปรียบเทียบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



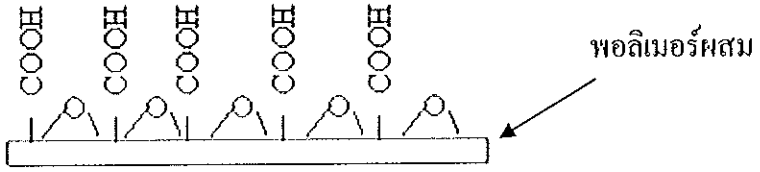
รูปที่ 4.185 ภาพที่ได้จากการทดสอบมุมสัมผัส ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 0 20 และ 40 ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

4.5.3 ยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิค

การกราฟต์แผ่นยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยกรดอะคริลิคซึ่งแผ่นยางที่เตรียมได้นี้จะมีประโยชน์คือเป็นการประยุกต์ทำให้ธรรมชาติมีขั้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลายหลายมากขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 4.144 ในงานวิจัยนี้จึงนำไปดัดแปรต่อด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.186 แผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่น NR-g-ACC



รูปที่ 4.187 แผนภาพแสดงแบบจำลองของแผ่น ENR-g-ACC

4.5.3.1 การเตรียมการดัดแปรแผ่นยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิค

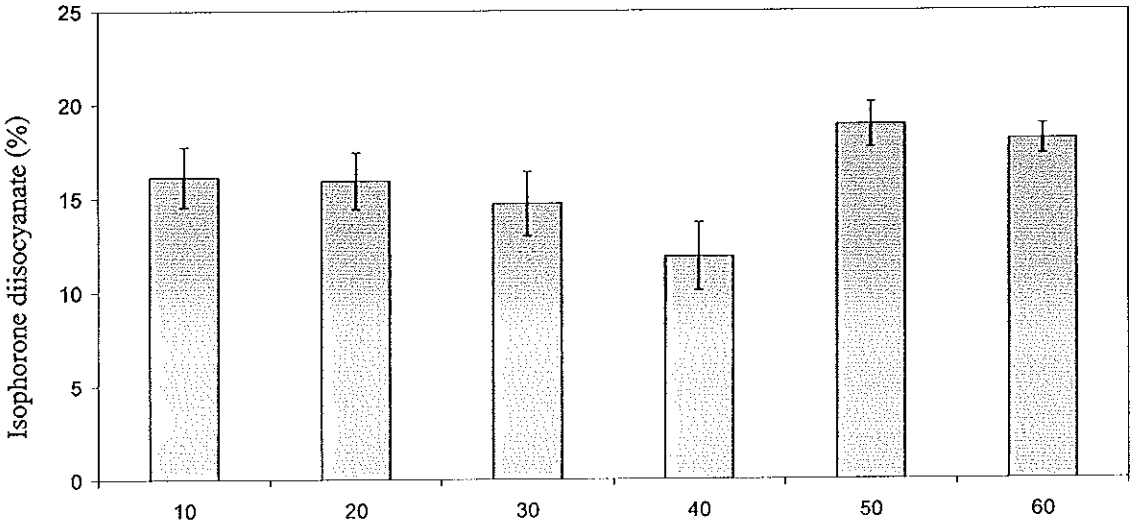
วิธีการดัดแปรแผ่นยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิค ทำเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.5.1.1 วิธีการดัดแปรแผ่นพอลิเมอร์ผสม NR/PVA ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ได้ดังรูปที่ 4.188 และตาราง 4.24

เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง NR และ ENR ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง NR-g-ACC และยาง ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ดังรูปที่ 4.188 และรูปที่ 4.189 พบว่า ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีเปอร์เซ็นต์การติดที่สูงกว่า NR-g-ACC โดยเปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตของแผ่นยาง ENR-g-ACC มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าการให้แสงยูวีนานขึ้นทำให้พื้นผิวของแผ่น

ยาง ENR เกิดหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วยทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตได้มาก

ตารางที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ

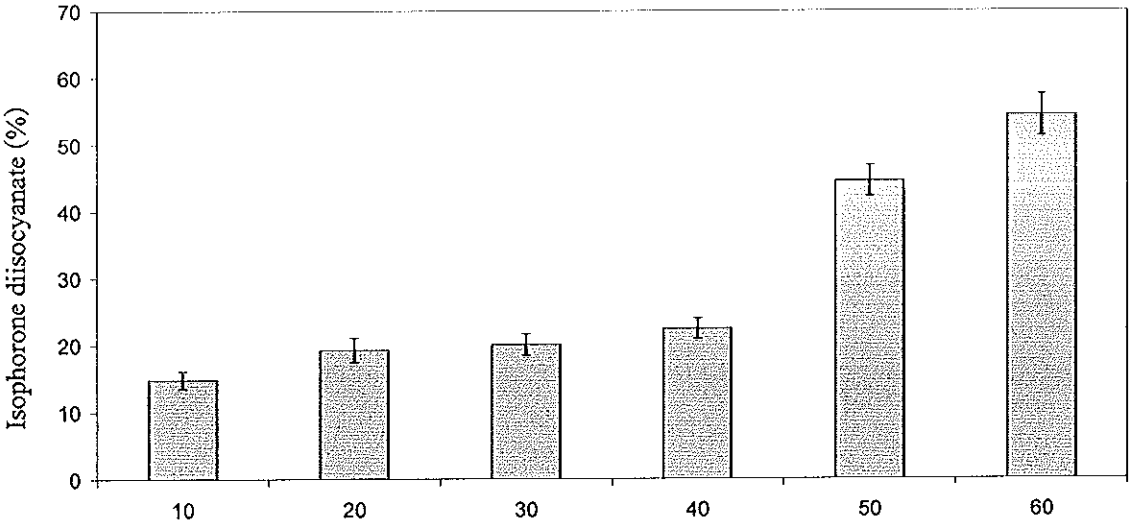
No.	Formula	Isophorone (%)
1	10 min	16.14
2	20 min	15.92
3	30 min	14.69
4	40 min	11.89
5	50 min	18.89
6	60 min	18.09



รูปที่ 4.188 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ

ตารางที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ

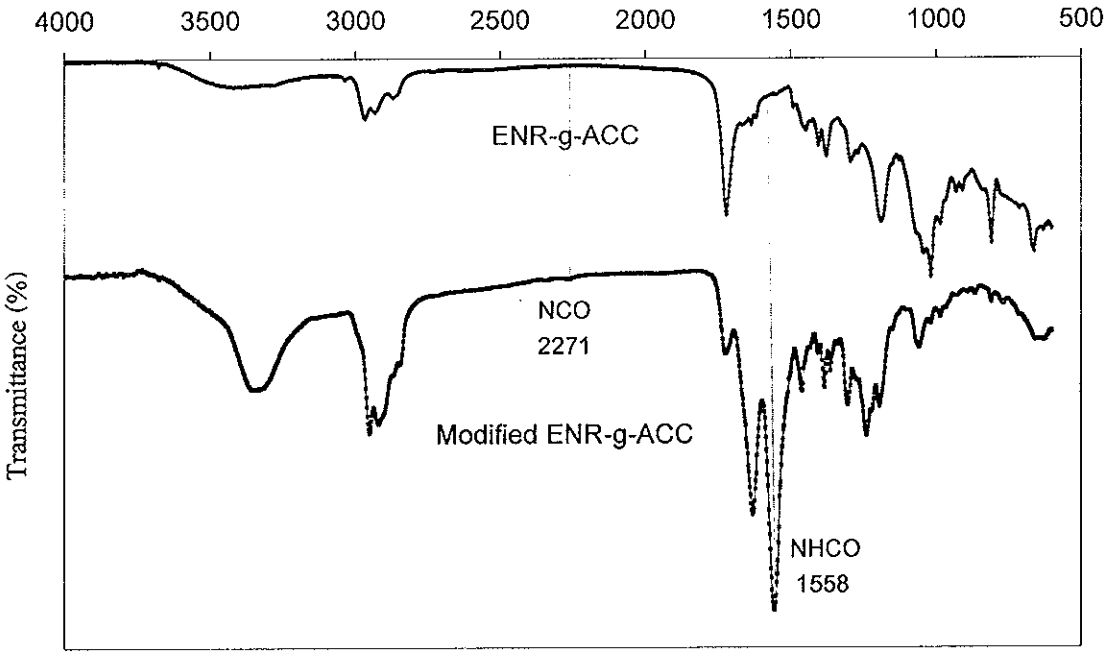
No.	Formula	% isophorone
1	10 min	14.82
2	20 min	19.26
3	30 min	20.07
4	40 min	22.44
5	50 min	44.56
6	60 min	54.35



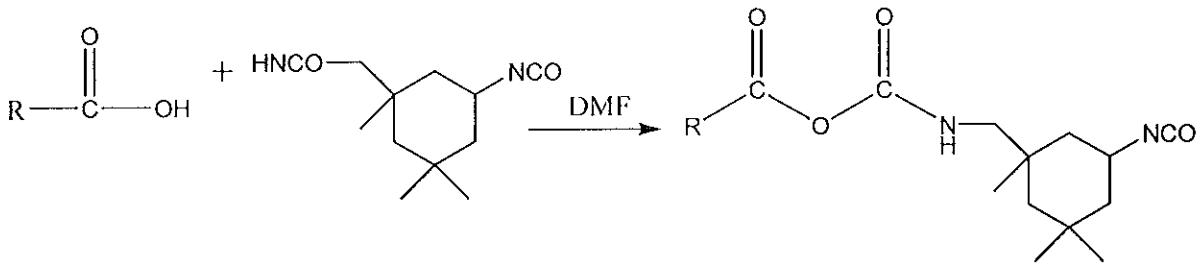
รูปที่ 4.189 เปอร์เซ็นต์การติดของไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตบนแผ่นยาง ENR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีต่าง ๆ

4.5.3.2 โครงสร้างทางเคมี

จากรูปที่4.190 สเปคตราอิฟราเรดของแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิคผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตจะแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2271 cm^{-1} ซึ่งเป็นของ NCO หลังจากที่ไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตเกิดปฏิกิริยาจะทำให้พีคตำแหน่งนี้ลดลง (F.Burel *et al.*, 2005) แต่จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1558 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ NHCO แทนซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง PVA กับไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต ซึ่งแสดงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.191



รูปที่ 4.190 โครงสร้างทางเคมีของแผ่นยางธรรมชาติอิพอกไซด์กราฟต์กรดอะคริลิคผ่านการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต



R = แผ่นยาง ENR-g-ACC

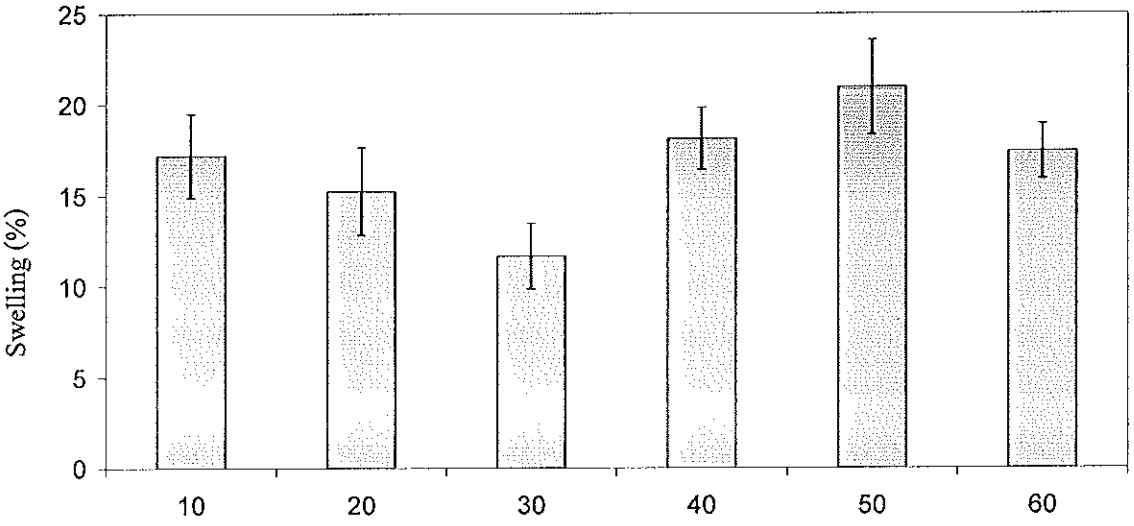
รูปที่ 4.191 ปฏิกิริยาระหว่างไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตกับกับแผ่นยาง ENR-g-ACC (T. Nabuurs *et al.*, 1999)

4.5.3.3 การบวมตัวของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนได ไอโซไซยาเนต

การทดสอบการบวมตัวของแผ่น NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต โดยทำการทดสอบการบวมตัวในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วันได้ผลการทดลองแสดงรูปที่ 4.192

จากรูปที่ 4.192 การบวมตัวในน้ำของแผ่นยาง NR-g-ACC ที่ระยะเวลาการให้รังสียูวีต่างๆหลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต พบว่าแผ่นยาง NR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีแนวโน้มการบวมตัวในน้ำที่ลดลงในช่วงแรกของการให้

แสงยูวี หลังจากระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 40 นาทีขึ้นไปแผ่นยาง NR-g-ACC จึงมีการบวมตัวในน้ำที่เพิ่มขึ้น สำหรับรูปที่ 4.193 การบวมตัวในน้ำของ ENR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตมีแนวโน้มการบวมตัวในน้ำที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการให้แสงยูวีจนถึงระยะเวลาการให้แสงยูวี 30 นาที หลังจากนั้นเมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวี 40 นาทีการบวมตัวในน้ำของแผ่นยาง ENR-g-ACC จึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวในน้ำระหว่างแผ่นยาง NR-g-ACC และแผ่นยาง ENR-g-ACC หลังดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตพบว่าแผ่นยาง ENR-g-ACC มีการบวมตัวในน้ำที่สูงกว่าแผ่นยาง NR-g-ACC สำหรับการทดสอบการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนของแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังการดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตไม่นำผลการทดลองมาแสดงเนื่องจากแผ่นยาง NR-g-ACC และ ENR-g-ACC หลังจากดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนตแล้วยังคงมีการบวมตัวและความสามารถในการละลายโทลูอีนในปริมาณมากทำให้ยากต่อการแปรผล



รูปที่ 4.192 การบวมตัวในน้ำของ NR-g-ACC ดัดแปรด้วยไอโซโฟโรนไดไอโซไซยาเนต

Li, Changfa Xiao, Shulin An, Xiaoyu Hu. 2010. Preparation and properties of PVDF/PVA hollow fiber membranes. Desalination. 250. 530–537.

Lutfor, S. Silong, W. Yunus, M. Zaki Ab Rahman,; M. Ahmad and M. Haron, Liu, H. Jen and Y. C. Chung, 1999. *J. Appl. Polym. Sci.*, 74, 2947.

Ilczyszyn, D. Godzisz, M.M. Ilcyzszyn. 2003. Sarcosine-maleic acid (1:1) crytal: structure, ^{13}C NMR and vbrational properties, protonation character Spectrochemical Acta Part A. 59, 1815-1828.

Majumdar and Adhikari. 2006. *Sensors and Actuators. B 114*, 747–755.

Mao, A.P. Zhu , Y.Z. Qiu, J. Shen, S.C. Lin. 2003. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 30, 299-306.

Maria D. Romero-Sanchez, Jose Miguel Marti n-Martinez. 2006. International Journal of Adhesion & Adhesives 26, 345–354.

Maria Dolores Landete-Ruiz, Jose´ Miguel Martin-Martiınez. 2005. International Journal of Adhesion & Adhesives 25, 139–145.

McIntyre, R. D. Davidson and J. R. Mycroft. 1996. *Surf. Interface Anal.*, 24, 591.

Michel, E. W. Werts and H. Georges. 1997. *Langmuir*, 13, 4939.

Mirabella. 1982. *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.*, 20, 2309.

Mishra. 1982. *J. Macromol. Sci. - Rev. Macromol. Chem.*, C 22, 409.

Mishra. 1991. S. Lenka and P. L. Nayak, *Eur. Polym. J.*, 27, 1319.

Mittal and J. R. Susko. 1991. Ed. *Metallized Plastics, Vol. 1, Fundamental and Applied Aspects*, Plenum Press, New York.

Nabuurs, D. Pears, A. Overbeek. 1999. Defect free coatings from two-pack isocyanate curable acrylic dispersions. Progress in Organic Coatings. 35, 129-140.

Nakason, A. Kaesaman, K. Eardrod. 2005. Cure and mechanical properties of natural rubber-g-poly(methyl methacrylate)–cassava starch compounds. Materials Letters. 59. 4020 – 40.

Neumann and R. J. Good. 1979. *Surface Colloid Sci.*, 11, 31.

NG and K. K. CHEE. 1997. SOLUBILITY PARAMETERS OF COPOLYMERS AS DETERMINED BY TURBIDIMETRY. Eur. Polym. J. Vol. 33, No. 5, pp. 149-152.

Oliveira. 2005. European Polymer Journal 41, 1883–1892.

Owens. 1975. *J. Appl. Polym. Sci.*, 19, 265.

Peng Wang, K.L. Tan, C.C. Hob, M.C. Khew, E.T. Kang. European Polymer Journal 36, 1323-1331.

Padmanabh , Karel D, Dong W, Mirka S, Pavla K, Jindrich K. 2006. Synthesis and characterization of novel aromatic azo bond-containing pH-sensitive and hydrolytically cleavable IPN hydrogels. Biomaterials. 27,1140–51.

Peng Wang, K.L. Tan, C.C. Hob, M.C. Khew, E.T. Kang. 2000. European Polymer Journal 36, 1323-1331.

Pireaux, M. Vermeersch, N. Degosserie, C. Gregoire, Y. Novis, M. Chtaib and R. Caudano. 1989. Springer Series in *Surface Science*, 17, 53.

Predeep, S. Najidha, R. Sreeja, N.S. Saxena. 2005. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 240, 850–854.

Rabelo, F. M. B. Coutinho, C.C. R. Barbosa and S. M. Rezende. 1995. *Polym. Bull.*, 34, 621.

Ranby and J.F. Rabek. 1975. *Photodegradation, Photo-oxidation and Photostabilization of Polymers.*, Chap1, Interscience, New York, p2.

Ranby. 1994. *Mater Res Innovations* 2, 64.

Razzak, Y. Tabata and K. Otsuhata. 2000. *Radiat. Phys. Chem.*, 42, 57 (1993). *J. Appl. Polym. Sci.*, 77, 784.

Ratner, T. Balisky and A. S. Hoffman. 1977. *J. Bioeng.*, 1, 115.

Riyajan, Suwit Chaiponban, Kridtiya Tanbumrung. 2009. Investigation of the preparation and physical properties of a novel semi-interpenetrating polymer network based on epoxised NR and PVA using maleic acid as the crosslinking agent. Chemical Engineering Journal, 153, 199–205.

Romand, M.Charbonnier, M. Alani and J. Baborowski, [Proc. Symp] Ed. K. L.

Sarmishtha Majumdar, Basudam Adhikari. 2006. Polyvinyl alcohol: A taste sensing material. Sensors and Actuators B 114. 747–755.

Sanguansap, Thonggoom, Tangboriboonrat. 2006. European Polymer Journal 42, 23.

Sawyer and D. T. Grubb, 1987. *Polymer Microscopy*, Chapman and Hall, London, 34–2342.

Shanmugharaj, Jin Kuk Kim, Sung Hun Ryu. 2006. Applied Surface Science 252, 5714–5722.

Spell and C. P. Christenson. 1979. *TAPPI*, 62, 77.

Sruanganurak, Sanguansap and Tangboriboonrat. 2006. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 289, 110–117.

Stradal and D. A. I. Goring. 1976. *Polym. Eng. Sci.*, 8, 57.

Stradal and D. A. I. Goring, 1977. *Polym. Eng. Sci.*, 17, 38.

Strobel, C. Dunatov, J. M. Strobel, C. S. Lyons, S. J. Perron and M. C. Morgen, 1989. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 3, 321.

Sutherland, D.W.Brewis, R. J. Heath and E. Sheng, 1991. *Surface Interface Anal.* 17, 507.

Takayanagi and T. Kayatose, 1983. *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed.*, 21, 31.

Takayuki Saito, Warunee Klinklai, 2007. Seiichi Kawahara Characterization of epoxidized natural rubber by 2D NMR spectroscopy Polymer 48, 750-757.

Tariq Aziza, Mark Watersa, Robert Jagger. 2003. Journal of Dentistry 31, 213–216.

Toth, T. Bell, I. Bertoti, M. Mohai and B. Zelei, 1999. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. Sect. B.*, 148, 1131.

Tsubokawa and A. Naitoh. 1999. *Shikizai Kyokaishi*, 72, 475.

Urban, 1996. *Attenuated Total Reflectance Spectroscopy of Polymers: Polymer Surfaces and Interfaces Series*, ACS, Washington DC.

Vilas , Sachin R. 2000. Transparent semi- and full-IPNs based on uralkylpolymethyl methacrylate. Phys Chem, 2, 1249–54.

Vladimir . Nikolic, Aleksandra Krkljes b, Zorica Kacarevic Popovic,Zoran V. Lausevic b, Scepan S. Miljanic. 2007. On the use of gamma irradiation crosslinked PVA membranes in hydrogen fuel cells. Electrochemistry Communications. 9. 2661–2665.

Ynag, X. R. Ynag, D. F. Evans, W. A. Hendrickson and J. Baker., 1990. *J. Phys. Chem.* 94, 6123.

Williamsa, D.J. Wilson, N.P. Rhodes, 2004. Biomaterials, 25, 4659–4673.

Yong, Kinam P., 2003. Superporous IPN hydrogels having enhanced mechanical properties. AAPS Pharm Sci Tech; 4:406–12.

Yu, Zongqiang Zeng, Guang Lu, Qifang Wang. 2008. Processing characteristics and thermal stabilities of gel and sol of epoxidized natural rubber. European Polymer Journal. 44. 453–464.

Zang, D. H. Gracias, R. Ward, M. Gauckler, Y. Tian, Y. R. Shen and G. A. Somorjai, 1998. *J. Phys. Chem.*, B 102, 6225.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

1. การคำนวณสารเคมีในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นของสารเคมีต่างๆ

Chemicals	ความเข้มข้น
Latex (Mol. Repeating unit of NR)	1.7
Formic acid (M)	0.9
Hydrogen peroxide (M)	2.6
10% w/w Terric 16A (g/l)	13
Reaction DRC (%)	20

เตรียมขนาด 1 ลิตร

❖ น้ำหนักแห้งของน้ำยาง (Latex dry weight) = 1.7 mol/l × 68 g/mol × 11

= 115.6 g

เจือจางน้ำยางเป็น 20% DRC

มีเนื้อยาง 20 g ในน้ำยาง 100 g

ถ้ามีเนื้อยาง 115.6 g ต้องใช้น้ำยาง $\frac{100 \times 115.6}{20}$ g = 578 g

=628.26 ml

แต่น้ำยางที่ใช้มี DRC 60%

$C_1V_1 = C_2V_2$

$60 \times V_1 = 20 \times 628.26$

$V_1 = 192.67$ g

เพราะฉะนั้น ชั่งน้ำยาง 60% DRC มา 192.67 g มาเจือจางด้วยน้ำ 385.33 g

❖ Hydrogen peroxide (%) = 2.6 mol/l × 34 g/mol × 11

= 88.4 g

Hydrogen peroxide 50 g .สารละลาย 100 g

ต้องการ Hydrogen peroxide 88.4 g ต้องใช้ $\frac{100 \times 88.4 \text{ g}}{50}$ = 176.8 g

เพราะฉะนั้นชั่ง Hydrogen peroxide เท่ากับ 176.8 g

❖ Formic acid (94%) = 0.9 mol/l × 46 g/mol × 11

= 41.4 g

Formic acid 94 g ในสารละลาย 100 g

ต้องการ Formic acid 41.4 g ต้องใช้ $\frac{100 \times 41.4 \text{ g}}{94}$ = 44.04 g

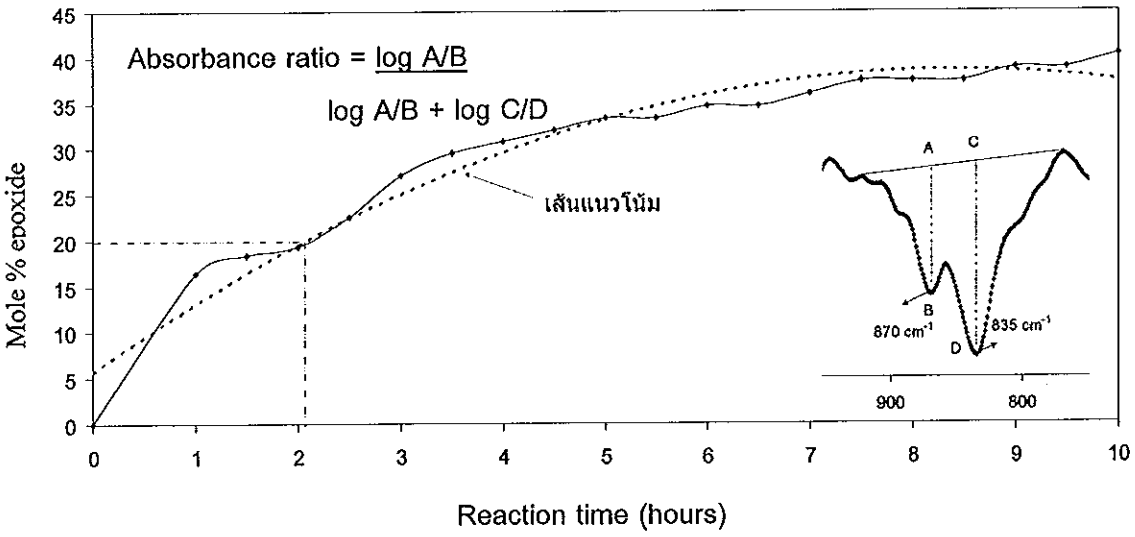
เพราะฉะนั้นชั่ง Formic acid เท่ากับ 44.04 g

2. การคำนวณหาปริมาณหมู่อิพอกไซด์

คำนวณอัตราส่วนการดูดกลืนของแถบดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} ต่อแถบดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1}

คำนวณหาอัตราส่วนการดูดกลืนจากสมการ (Davey and Loadman, 1984)

$$Ar = \frac{a_{870}}{a_{870} + a_{835}}$$



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหมู่อิพอกซิเดชันกับเวลาการทำปฏิกิริยา (สุวิทย์, 2548)

สามารถคำนวณหา %epoxide จากสมการ $y = 123.28x^2 + 5.5384 - 1.537$ (Davey and Loadman 1984)

y = mol % epoxide

x = Absorbance ratio

3. การคำนวณการผสม

- การคำนวณการผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 %wt

- น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงมีความเข้มข้นของเนื้อยางเท่ากับ 60% ดังนั้นจึงสามารถใช้น้ำยาง 100 g และใช้ PVA 40 g จะได้อัตราส่วน 60/40 %wt

- ในขั้นตอนการผสม ไม่สามารถทำการผสมน้ำยางธรรมชาติกับ PVA ได้โดยตรงเพราะเกิดการจับตัวจึงทำการเจือจางน้ำยางธรรมชาติและ PVA ให้มีความเข้มข้นเท่ากันที่ 20% ก่อนการผสม สามารถคำนวณได้ดังนี้

- ปริมาตรของน้ำยาง 100 g เท่ากับ 100/0.92 = 108.69 mL

จาก $M_1V_1 = M_2V_2$

$(60)(108.69) = (20)\ V_2$

$V_2 = 326.09$ mL

∴ เติมน้ำในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง 326.09 – 108.69 = 217.39 mL

- ต้องการเจือจาง PVA 40 กรัม ให้มีความเข้มข้น 20%

∴ เติมน้ำใน PVA เท่ากับ 200 mL

- การคำนวณปริมาณกรดมาลีอิคที่ใช้ 40% ของ PVA

- การผสม NR/PVA ที่อัตราส่วน 60/40 %wt ใช้ PVA เท่ากับ 40 g

- ปริมาณกรดมาลีอิคที่ใช้เท่ากับ $\frac{40 \times 40}{100}$ = 16 g

- ต้องการเจือจางกรดมาลีอิค 16 g ให้มีความเข้มข้น 20%

∴ เติมน้ำในกรดมาลีอิค 80 mL

4. ตรวจสอบปริมาณกรดมาลีอิคที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาโดยเครื่องยูวี

โดยการตัดแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และยางธรรมชาติผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขนาด 1 × 2 ซม. มาต้มในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อสกัดส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกรดมาลีอิคที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไป

ตารางที่ ก.2 น้ำหนักของแผ่น NR/PVA M40 และ ENR/PVA M40 ก่อนและหลังต้มในน้ำร้อน

สูตร	นน.เริ่มต้น (g)	นน.หลังอบ (g)	ส่วนที่ละลาย (g)	ส่วนของสารละลาย (g)
ENR/PVA M40	0.6900	0.6771	0.0129	56.68
NR/PVA M40	0.7400	0.6943	0.0457	33.36

การทดลองหาปริมาณกรดมาลีอิคที่ละลายโดยใช้เครื่องยูวี ทำได้โดยการเตรียมสารละลายของกรดมาลีอิคเพื่อหา λ max โดยเตรียมได้ดังนี้

- เตรียมมาลีอิคให้มีความเข้มข้น 1000 ppm เมื่อใช้ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 ลิตร จะต้องชั่งกรดมาลีอิค เท่ากับ 1000 ×1000/ 10^6 = 1 กรัม
- จึงทำการชั่งกรดมาลีอิคมา 1 กรัม เติมน้ำกลั่นให้ขวดวัดปริมาตรครบ 1000 mL
- เจือจางกรดมาลีอิค 1000 ppm ให้มีความเข้มข้น 2.5, 5, 7.5 และ 10 ppm เพื่อให้ ABS มีความถูกต้องมากที่สุด

ตารางที่ ก.3 ค่า ABS ที่ความเข้มข้นของกรดมาลีอิคต่าง ๆ

ความเข้มข้นของกรดมาลีอิค (ppm)	ABS
0.00	0
2.50	0.330
5.00	0.658
7.50	0.877
10.00	1.321

ความถูกต้องเท่ากับ 99.13 % λ max ที่ความเข้มข้น 10.00 ppm เท่ากับ 211.5

การคำนวณน้ำหนักของกรดมาลีอิคที่วัดได้จากเครื่องยูวี

- สารละลายของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 10^6 กรัม มีกรดมาลีอิคที่ละลายอยู่ 2.0922 กรัม
- สารละลายของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 250 mL จะมีปริมาณกรดมาลีอิคที่ละลายเท่ากับ 2.0922 × 250 /10^6 = 0.000523 กรัม
- ถ้าปริมาณของสารละลายพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 ทั้งหมดคือ 56.68 mL จะได้ส่วนของกรดมาลีอิคที่ละลายซึ่งวัดได้จากเครื่องยูวีเท่ากับ 56.68 × 0.000523
- เท่ากับ 0.0296

ตารางที่ ก.4 ปริมาณกรดมาลีอิคที่ละลายจากการตรวจสอบด้วยเครื่องยูวี

สูตร	นน.กรดมาลีอิค ตามทฤษฎี (g)	นน.กรดมาลีอิคที่วัดโดยเครื่องยูวี (ppm)	นน.กรดมาลีอิคที่วัดโดยเครื่องยูวี (g)	กรดมาลีอิคที่ละลาย (%)
ENR/PVA M40	0.1129	2.0922	0.0296	26.27
NR/PVA M40	0.1157	3.214	0.0268	23.16

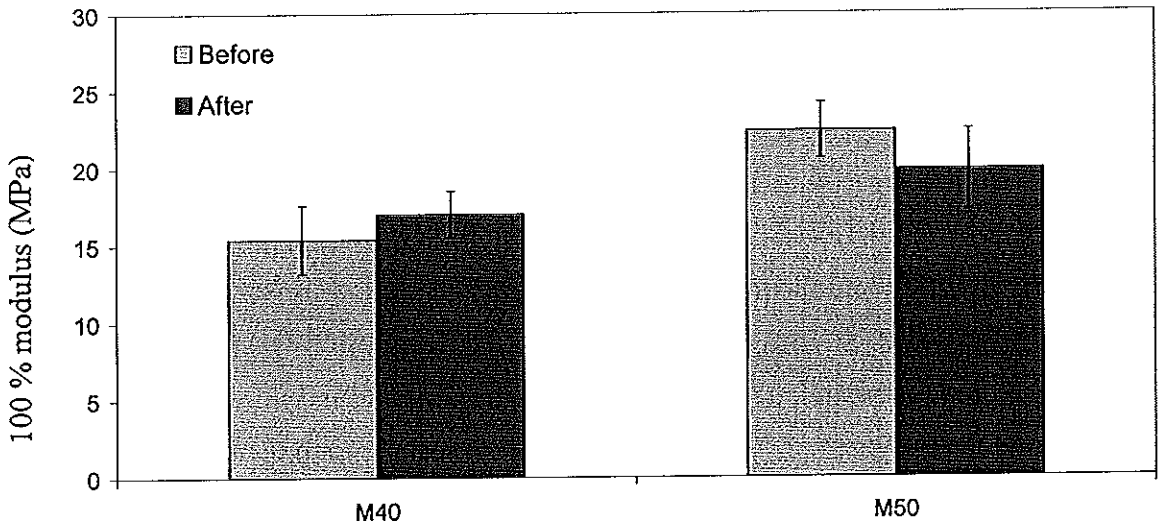
จากผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณกรดมาลีอิคที่ละลายโดยการใช้เครื่องยูวี ของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA M40 และ NR/PVA M40 เท่ากับ 26.27 และ 23.16 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และเพื่อเป็นการยืนยันว่ามีส่วนของกรดมาลิคที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมให้เป็นแบบ IPN

5.ผลการล้างกรดต่อสมบัติเชิงกล

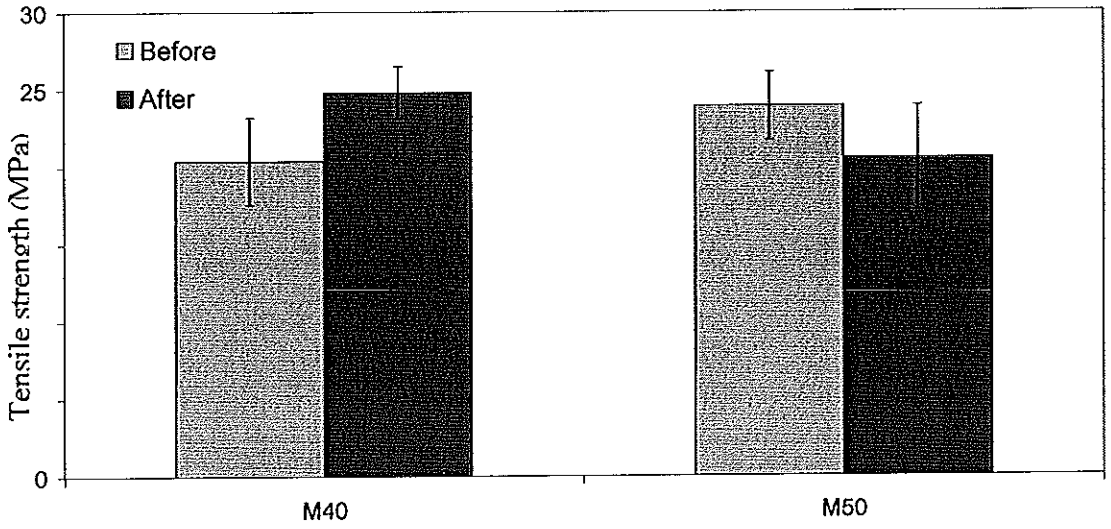
ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40 และ 50 % โดยน้ำหนักของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการนำมาต้มที่ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (เพื่อกำจัดกรดที่มาจากการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์และส่วนของกรดมาลีอิคและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกไป) และนำไปอบที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วันเพื่อให้แห้ง ผลการล้างกรดต่อสมบัติเชิงกลสามารถแสดงได้ในตารางที่ ก.5 และกราฟที่ ก.2-ก.4

ตารางที่ ก.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ที่ปริมาณกรดมาลีอิค 40 และ 50 %

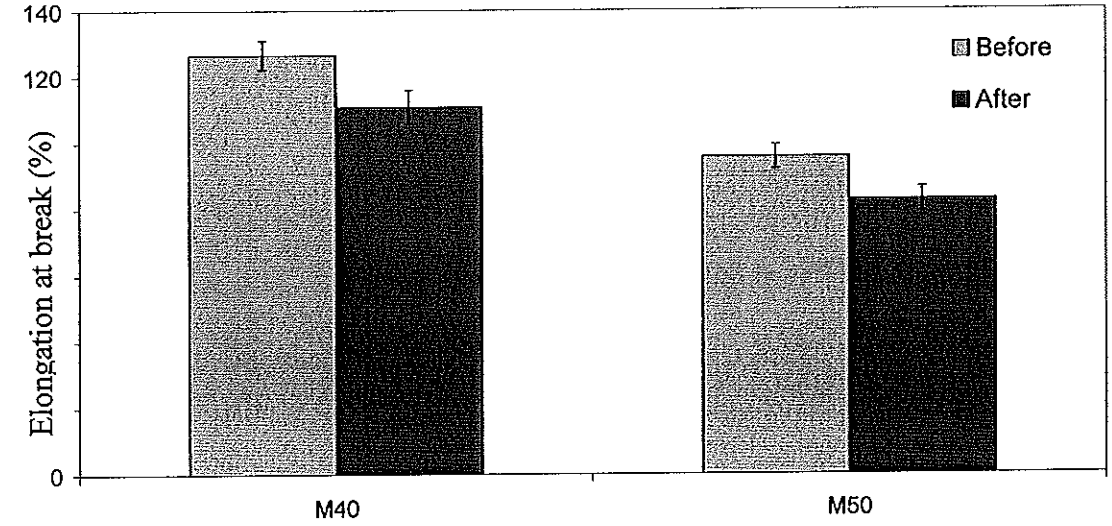
	100 % modulus		Tensile strength		Elongation at break (%)	
สูตร	ก่อนล้าง	หลังล้าง	TS B	TS A	EB B	EB A
M40	15.4	17.02	20.39	24.8	126.53	110.8
M50	22.37	19.84	23.89	20.53	95.63	82.67



รูปที่ ก.2 ค่า 100 % มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังล้างกรด



รูปที่ ก.3 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังล้างกรด



รูปที่ ก.4 ค่าความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ผสม ENR/PVA ก่อนและหลังล้างกรด

จากผลการทดลองการล้างกรด เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลทั้ง ค่า 100 % มอดุลัส ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดกับก่อนล้างกรดพบว่าค่าไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก โดยสมบัติเชิงกลต่างๆหลังจากการล้างกรดจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากกรดและบางส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่เกิดการเชื่อมขวางถูกชะล้างออกไป

ภาคผนวก ข

เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Chemical Engineering Journal 153 (2009) 199–205

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Engineering Journal

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cej

nvestigation of the preparation and physical properties of a novel ;emi-interpenetrating polymer network based on epoxised NR ınd PVA using maleic acid as the crosslinking agent

;a-Ad Riyajan*, Suwit Chaiponban, Kridtiya Tanbumrung

epartment of Polymer Science and Bioplastic Unit, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, ɔngkhla 90112, Thailand

. R T I C L E I N F O

rticle history:
eceived 12 March 2009
eceived in revised form 26 May 2009
ccepted 28 May 2009

eywords:
latural rubber
NR
oly(vinyl alcohol)
emi-interpenetrating polymer network
Maleic acid
'rosslinking

A B S T R A C T

Natural rubber (NR) and its derivatives as renewable and biodegradable materials have attracted considerable attention because of the serious pollution problems caused by synthetic materials and a shortage of resources. A new semi-interpenetrating polymer network (semi-IPN) based on epoxidised natural rubber and polyvinyl alcohol containing maleic acid as a crosslinking reagent was synthesized and characterized by FTIR, XRD, SEM, swelling ratio in both distilled water and toluene, and mechanical properties. The curing time and dose of maleic acid were varied from 10 to 60 min, and from 10 to 60% (w/w), respectively. An IR spectroscopic study indicated the presence of an ester linkage at 1730 cm^{-1} in maleic acid crosslinked with PVA in semi-IPN films. In addition, the crystalline content of PVA dramatically decreased after adding maleic acid in the semi-IPN, as observed from its XRD. The semi-IPNs exhibit good mechanical properties, thermal stability, characteristics of a polyvinyl alcohol–maleic acid polymer network. An SEM of the semi-IPNs containing maleic acid showed no phase separation, when compared with the sample prepared in the absence of maleic acid.

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

. Introduction

Medical products made from elastomer materials especially natıral rubber (NR) latex have found extensive applications such as n tubings, surgical gloves, catheters, balloons and other prodıcts [1–4]. The advantages of NR products are their elasticity, lexibility and resistance against splitting [5]. But their disad-'antages are their low resistance to thermal degradation due to ts structure containing unsaturated units, their poor resistance o ozone, their resistance to organic solvents and being biologi-:ally incompatible to humans. It will be essential to modify NR ɔolymers in order to improve their properties [5–8]. Three main ıpproaches can be used to modify the properties of NR polymers. Chese include changes to its chemical microstructure, addition ɔf different material reagents and blending with other polymers 9–14]. Blending with other polymers is an interesting method ɔecause it can be an easy, cheap and economical method and :an produce new materials with novel properties [12–14]. The ɔlending of two or more polymers often yields a polymer with ıovel properties that cannot be achieved from any of the individual components. In previous work, NR has been blended with many polymers such as polypropylene (PP), polyethylene (PE), polyvinyl alcohol (PVA), nitrile rubber (NBR), ethylene–propylene copolymer (EPM), ethylene–propylene–diene terpolymer (EPDM) and epoxidized natural rubber (ENR) [9,13,14]. In addition, the semi-interpenetrating polymer network is one polymer blend obtained through a chemical reaction with a curing reagent. There have been literature reviews [15–22] on the properties of semi-IPN polymers based on NR mixed with different polymers such as polystyrene, polyamide and methyl methacrylate. The advantages of IPNs are more solvent resistance compared to the individual polymers and their ability to creep and flow compared to the individual polymers. For example, Mathew and Thomas [23] studied the mechanical, thermal, viscoelastic and transport properties of a series of semi and full interpenetrating polymer networks produced from NR and polystyrene (PS). The results showed that the izod impact strength of the IPNs depended on the effect of the crosslinking level of PS and blend ratio. Jayasuriya and Hourston [24] studied the IPN from NR and poly(methyl methacrylate). They found that the blends when observed by DMTA were phase-separated. The glass transition temperature of the NR component in the IPN sample was shifted to a higher temperature compared to the NR alone when tested under the same conditions. This indicated a limited amount of mixing of the components in these samples. Incorpo-

* Corresponding author. Tel.: +66 74 446925; fax: +66 74 446925.
E-mail address: saadriyajan@hotmail.com (S.-A. Riyajan).

385-8947/$ – see front matter © 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/j.cej.2009.05.043

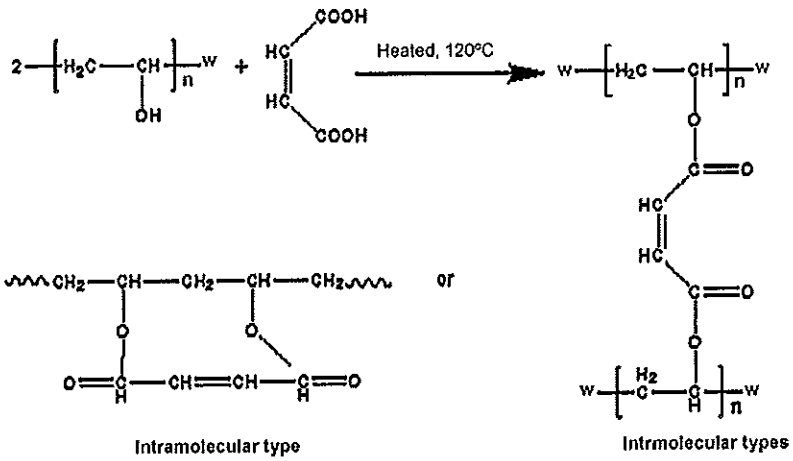


Fig. 1. Schematic representation of the possible reactions between PVA and maleic acids.

on of PMMA into the NR phase increased the strength of the sample. Jia et al. [25] reported the preparation of polyether-ed polyurethane/poly(methyl methacrylate-co-ethyleneglycol ethacrylate) interpenetrating polymer networks [PU/P(MMA-EGDMA)-IPNs] for adhesives to adhere to vulcanized natural ber (NR) and soft poly(vinyl chloride) (PVC). The structures morphology of these IPN adhesives in bulk and near the esive/substrate interfaces were described. However, the syn-sis of the semi-interpenetrating polymer network based on xised NR (ENR) and poly(vinyl alcohol) (PVA) using maleic acid he crosslinking agent have not been found in the literature ews. ENR is a derivative of NR modified by epoxidation of its 1,4-polyisoprene units. ENR has a higher glass transition tem-ature than the unmodified *cis*-1,4-polyisoprene units, and has ncreased polarity of the system while retaining the inherent n strength of NR [14]. In one paper, ENR PVA was produced by nding poly(vinyl alcohol) and latex using an aqueous solution nd method and maleic acid as the curing reagent. PVA is a poly-r that is easily prepared, it has good biodegradability, and has n used for many applications such as medical devices, mem-nes and gloves [17], home textiles, coating materials and for d packaging and other products due to its excellent high chem-resistance, good mechanical behavior and ability to form films]. Since ENR contains epoxy groups that can be converted to roxyl groups, it is potentially partially miscible with PVA due to formation of hydrogen bonding. Maleic acid or (*Z*)-butenedioic l or *cis*-butenedioic acid is an organic dicarboxylic acid [26] ecule consisting of an ethylene group flanked by two carboxylic l groups. Possible reactions between PVA and maleic acid are sented in Fig. 1.

To the best of our knowledge, this is the first study of its d wherein the semi-interpenetrating polymer network has been ed on biodegradable polymers prepared from natural rubber poly(vinyl alcohol). In this present work, the preparation of a i-IPN from ENR/PVA sheet used maleic acid as a crosslinker. The was to increase the surface hydrophylicity of NR for use as a new rophilic surface. From swelling studies of the crosslinked semi-NR/PVA and ENR/PVA sheet, we have evaluated the optimum tent of maleic acid as well as the best curing times. Crosslink-of the semi-IPN ENR/PVA sheet with addition of maleic acid was mined with the help of ATR-FTIR spectroscopy. In order to deter-ne the mechanical properties of the semi-IPN ENR/PVA sheet used a tensometer. The morphological analysis of the semi-IPN i-IPN ENR/PVA sheet was studied through scanning electron roscopy.

2. Materials and methods

2.1. Materials

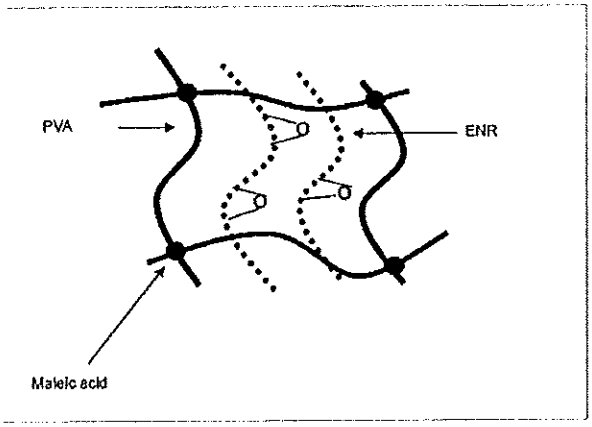
High ammonia NR (HA-NR) (Chalong Latex Industry Co. Ltd.), hydrogen peroxide (Riede-de Haen Co. Ltd., Germany), formic acid (Riede-de Haen Co. Ltd., Germany), poly(vinyl alcohol) (PVA, commercials grades) with 87% hydrolysis, Terric 16A-16 (Lucky four), maleic acid (MA, Fluka Co. Ltd., Switzerland). 200 g of HA-NR latex containing 20% dry rubber content (DRC) was blended with 10 g of 10% Terric acid as a non-ionic surfactant at ambient temperature while stirring for 1 h. The sample mixture was neutralized, then acidified with 12 g of formic acid (Fluka Co. Ltd., Switzerland). After that, 80 ml of hydrogen peroxide (BHD, Analar) was added at 30 °C within 10–15 min. The epoxidation process was carried out at 70 °C for 5 h and the resulting ENR latex possessing a 20% of epoxided content was used in this paper.

2.2. Preparation of semi-IPN based on ENR and PVA

The PVA solution (20% w/v) was prepared in Millipore water by heating it on a water bath at 70 °C while being continuously stirred. The 50 g of PVA solution was blended with 50 g of epoxided natural rubber latex at ambient temperature while using a mechanical stirrer. Then, the desired quantity of maleic acid (dose varied from 10 to 60% (w/w) with respect to the weight of PVA) was mixed with the mixture solution at ambient temperature with the help of a mechanical stirrer. The mixture was poured in the form of a sheet on a glass surface. The sheet with a 0.55-mm thickness was dried at ambient temperature and subsequently cured in an oven for different curing times (e.g., 60 min) at 120 °C.

2.3. Analysis of semi-IPN

The semi-IPN sample was characterized by attenuated total reflection mode Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) Equimox 55, Bruker spectrophotometer, scanned 100 times at 4000–650 cm^{-1}). X-ray diffractometry was performed on an X'Pert MPD, Philips X-ray diffractometer under the following conditions: Nickel filtered Cu Kα radiation ($\lambda = 0.15406$ nm) at a current of 25 mA and a voltage of 35 kV. The scanning rate was 4°/min in the angle range of 3–28° and 5–50° (2θ). Semi-IPN samples of specific dimensions (2.5 cm × 2.5 cm) and with an average thickness of 0.5 mm were weighed and immersed in Millipore water for a period of 5 days at 32 °C. The samples were then dried in an oven at 50 °C



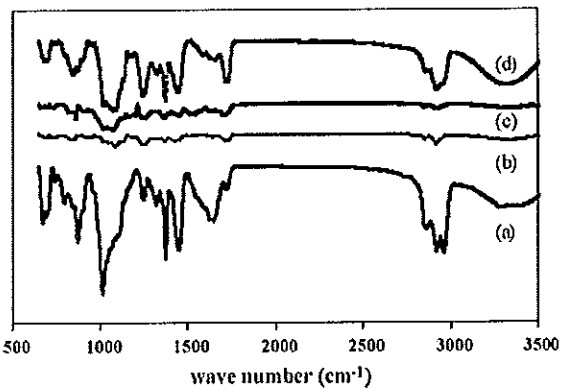
ig. 2. Model of the semi-interpenetrating polymer networks (IPNs) based on ENR nd PVA by maleic acid as a crosslinking reagent.

or 24 h and weighed until a constant weight was achieved. The egree of swelling ratio was estimated from Eq. (1)

$$\text{welling ratio} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (1)$$

vhere W_1 is the original weight of the sample and W_2 is the weight f swollen sample.

A scanning electron microscope (JMS-5800 LV, JEOL, and SEM) vas used to investigate the morphologies of cross-sections of he samples at an accelerating voltage of 6 kV. Semi-IPN sample heets containing different amounts of maleic acid were fracured in liquid nitrogen and the cross-sections were mounted n SEM stubs with double-sided adhesive tape, and then coated vith platinum under a 12 Pa *vacuum*. The thermogravimetric (TG) nalysis was performed on a Pwein Elmer Thermobalance. The nass of each sample was about 6.00–7.00 mg. The carrier gas vas N_2 with a flow rate of 45 mL/min. The temperature was aised from 50 to 800 °C at a heating rate of 10 °C/min. The tenile strength and elongation at the break of the semi-IPN product vas measured according to ASTM D412-98a at a crosshead speed f 500 mm/min with a load cell of 100 N. Modulus of the semiterpenetrating sample were measured according to JIS K6251 sing the tensile tester (model Strograph E-L, according to TOYO-EIKI) at a crosshead speed of 500 mm/min with the load cell of 00 N.



ig. 3. FTIR spectra of (a) ENR alone, (b) PVA, (c) semi-IPN ENR/PVA in the presence f maleic acid 40%, and (d) ENR/PVA.

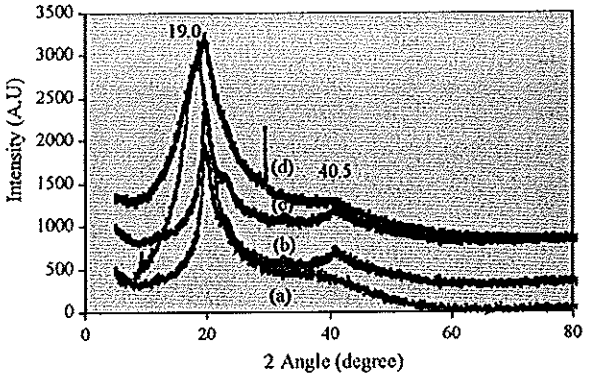


Fig. 4. XRD spectra of (a) PVA, (b) ENR, (c) ENR/PVA and (d) semi-IPN ENR/PVA in the presence of 40% maleic acid.

3. Result and discussion

The model of this semi-interpenetrating polymer networks (IPNs) contain poly(vinyl alcohol) represented as solid lines and epoxide natural rubber represented by dot lines that are separately crosslinked into two interpenetrated networks with no chemical bonds between them as shown in Fig. 2. The poly(vinyl alcohol) reaction with the maleic acid is represented at the red spot.

3.1. FTIR results

The semi-interpenetrating polymer network of NR-poly(vinyl alcohol) containing maleic acid was prepared by the solution-latex method. The influence of the maleic acid content on the properties of the rubber blend was studied. The presence of a large number of hydroxyl groups in PVA resulting from the semi-interpenetration between NR and poly(vinyl alcohol) and strong hydrogen bonding (perhaps both the intermolecular and intramolecular types), will affect the solubility of PVA in water. The FT-IR spectrum of PVA

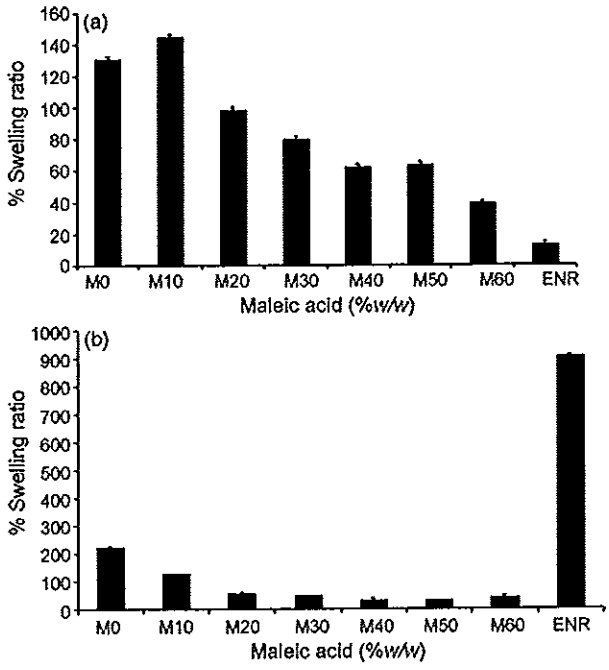
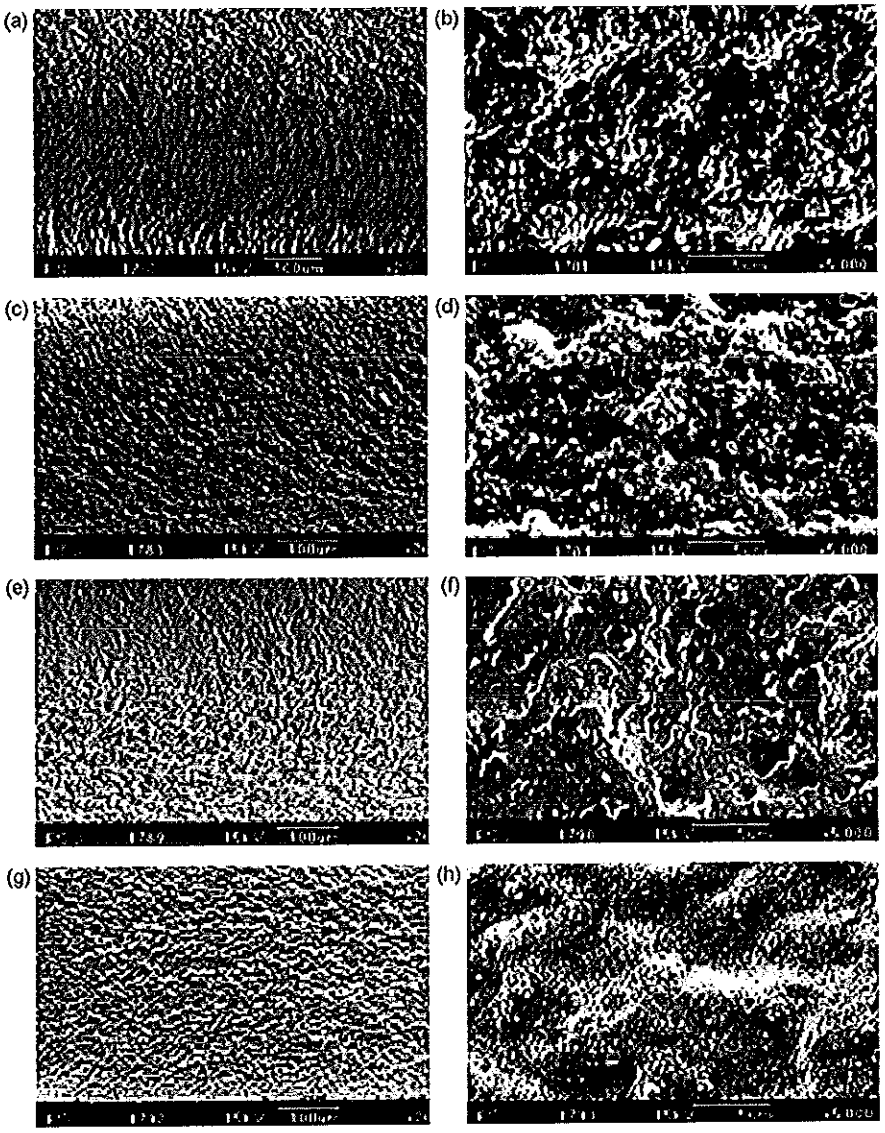


Fig. 5. % Swelling ratio of semi-IPN ENR/PVA with different maleic acid contents in (a) water and (b) toluene.



3. Scanning electron micrographs of semi-IPN NR/PVA with (a) 0% (w/w), (b) 0% (w/w) (expanded region), (c) 10% (w/w), (d) 10% (w/w) (expanded region) (e) 20% (w/w), 0% (w/w) (expanded region), (g) 40% (w/w) and (h) 40% (w/w) (expanded region) maleic acid.

ne, ENR alone, the ENR/PVA blend and semi-IPN samples are wn in Fig. 3. Maleic acid treatment of PVA produces interme- e heat stability. It is possible that in this temperature zone the l energy input is inadequate to break the double bond structure =C–) of the heat-treated samples but it is sufficient to start the radation of the–C–O– bond of the maleic acid treated PVA in semi-IPN samples as shown in Fig. 3. The ester linkage of the i-interpenetrating sample is confirmed by FTIR. The absorption ds of the *cis*-1,4-polyisoprene in ENR is found at 2860 cm^1 (C–H tching), 1665 cm^1 (C=C stretching), 1453 cm^1 ($-CH_2-$ deforma-), 1378 cm^1 and (methyl C–H deformation) [2,3].

The absorptions at 876 and 1252 cm^{-1} can be attributed to epoxy group, and the weak absorption at 1735 cm^{-1} can be gned to the carbonyl group of the ester. The main peaks of alone shown at 1327 and 843, and 1087 cm^{-1} are attributed C–H bending and C–O stretching, respectively. The changes of characteristic spectra peaks reflect the chemical interactions en two or more substances are blended. In the typical spectrum ne semi-IPN sample sheet, the characteristic peak at 1729 cm^{-1} was shifted to 1730 cm^{-1}. This document indicates that there are hydrogen bonded interactions between the hydroxyl groups, carbonyl groups of PVA and carbonyl groups of maleic acid and the epoxy groups of ENR that helped them to be compatible.

3.2. XRD results

The XRD scans of the semi-interpenetrating polymer network between epoxidzed NR and PVA, ENR and PVA are shown in Fig. 4. The observed PVA alone spectrum reveals a semi-crystalline feature. It is vital to note that there are two halos cited at 19.5° and 40.5°. The first one has a clear crystalline peak at a scattering angle $2\theta = 19.5°$ that corresponds to a (1 0 1) spacing. The second halo has a low intensity and broad shape and corresponds to noncrystalline zones within the crystalline polymer matrix. After adding maleic acid in the semi-interpenetrating sample sheet, the intensity of the diffraction peak at 19° for PVA becomes gradually broader when compared to the PVA alone and the ENR/PVA blend without maleic acid, due to crosslinking between PVA and maleic acid. In

ddition, the intensity of the peak at 40.5° in the semi-IPN sample with 40% (w/w) of maleic acid decreased compared to the NR/PVA blend without maleic acid and poly(vinyl alcohol) alone. demonstrates that the existence of maleic acid decreased the rystallinity of PVA. This phenomenon is due to the significant ydrogen bonding interactions among PVA, ENR and maleic acid nolecules as well as formation of covalent bonds between PVA and naleic acid. In other word, the addition of maleic acid in the semi-nterpenetrating sample improves the compatibility between PVA nd ENR. The broad peak of the hydrated crystalline structure of NR shows the same tendency as that observed for the peak at 9°.

3. Swelling ratio results

The swelling of any polymeric film in a solvent depends upon the iffusion coefficient of the solvent, the relaxation rate of the amorhous regions of the polymer chain and its degree of crystallinity. olymer gels may be classified into two different categories, i.e., hysical gel and chemical gel. In a physical gel the junction points f the network arise owing to physical bonding like Van Der Waals nteractions, hydrogen bonding, the presences of crystallites, etc.; ence, in a good solvent such networks exhibit a large extent f volume change owing to the facile penetration of the solvent 4]. The PVA selected for the present study possesses a degree of ydrolysis of 98%. The swelling ratio of a semi-interpenetrating ample could be used practically to approximate the crosslinkng density in the sample. The swelling ratio of the maleic acid rosslinked semi-IPN based on the ENR/PVA having different maleic cid contents and ENR alone and all cured at 120 °C for 60 min was tudied in water and toluene after keeping the samples immersed

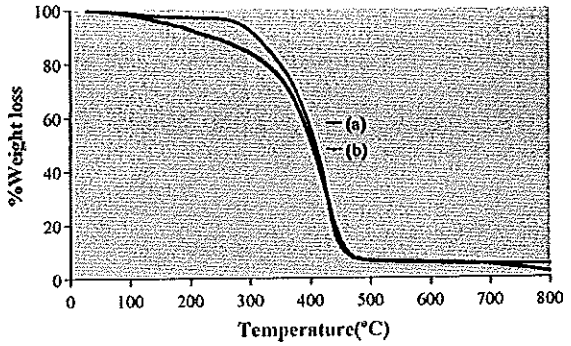


Fig. 7. TGA of (a) ENR/PVA and (b) semi-IPN ENR/PVA in the presence of 40% maleic acid.

in solvents for 5 days. The semi-IPN based on the ENR and PVA had a lower swelling ratio after being cured with maleic acid (Fig. 5(a) and (b)), when compared with the uncured measurement. This indicates that the chemical reaction that occurred between the semi-IPN based on the ENR/PVA network with maleic acid. Fig. 5(a) determined the swelling ratio in water that varied with the maleic acid content of the ENR/PVA. The swelling ratio of the sample in water decreased as the amount of maleic acid in the sample increased. The toluene resistance of the semi-IPN ENR/PVA system also increased with increasing amounts of maleic acid in the sample after curing (Fig. 5(b)). The swelling ratio of semi-IPN ENR/PVA with 10% (w/w) maleic acid was 230%. When the maleic acid content of the sample was increased from 10 to 50% (w/w), the swelling ratio of the semi-IPN ENR/PVA was 30% (Fig. 5(b)).

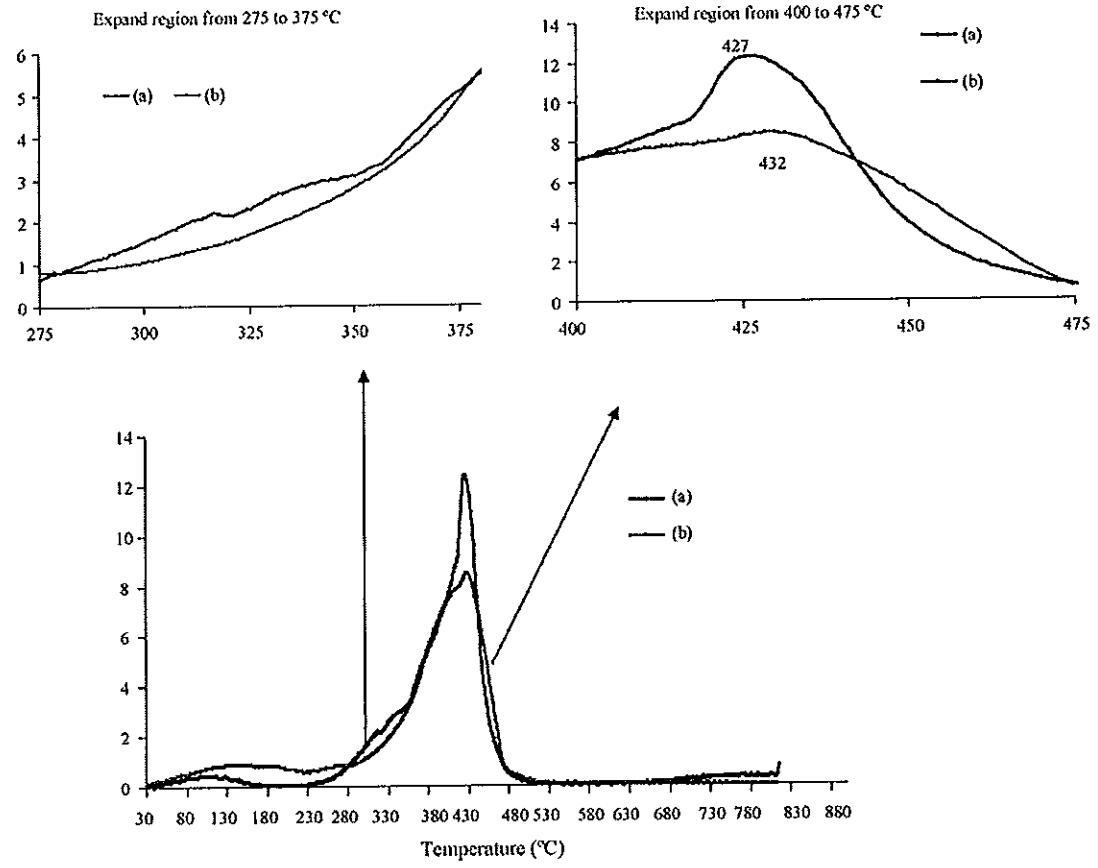


Fig. 8. DTG of (a) ENR/PVA and (b) semi-IPN ENR/PVA in the presence of 40% maleic acid.

SEM results

'he phase morphology of PVA and cured semi-IPN ENR/PVA :aining various amounts of maleic acid was studied through ıning electron microscopy. The cross-sectional view of the sam- is shown in Fig. 6. The morphology of the ENR/PVA blend bited many microphase separations because there was no slinking in the PVA molecules due to the absence of maleic . When maleic acid was present in the ENR/PVA matrix the mor- logy showed less microphase separations. The low microphase ıration morphology was not observed in samples of the semi- in the presence of maleic acid due to crosslinking between the molecules by maleic acid. This indicates that the NR molecules penetrate into the crossliked PVA molecule.

TGA analysis results

'he objective of this TGA is to investigate the variation and to erstand the thermal behavior and the modifications to poly- structure. The TGA and DGA measurements of ENR/PVA and /PVA in the presence of maleic acids are shown in Figs. 7 and 8, ıectively. From the thermogravimetric analysis and observa- s of the temperature maximum, a better heat stability for maleic acid crosslinked PVA was observed. Three temperature ons can be identified over which most of the weight change ırs in the ENR/PVA blend. The first weight loss occurs between ınd 120 °C which corresponds to the removal of water. The sec- weight loss occurs between 300 and 400 °C and corresponds he side chain decomposition of PVA and the main chain of the molecule. The third degradation between 400 and 550 °C corre- nds to the decomposition of the PVA main chain and the residual molecules. In the case of the semi-IPN sample containing 40% eic acid, four weight losses were observed. An improvement he thermal stability of the ENR/PVA can be seen when maleic l is present, as observed by the temperature maximum. A fourth ght loss was observed in the semi-IPN sample. The weight loss 00–120 °C (first region) is due to the moisture vaporization and 30–180 °C (second region) is due to the decomposition of resid- maleic acid (the melting point of maleic acid is 130–139 °C). The t part of the third region that occurs over a range of tempera- e from 200 to 450 °C is caused by thermooxidative degradation he semi-IPN sample molecule and the second part or fourth ion occurred over a range of temperatures from 450 to 550 °C. temperature maximum peak is shifted to higher temperatures ıbout 5 °C compared with the ENR/PVA blend as shown in Fig. 8 he expanded region. The lower thermal degradation of PVA he semi-IPN sample showed two regions including the first ion from 275 to 375 °C and another region from 400 to 475 °C en compared to the ENR/PVA blend without maleic acid. These ılts implied that the thermal stability of the semi-IPN sample s higher than for the ENR/PVA blend without maleic acid due chemical bonding between the PVA molecule and maleic acid. g and Kong [28] studied the thermal degradation of PVA using A. They found that the degradation behavior of PVA possessed steps including the peak degradation temperature (T_p) of the t degradation step at 350 °C and the T_p of the second degradation at 470 °C.

Mechanical property results

The tensile strength of semi-IPN samples is a vital factor for adhesive and biomedical applications. Thus, it was important establish if the tensile strength of the semi-IPN sample was proved by the addition of maleic acid.

The tensile strength of the semi-IPN NR/PVA samples as a func- n of curing times and maleic acid contents are presented in

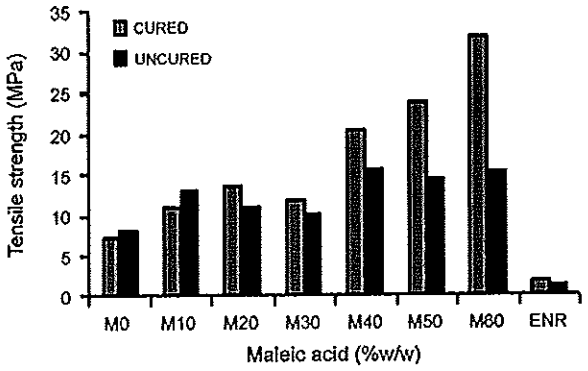


Fig. 9. Tensile strength of semi-IPN based on ENR/PVA with maleic acid contents.

Fig. 9. The data indicate that the tensile strength of the semi-IPN based on the NR/PVA blend increased with increasing curing time (Fig. 9). This might be used as evidence for the existence of chemical crosslinks between maleic acid and PVA. However, it was also clear that the tensile strength of semi-IPN was slightly increased with curing times. This can be explained by a certain amount of crosslinking of PVA being generated by activation of the double bonds of maleic acid during curing. It should be emphasized that the tensile strength values of the cured semi-IPN based on the NR/PVA was high when compared to NR alone. The mechanical properties of the semi-ENR/PVA are shown in Fig. 9. Following curing, the tensile strength of semi-IPN based on ENR/PVA was increased with an increased maleic acid content. It was a surprise to find that the tensile strength of the semi-IPN based on its ENR/PVA reached 32 MPa when the maleic acid concentration reached 60% (w/w). This result could be explained by the finding from the swelling measurement that the highest crossliking density of the semi-IPN sample from poly(vinyl alcohol) and maleic acid occurred in the presence of 60% maleic and this produced the highest tensile strength value.

Fig. 10 shows the elongation at the break of the semi-IPN based on its ENR/PVA with different maleic acid contents. The elongation at the break of the semi-IPN sample decreased with increasing maleic acid content. The elongation at the break of the samples with 10 and 50% (w/w) maleic acid before vulcanization was 600 and 100%, respectively. After the vulcanization process, the elongation at the break of these samples was only slightly reduced, compared to the sample without the vulcanization process, due to the high density of crosslinking in the sample.

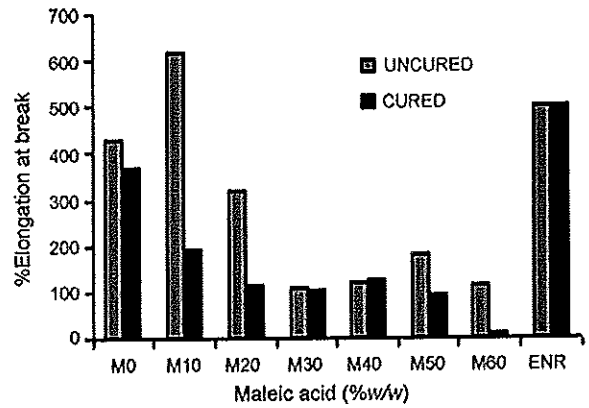


Fig. 10. Elongation at breaking of the semi-IPN based on ENR/PVA with different maleic acid contents.

. Conclusions

The preparation of semi-IPN between NR and PVA or ENR and VA using maleic acid as the crosslinking agent was carried out uccessfully. The highest tensile strength of the semi-IPN based n its ENR and PVA with 60% maleic acid was 32 MPa. The low-st swelling ratio of semi-IPN based on ENR and PVA in both water nd toluene was found in the uncured condition. A chemical reac-ion between PVA and maleic acid was confirmed by ATR-FTIR. The rosslinking properties of the semi-IPN films increased as a function f the maleic acid content and curing reaction times. In addition, he crystalline content of PVA dramatically decreased after adding naleic acid in the semi-IPN, as observed from its XRD. The semi-IPN amples show good mechanical properties and thermal stability. he SEM's of the semi-IPNs containing maleic acid showed that no hase separation occurs, when compared with the sample in the bsence of maleic acid.

cknowledgements

The authors thank department of polymer science, Prince of ongkla University and Thai Rubber Latex Corporation (Thailand) ublic Company Limited for the use laboratory space. This study vas supported by Thailand research fund (SC 505S207). Thanks also o Dr. Brian Hodgson for assistance with the English.

eferences

[1] Z. Peng, L.X. Kong, S.D. Li, Y. Chen, M.F. Huang, Compos. Sci. Technol. 67 (2007) 3130–3139.
[2] V.J. Tomazic-Jezic, D.H. Beezhold, H. Hashim, T. Palosuo, M. Raulf-Heimsoth, M. Swanson, R.G. Hamilton, J. Allergy Clin. Immunol. 113 (2) (2004) S78.
[3] E. Yip, P. Cacioli, J. Allergy Clin. Immunol. 110 (2) (2002) S3–S14.
[4] L.W. Hunt, P. Kelkar, C.E. Reed, J.W. Yunginger, J. Allergy Clin. Immunol. 110 (2) (2002) S96–S106.
[5] N. Doo-ngam, P. Rattanadecho, W. Klinklai, W. Songklanakarin, J. Sci. Technol. 29 (2007) 1599–1608.
[6] M. Mondragón, E.M. Hernández, J.L. Rivera-Armenta, F.J. Rodríguez-González, Carbohydr. Polym. 77 (2009) 80–85.
[7] B. Ly, W. Thielemans, A. Dufresne, D. Chaussy, M.N. Belgacem, Compos. Sci. Technol. 68 (2008) 3193–3201.
[8] M.J. John, B. Francis, K.T. Varughese, S. Thomas, Compos. A: Appl. Sci. Manuf. 39 (2) (2008) 352–363.
[9] M. Jin, X. Zhang, A.V. Emeline, T. Numata, T. Murakami, A. Fujishima, Surf. Coat. Technol. 202 (8) (2008) 1364–1370.
[10] R. Asaletha, M.G. Kumaran, S. Thomas, Eur. Polym. J. 35 (2) (1999) 253–271.
[11] B. Das, S. Sinha, T. Gangopadhyay, Eur. Polym. J. 29 (1) (1993) 57–61.
[12] R. Guo, A.G. Talma, R.N. Datta, W.K. Dierkes, J.W.M. Noordermeer, Eur. Polym. J. 44 (11) (2008) 3890–3893.
[13] P. Phewphong, P. Saeoui, C. Sirisinha, Polym. Test. 27 (7) (2008) 873–880.
[14] S. Riyajan, S. Tuampoemsab, J.T. Sakdapipanich, Kaustschuk Gummi Kunststoffe 61 (12) (2007) 665–670.
[15] M.H.S. Magdy, A.A. Abdel-Fattah, Y.K. Abdel-Monem, Nuclear Instr. Meth. Phys. Res. Sect. B: Beam Interact. Mater. Atoms 266 (11) (2008) 2599–2606.
[16] N.A. Peppas, S.L. Wright, Eur. J. Pharm. Biopharm. 46 (1998) 15–29.
[17] L.H. Sperling, Polym. Eng. Sci. 25 (9) (1985) 517–520.
[18] S. Riyajan, S. Chaiponban, D. Kothamnivet, S. Thongseenuch, Kasetsart Univ. Sci. J. 26 (2008) 29–36.
[19] P.M. Aji, S. Packirisamy, R. Stephen, S. Thomas, J. Membr. Sci. 201 (1–2) (2002) 213–227.
[20] A.P. Mathew, S. Packirisamy, S. Thomas, Polym. Degrad. Stab. 72 (3) (2001) 423–439.
[21] A.P. Mathew, S. Packirisamy, S. Thomas, J. Appl. Polym. Sci. 78 (13) (2000) 2327–2344.
[22] A.P. Mathew, G. Groeninckx, G.H. Michler, H.J. Radusch, S. Thomas, J. Polym. Sci. B: Polym. Phys. 41 (14) (2003) 1680–1696.
[23] A.P. Mathew, S. Thomas, Mater. Lett. 50 (2001) 154–163.
[24] M.M. Jayasuriya, D.J. Hourston, J. Appl. Polym. Sci. 112 (2009) 3217–3224.
[25] D. Jia, Y. Pang, X. Liang, J. Polym. Sci. B: Polym. Phys. 32 (1994) 817–823.
[26] S.K. Singha, S.P. Tambea, A.B. Samui, V.S. Raja, D. Kumara, Prog. Org. Coat. 55 (2006) 20–26.
[27] J. Gohil, A. Bhattacharya, P. Ray, J. Polym. Res. 13 (2) (2006) 161–169.
[28] Z. Peng, L.K. Kong, Polym. Degrad. Stab. 92 (2007) 1061–1071.

Natural Rubber · Polyvinyl alcohol · Thermal degradation · Kinetic analysis

The thermal decomposition behavior and degradation kinetics of natural rubber containing Poly(vinyl alcohol) (98 % alcohol units) were investigated with thermogravimetric analysis under dynamic conditions at different heating rates. The derivative thermogravimetric curves showed that thermal degradation proceeds in one weight-loss step. The apparent activation energy was estimated to be about 185 kJ/mol by using the Ozawa-Flynn-Wall method. The most likely decomposition process was an F1 deceleration type in terms of the Coats-Redfern and Phadnis-Deshpande results.

Aktivierungsenergie und thermisches Verhalten von Elastomeren aus Naturkautschuk/ Polyvinylalkohol

Naturkautschuk · Polyvinylalkohol · thermische Zersetzung · kinetische Analyse

Die thermische Zersetzung und die Zersetzungskinetik wurde mit Hilfe der Thermogravimetrischen Analyse unter dynamischen Bedingungen bei unterschiedlichen Aufheizraten untersucht. Die Zersetzung zeigt eine Stufe und hat bei Anwendung der Ozawa-Flynn-Wall Methode eine Aktivierungsenergie von ca 185 kJ/mol.

Activation Energy and Thermal Behaviors of Thermoplastic Elastomer Based on Natural Rubber and Poly(vinyl alcohol)

Nowadays oil resistance is becoming an important requirement for rubber products [5-7] and thermoplastic elastomers (TPE). The later exhibit more roles owing to their easy processability and their elastomeric properties. Thermoplastic elastomers based on natural rubber (NR) and blends of NR with thermoplastic materials such as polyethylene, propylene have been studied intensively [8-10]. Poly(vinyl alcohol) (PVA) can be considered to be an interesting choices for blending with NR due to ozone resistance and the hydrophilic properties. The purpose of this paper is to investigate the thermal behavior of this blend. Maleic acid and maleic anhydride are used on one hand as cross-linking agents and on the other hand to enhance the blend compatibility and to improve some properties of the blend. The current work is concentrated thermal degradation of NR/PVA blends which is characterized by Thermogravimetric Analysis (TGA). This method is most commonly used to investigate thermal stability of various substances, including polymer thermolyses [11-18]. It provides quantitative results regarding the loss of weight of a sample as a function of increasing temperature. It was observed previously that the major weight loss of the developing natural rubber occurs between 300 and 400 °C [19-21]. Derivative thermogravimetry (DTG) can be used to investigate differences between thermograms. This technique was used, for example, to elucidate the kinetic parameters of degradation processes, such as the rate constants, activation energies, reaction orders, and Arrhenius exponential factors. Many kinetic analytical methods have been established on the basis of the scanning-rate dependence of TGA data.
In this study, we used TGA to record the weight loss, activation of energy, and thermodynamic property of natural rubber containing polyvinyl alcohol with 98 % degree of hydrolysis.

Theoretical background

The theoretical background is described in the literature [22-25] For the very general reaction

$$S(s) \rightarrow P1(s) + P2(s).$$

the disappearance rate of the species (S) can be calculated as follows:

$$\frac{da}{dt} = kf(a) \quad (1)$$

with S(s) – the reactant, P1(s) and P2(s) – the remainder and gasous product, a – the extent of conversion of the decomposed compound at time t and k – the rate constant. The constant k is assumed to obey the Arrhenius equation for the early stage of the reaction:

$$K = A\exp(\Sigma E/RT) \quad (2)$$

with A – the frequency (pre-exponential) factor, R – the gas constant, T – the absolute temperature and E is the activation energy of the reaction. Combing equ. (2) and (1) leads the following relationship:

$$\frac{da}{dt} = Ac\exp(\Sigma E/RT) \quad (3)$$

If the temperature of the sample is changed by a controlled and constant heating rate ($\varphi = dT/dt$), the variation in the degree of conversion can be analyzed as a function of

Authors

S. Riyajan, S. Chaiponban, N. Phuphewkeaw, Hat Yai (Thailand)

Corresponding author:
Sa-ad Riyajan
Prince of Songkla University,
Program of Polymer
Science and Bioplastic
Research Unit, Faculty of Science
Hat Yai, 90112, Thailand
E-mail: saadriyajan@hotmail.com

temperature, this temperature depending on the time of heating . Thus, the reaction rate is defined as follow:

$$\frac{da}{dt} = (A/\varphi)\exp(-E/R)f(a) \quad (4)$$

Separating the variable and rearranging the expression the equation can be intergrated as follows:

$$g(a) = \int_{a_0}^{a_p} \frac{da}{f(a)} = (A/\varphi)\int_{T_0}^{T_p} \exp(\cdot\ E/RT)dT \quad (5)$$

with g(a) – a function of the conversion, a_0 and a_p – the rectant conversion at point o and p, T_0 and T_p – the corresponding temperatures point o and p, respectively.
If E/RT is expressed as x the integration of equ. 5 leads to the following expression:

$$(A/\varphi)\int_{T_0}^{T_p} \exp(\cdot\ E/RT)dT = \frac{AE}{T\varphi}P(x) \quad (6)$$

After taking the logarithm, it results

$$\mathrm{Log}\varphi = \mathrm{Log}\frac{AE}{g(a)R} + \mathrm{Log}\ p(x) \quad (7)$$

with

$$p_{(x)} = \frac{e^{-x}}{x^2}\ ,\ (\sum 1)^{n-1}\ \ \frac{n!}{x^{(n-1)}} \quad (8)$$

The function p(x) can be mentioned by some approximate equation when certain conditions are met. The methods studied in this article are as follows.

Coats-redfern method [23]

Coats and Redfern used an asymptotic approximation for the resolution of eq. (5) at different conversion values. If it is assumed that (2RT)/E → 0 for the Doyle approximation, finally the following logarithmic expression can be obtained

$$\frac{g(a)}{T^2} = \ln\frac{AR}{\varphi E}\ ,\ \frac{AR}{\varphi E} \quad (9)$$

According to the theoretical functions of g(a) for the different degradation processes listed in Table 1, one can not only obtain the apparent activation energy and frequency factor from the slope of the plot of ln (g(a)) vs. 1/T but also gain information about the valid reaction mechanism.

Ozawa-flynn-wall method

Several integral methods have been proposed to determine the activation energy without the knowledge of the reaction order. One interesting method developed by Ozawa [22] is based essentially on the Flynn-Wall method, representing a relatively simple approach for determining the activation energy directly from data of the weight loss with the temperature obtained at several heating rates. Integrating Equ. 7 by using the Doyle approximation (that is, when $20 \le x \le 60$) the function p(x) can be adapted to the following approximation:

$$\mathrm{Log}\,p(x) \approx -2{,}315 - 0{,}4567x \quad (10)$$

If this expression is substituted in Equ. (7) the following result is obtained after integration and logarithmation.

$$\mathrm{Log}\varphi = \mathrm{Log}\,AE/g(a)R - 2{,}315\frac{0{,}4567E}{RT} \quad (11)$$

with g(a) – the integral function of conversion.
Thus, at the given conversion, a plot of log φ against 1/T should be a straight line with a slope of -0.4567E/R.

Phadnis-despande method

Another approach proposed by Phadnis and Despande [23] results in taking the function p(x) for the two former terms. With $g(a) = ART^2$ Equ. (7) is transformed as follows:

$$g(a) = \frac{ART^2}{\varphi E}\left[1 - \frac{2RT}{E}\right]\mathrm{Exp}(-E/RT) \quad (12)$$

Rewriting Equ. (12) by substituting eq (4) and rearranging it, the following expression results:

$$f(a)g(a) = \frac{RT^2}{E}\left[1 - \frac{2RT}{E}\right](da/dT) \quad (13)$$

By neglecting the comparatively small term $2R^2T^3/E^2$ the expression (13) is symplified to the following:

$$F(a)g(a) = \frac{RT^2}{E}\frac{da}{dT} \quad (14)$$

Alternatively, upon the integration of eq. (14) it results:

$$g(a) = \frac{-E}{RT} \quad (15)$$

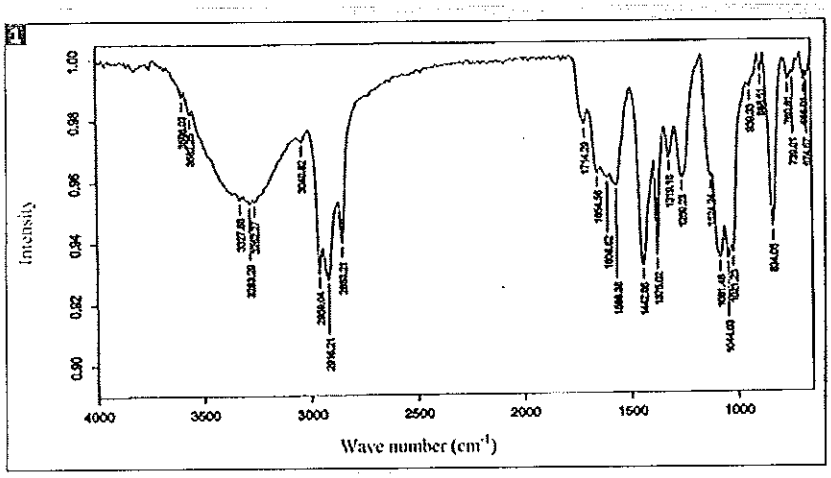
with $g'(a) = \int f(a)g(a)da$.
The integral fuctionals of g'(a) are listed in Table 2.
This method can be used for deducing the reaction mechanism depending on the functional form of a, based on the linearity of the plot of f(a), g(a) with T2 da/d or g'(a)

1 Algebraic Expressions for g(a) for the most frequently used mechanisms of solid processes

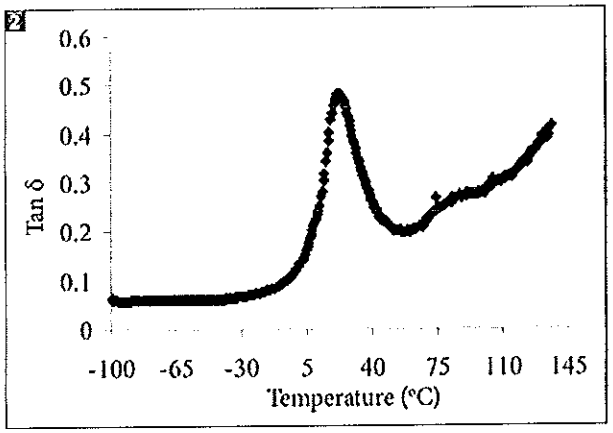
Symbol	g(a)	Solid-state process
Sigmoidal curves		
A2	$[-\ln(1-a)]^{1/2}$	Nucleation and growth [Avrami-Erofeev eq. (1)]
A3	$[-\ln(1-a)]^{1/3}$	Nucleation and growth [Avrami-Erofeev eq. (1)]
A4	$[-\ln(1-a)]^{1/3}$	Nucleation and growth [Avrami-Erofeev eq. (1)]
Deceleration curves		
R1	(a)	Phase-boundary-controlled reaction (one-dimentional movement)
R2	$2[1-\ln(1-a)^{1/2}$	Phase-boundary-controlled reaction (contracting area)
R3	$3[1-\ln(1-a)^{1/3}$	Phase-boundary-controlled reaction (contracting volume)
D1	a^2	One-dimensional diffusion
D2	(1-a)ln(1-a)+a	Two-dimentional diffusion (Valensi equation)
D3	$[1-(1-a)^{1/3}]^2$	Three-dimentional diffusion (Jander equation)
D4	(1-2/3a)-(1-a)2/3	Three-dimentional diffusion (Ginstling-Brounshtein equation)
F1	-ln(1-a)	Random nucleation with one nucleus on the individual particle
F2	1/(1-a)	Random nucleation with two nucleus on the individual particle
F3	$1/(1-a)^2$	Random nucleation with two nucleus on the individual particle

2 Functions of g'(a) for frequently used solid-state reaction mechanisms in the Phadnis-Deshpande method

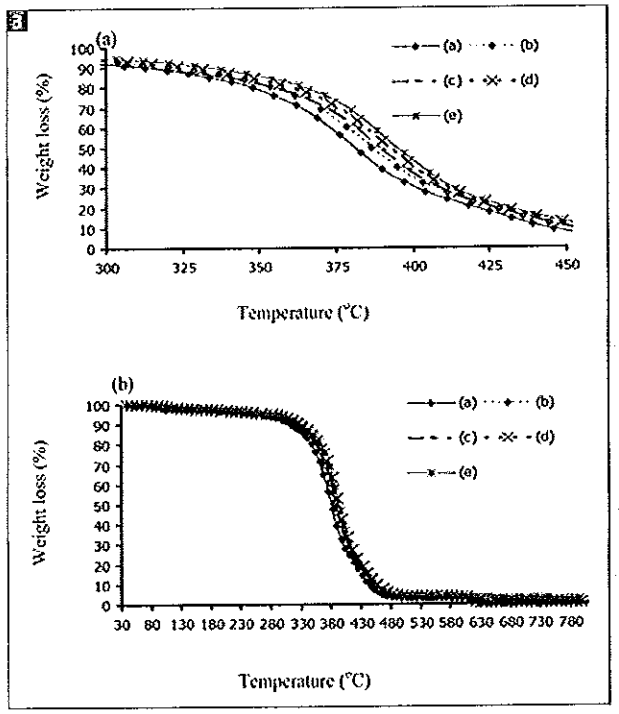
g'(a)	Reaction mechanism
ln(a)	Power law
2lna	Power law
$\ln[1-(1-a)^{1/3}]$	Phase boundary (contracting sphere)
$\ln[1-(1-a)^{1/2}]$	Phase boundary (contracting sphere)
1/2ln[-ln(1-a)]	Nucleation and nucleus growth (Arami-Erofeev nucleus growth)
1/3ln[-ln(1-a)]	Nucleation and nucleus growth (Arami-Erofeev nucleus growth)
1/4ln[-ln(1-a)]	Nucleation and nucleus growth (Arami-Erofeev nucleus growth)
ln[(1-a)ln(1-a)+a]	Valensi two-dimentional diffusion
$2\ln[1-(1-a)^{1/3}]$	Jander three-dimentional diffusion
$\ln[1-2/3a-(1-a)^{2/3}]$	Brounshtein-Ginstling three-dimentional diffusion



1 FT- IR spectra of 60/40 NR/PVA blend containing 2.5 % (w/w) maleic acid



2 Tan δ of 60/40 NR/PVA blend containing 2.5 % (w/w) maleic acid observing DMTA at 20 Hz



3 TGA of 60/40 NR/PVA blend containing 2.5 % (w/w) maleic acid at different heating rates (a) overall and (b) expand

with 1/T, and the apparent activity energy, which is obtained by other methods (e.g., Ozawa-Flynn-Wall methods). The plot of g(a) with 1/T is linear with the proper functional form of a. The slope of this plot, if multiplied by R, gives the value of E. The application of this method, like the Coats-Redfern method, gives a means of acquiring the valid reaction mechanism. In the case of polymers, the integral function, g(a), is a form of either a sigmoidal function or a deceleration function. Table 1 presents different expression of g(a) for the different solid-state mechanism [25-26]. These functions usually estimated the solid-state mechanism of the reaction from non-isothermal TGA experiments.

Experimental

Blends of polyvinyl alcohol and natural rubber were prepared by solution and latex blending methods. The FT-IR spectra were obtained on a Vector 22 spectrometer with KBr pellets for the wave number range from 400 to 4000 cm^{-1} at a resolution of 4 cm^{-1} (100 scans collected). The TGA-measurements were performed with a TA 2960 Instument. The polymer sample (9.0±0.5 mg) was stacked in an open plantinum sample pan. The experiment was conducted under a nitrogen gas atmosphere at a flowing rate of 100 mL/min and at various heating rates (10, 15, 20, 25, and 30 °C/min) in the temperature range of 40 to 850 °C.

Dynamic mechanical properties (DMA) were performed in tension mode by using a TA Instrument 2980, applying sufficient force to produce a deformation strain less than 0.1 % in the sample. Strips in dimensions of 20 × 10 × 1 mm were used as specimens for NR/cyclized NR blend. The storage and loss modulus were measured at a frequency of 0.1 to 10 rad s^{-1} over a temperature range of -100 °C to 140 °C – at heating rate of 2 °C/min, 1.0 N of contact force.

Results and discussion

FTIR and dynamic properties of NR/PVA containing maleic acid

The FT-IR spectra of 60/40 natural rubber/polyvinyl alcohol blend containing 2.5 % (w/w) maleic acid as shown in Figure 1 are observed to the carbon–carbon double bond stretching modes at 1600 cm^{-1}, the CH_2 deformation and C-C stretching mode region at 1,200 to 900 cm^{-1}, and the C-H bending mode region at 900 cm^{-1} to 800 cm^{-1}. The band at 1664 cm^{-1} is due to the *cis*-1,4 carbon-carbon double bond stretching mode.

3 Values of E obtained with the Ozawa-Flynn-Wall method

a(%)	E(kJ/mol)	R (a)
10	158.4	0.9898
14	161.7	0.9882
18	209.9	0.9871
22	199.9	0.9946
26	197.0	0.993

A representaive DMTA spectrum of 60/40 NR/PVA blend containing 2.5% (w/w) maleic acid is shown in Figure 2. There is only one major glass transition. It was found that natural rubber exhibits the T_g at -54.19 °C and Tg of PVA is 22.02 °C. It is interesting for note that the Tg of rubber blend is −22.15 °C.

TGA analysis of NR/ PVA containing Maleic acid

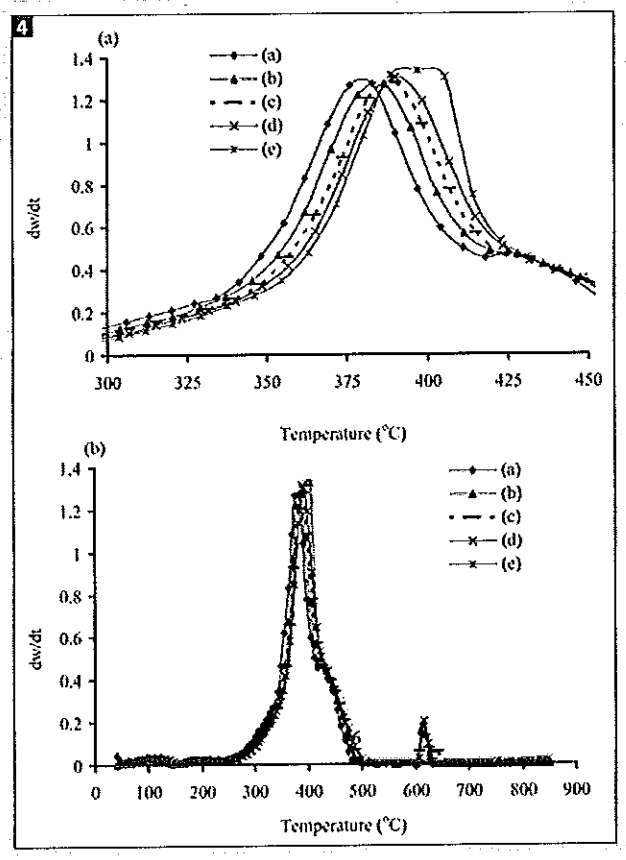
The TGA and derivative thermogravimetry (DTG) curves for the pyrolysis of NR/PVA blends are shown in Figure 3, respectively. The thermograms obtained from nitrogen-purged samples, shift toward the high-temperature zone as the heating rate increased from 10 to 30 °C/min because of the heat lag of the process. This heating rate dependence is also indicated in DTG thermogram shifts to higher temperatures as the heating rate increase as shown Figure 4.

The DTG curves show two maximum weight-loss rate peaks and this indicates that the decomposition corresponds to a single-stage decomposition reaction in which the decomposition temperatures are well defined. The decomposition behavior at all heating rates are analogous to one another at different heating rates, as indicated in Figure 4.

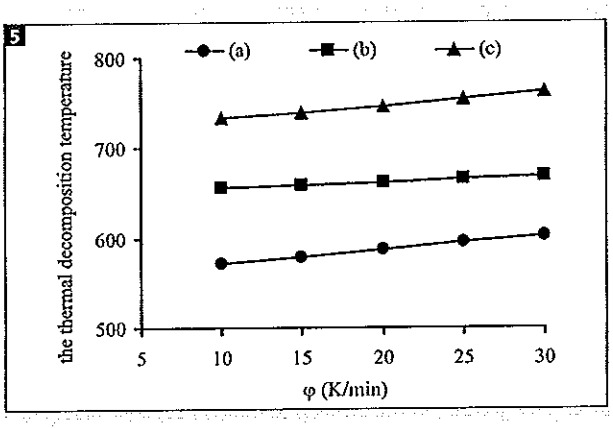
Figure 5 presents the influence of the heating rate on the decomposition temperature. The temperature at the onset of weight loss (T_i) and the temperature of the final decomposition (T_f) were obtained from the TGA curve with the tangent method, while the temperature at the maximum weight-loss rate (T_p) was taken from DTG curves. The thermal degradation temperature increases with increases with the heating rate as shown in Figure 3. The relationships between the decomposition temperatures and heating rate are as follows:

$$T_i = 556.4 + 1.54\varphi$$
$$T_p = 649.0 + 0.66\varphi$$
$$T_f = 717.0 + 1.50\varphi$$

When the heating rate is approximately zero, the corresponding decomposition temperature can be expressed more exactly as an equilibrium decomposition temperature [26, 27]. The equilibrium values of T_i, T_p, and T_f are 556.7, 649.0, and 717.0 K, respectively, for NR/PVA blend containing maleic acid.



4 DTG curves of 60/40 NR/PVA blend containing 2.5% (w/w) maleic acid at different heating rates (a) overall and (b) expand

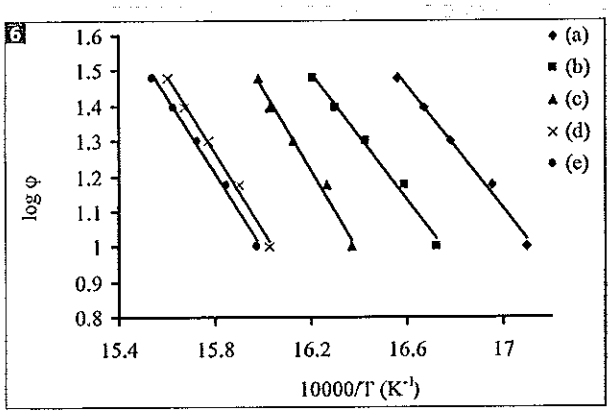


5 Relationship between the thermal decomposition temperatures and φ for 60/40 NR/PVA blend containing 2.5% (w/w) maleic acid

Kinetic analysis evaluation of the activation energy

The calculations according the Ozawa-Flynn-Wall method are applicable to all points on the TGA curves. Thus, they are capable of providing reasonably reliable data. We used the Ozawa-Flynn-Wall method to calculate the activation energy for the decomposition of a rubber blend with different conversion values by fitting the plots as shown in Figure 6. From the slopes of the plots, the apparent activation energy, E, was be calculated:

Fig. 6 shows that the fitted straight lines are nearly parallel, so indicating the applicability of this method to our system in the conversion range studied (from 10 to 26%). Table 3 shows the activation energies corresponding to different conversions. From these values, a mean value of 185.2 kJ/mol has been obtained. This method has the advantage of not needing previous knowledge



6 Typical plots of log φ versus 10,000/T of 60/40 NR/PVA blend containing 2.5% (w/w) maleic acid at several conversions in the range of 10-26% in steps of 4% (the Ozawa-Flynn-Wall method)

of the reaction mechanism to solve the activation energy. Therefore, the activation energies obtained with this method can be used to validate mechanistic models for thermal degradation

Kinetic analysis evaluation of the thermal degradation mechanism

There are many investigations on the mechanism of a solid-state reaction from thermoanalytical curves derived from isothermal or non-isothermal degradation. From previous study, it was summarized that the correlation coefficient of plots for various mechanism functions has been regarded as a standard for determining the reaction mechanism. However, sometimes the correlation coefficients of the lines have slight differences, in this case, it is necessary to establish the mechanism by other supplementary methods [28]. The Coats-Redfern method and Phadnis-Deshpande method was used to investigate the model for rubber blend by comparing the activation energy values with the calculations of the Ozawa-Flynn-Wall method.

The apparent activation energy corresponding to different g(a) values for sigmoidal and decelerated mechanisms (Table 1) can be obtained at constant heating rates with the Coats-Redfern equation from a fitting of ln g(a)/T2 versus 10,000/T.

Table 4 shows the activity energies and correlations at a heating rates with the Coats-Redfern equation from a fitting of plots of ln g(a)/T2 vs. 1/T. Table 4 shows the activtion energies and correlations at a heating rate of 20 °C/ min. The linearity of plots ln g(a)/T2 vs. 1/T for R2, R3, F2, and F3 types was poor. Therefore, when we looked at the correlation coefficient (good linerarity) as the standard, R2, R3, F2, and F3 types of degradation processes were excluded the first. Moreover, a comparison of the values of the activation energy in Table 4 depicts that at a heating rat of 20 °C/min, the apparent activation energies are in good agreement with those obtained with the Ozawa-Flynn-Wall method with the R1 and F1 mechanisms, that is, a phase-boundary-controlled reaction (one-dimensional movement) and random nucleation with one nucleus on the individual particles, respectively.

To further confirm the thermal degradation behavior, we also calculated the apparent activation behavior, we also calculated the apparent activation energies via the Phadnis-Deshpande method in its integral form at a heating rate of 20 °C/min. The values of the activation energies according to this approach are given in Table 5. The correlations of all the plots were good, but only when the thermal process abided by a power law and phase boundary, whose values was the apparent activation energy of NR/PVA blend containing maleic acid. The result for degradation was close to the one obtained from the Ozawa-Flynn-Wall method. With the combination of the Coats-Redfern and Phadnis-Deshpanede results, the more plausible mechanism for the degradation of NR/PVA blend containing maleic acid was a phase boundary.

Conclusions

The dynamic property of natural rubber containing Poly(vinyl alcohol) blend was studied. The most possible decomposition process was an F1 deceleration type according to the coats Redfern and Phadnis-Deshpande method. Moreover, the thermal degradation behavior and apparent activation energy of this system were studied with TGA and DTG. The results revealed that the thermal degradation of NR-PVA blend involved a single weight-loss step. The apparent activation energy of thermal degradation of NR-PVA blend calculated with the Ozawa-flynn-walling was 185.2 kJ/mol.

Acknowledgment

The authors thank department of polymer science, Prince of Songkla University for the

4 Values of E obtained with the Coats-Redfern method for several solid-state processes at a heating rate of 20 °C/min

Mechanism	E(kJ/mol)	R(a)
A2	228.576	0.9943
A3	463.43	0.9792
A4	797.33	0.9664
R1	118.283	0.9924
R2	1363.496	0.9577
R3	1031.185	0.9901
D1	192.5	0.9935
D2	54.42	0.9964
D3	51.08	0.9920
D4	52.17	0.9925
F1	110.04	0.9939
F2	1198.88	0.9945
F3	333.58	0.9012

5 Values of E obtained with the Phadnis-Deshpande method for several solid-state processes at a heating rate of 20 °C/min

Reaction mechanism	E(kJ/mol)	R (a)
Power law	100.807	0.9943
Power law	50.399	0.9943
Phase boundary	95.056	0.9930
Phase boundary	96.442	0.9933
Nucleation and nucleus growth (Arami-eq.1)	184.628	0.9923
Nucleation and nucleus growth (Arami-eq.2)	27.693	0.9922
Nucleation and nucleus growth (Arami-eq.3)	369.266	0.9923
Valensi two-dimentional diffusion	48.950	0.9937
Jander three-dimentional diffusion	47.456	0.9887
Brounshtein-Ginstling three-dimentional diffusion	48.46	0.9934

ıse laboratory space. This study was support-
:d by Thailand research fund (SC 505S207).

Re ferences

[1] K.A.M. Dos Santos, P.A.Z. Suarez and J.C. Rubim, Polym. Degrad. Stab. **90(1)** (2005) 34.
[2] A.G. Chmielewski, M. Haji-Saeid and S. Ahmed, Prog. Radiat. Proc. Polym. **236(1-4)** (2005) 44.
[3] J. Zimmermann, T. Loontjens, B.J.R. Scholtens and M. Rolf, Biomaterials. **25(24)** (2004) 2713.
[4] T. Zaharescu, C. Cazac, S. Jipa and R. Setnescu, Nucle. Instru. Meth. Phy. Res. Sec. B **185(1-4)** (2001)360.
[5] M.T. Ramesan, R. Alex and N.V. Khanh, React. Funct. Polym. **62(1)** (2005) 41.
[6] C. Sirisinha, P. Saeoui and J. Guaysomboon, Polymer **45(14)** (2004) 4909.
[7] M.T. Ramesan, React. Funct. Polym. **59(3)** (2004) 267.
[8] M. Arroyo, M.A. López-Manchado, J.T. Valentín and J. Carretero, Comp. Sci. Tech. **67(7-8)** (2007).
[9] R. Stephen, K. Joseph, R. Oommen and S. Thomas, Comp. Sci. Tech. **67(6)**, (2007) 1187.
10] N. Rattanasom, T. Saowapark, C. Deeprasertkul, Polym. Test **26** (2007) 369.
11] N.M.N. Radhakrishnan, G.V. Thomas and M.R.G. Nair, Polym. Degrad. Stab. **92** (2007) 189.
12] M.J. Fernández-Berridi, N. González, A. Mugica and C. Bernicot, Thermo. Acta. **444(1)** (2006) 65.
13] J. Sharif, W.M.Z.W. Yunus, K.Z. Hj, M. Dahlan, and M.H. Ahmad Polym. Test **24(2)** (2005) 211.
14] U.N. Okwu and F.E. Okieimen, Eur. Polym. J. **37(11)** (2001) 2253.
15] A.P. Mathew, S. Packirisamy and S. Thomas, Polym. Degrad. Stab. **72** (2001) 423.
16] M.M. Hanafi, S.M. Eltaib and M.B. Ahmad, Eur. Polym. J. **36(10)** (2000) 2081.
17] F. Li, D.W. Marks, R.C. Larock and J.U. Otaigbe, Polymer **41(22)** (2000) 7925.
18] S. George, K.T. Varughese, S. Thomas, Polymer **41(14)** (2000) 5485.
19] P. Chiniwalla, Y. Bai, E. Elce, R.A. Shick, S.A. Allen and P.A. Kohl J. Appl. Polym. Sci. **91** (2004) 1020.
20] T.F.A. Haselwander, W. Heitz, S.A. Krugel and J.H. Wendorff, Macromolecules **30** (1997) 5345.
21] G. Myagmarsuren, K.E. Lee, O.Y. Jeong and S.K. Ihm, Polymer **46** (2005) 368.
22] T. Ozawa, Bull. Chem. Soc. Jpn **38** (1965) 1881.
23] A.W. Coats, and J.P. Redfern, Nature **201** (1964) 68.
24] C.D. Doyle, J. Appl. Polym. Sci. **5** (1961) 285.
25] E.L. Charsky and S.B. Warrington, Thermal Analysis-Techniques & Applicaqtions; Eds.; Royal Society of Chemistry: London, 1992; p52.
26] B. Liu, Y. Li, L. Zhang, W. Yan and S. Yao, J. Appl. Polym. Sci. **103** (2007) 3003.
27] S.D. Li, P.H. Yu and M.K. Cheung, J. Appl. Polym. Sci. **80** (2001) 2237.
28] J. Strazko, M. Olszak-Humienik and J. Mozejko J. Thermochim. Acta **292** (1997) 145.

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง ยางธรรมชาติ และพอลีไวนิลแอกอฮอลล์

TO STUDY THE PHYSICAL PROPERTIES OF NATURAL RUBBER-POLYVINYL ALCOHOL BLEND

สอาด ริยะจันทร์[1*], สุวิทย์ ไชยพลบาล [1], ดารารัตน์ ก่อธรรมนิเวศน์[1]

SA-AD RIYAJAN[1], SUWIT CHAICHONBAN[1], DARARANT KOTHAMNIVET[1]

[1]Department of Polymer Science, Faculty of Science, Prince of Songkhla University, Hat Yai, 90112, *saadriyajan@hotmail.com

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้จะศึกษาสมบัติกายภาพของพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติและพอลีไวนิลแอลกอฮอล์ ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ประกอบด้วย สมบัติทางฟิสิกส์ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้จากการศึกษา อย่างเช่น อัตราส่วนของการเบลนด์ ปริมาณสารเชื่อมโยง เป็นต้น เพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มสมบัติดีขึ้นในทุกๆ ด้านโดยการเคลือบแผ่นฟิล์ม จากการศึกษาพบว่ามอดูลัสของพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่างยางธรรมชาติกับพอลีไวนิลแอลกอฮอล์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ทั้งกรดมาลีอิค และ ไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนต ปริมาณการเชื่อมโยงของแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์เบลนด์เพิ่มขึ้นตาม ปริมาณกรดมาลีอิค ไอโซโฟโรน ไดไอโซไซยาเนตและพอลีไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น ผลจากการทดสอบเครื่องทดสอบสมบัติพลวัติเชิงกล (Dynamic mechanical thermal analysis, DMTA) พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับ พอลีไวนิล แอลกอฮอล์ผสมเข้ากันได้ดี

Abstract: This research work involved a study of polymer blends made from natural rubber. The films were characterized for their properties including physical, mechanical, and thermal properties. Some factors affecting film properties were studied such as blend ratios, amount of cross-linking agent, etc. The ultimate goal is to produce a film with good overall properties in order to be used as coating film to prolong shelf life. It was found that modulus properties of the natural rubber and polyvinyl alcohol blend can be improved by adding either maleic acid or isophorone diisocynate. Cross-linking properties of the blend films were increased as function with the maleic acid or isophorone diisocynate and polyvinyl alcohol content. From Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) results, it was found that the natural rubber/PVA blends were miscible.

Introduction: Natural rubber (NR) latex, a renewable polymeric material displaying excellent physical properties, is widely used in the manufacture of thin film products. However, the characteristic property of NR film exhibits soft and tacky and, therefore, the latex must be prevulcanized by sulphur, peroxide or γ-radiation system in order to provide better quality product. The deficient property such as poor oil resistance of NR, even after prevulcanization, is also needed to be improved. Among the chemical modifications, epoxidation is a simple and efficient method for introducing reactive groups and polarity onto polyisoprene backbone [1]. Blending of NR with an appropriate rubber is an important technological process for increasing the oil resistance of NR [2-3]. However, a high proportion of synthetic rubber is normally required for the blending with NR in solid form for satisfactory improvement of oil resistance of NR [2], whereas the use of latex blending would consume less energy and time because there would be no need of mastication. The high polar PVA was preliminary investigated as the agglomerating latex

or shell particles. Oil resistance of films casted from composite NR/PVA latex was investigated.

Methodology: Polymers used in this experiment were 1) polyvinyl alcohol (PVA) (MW=100,000 commercial grade, P&N Associate Co.Ltd.) 2) and natural rubber (local Thailand). Isophorone diisocyate was obtained from Fluka. PVA solution (10% w/v) was prepared in water by heating it on a water bath at 85-90°C under constant stirring. 10% w/w of Teric 16 A (non-ionic surfactant) was added in high ammonia natural rubber (HANR) latex (60% DRC). The various ratios between HANR latex containing Terric 16A and PVA solution in presence of different amounts of maleic acid under continuous stirring for 1 h were carried out. The resulting mixture was cast into a glass plate mold and kept for two days at room temperature and then heated for 12 h at 45 °C. Several blending ratios between NR and PVA (100/0, 80/20 and 60/40 by weight) of the films were done.

The resulting NR/PVA blend film was treated with isoprorone solution containing dibutyl tin laurate as a catalyst. Films properties such as tensile strength, swelling, thermal properties (by DMTA) was then determined.

Results, discussion and conclusions: The natural rubber-polyvinyl alcohol blends were prepared by solution-latex method. The influences of NR-PVA ratio, maleic acid content and isoprorone diisocyanate on the properties of rubber blend were studies. It was found that mechanical properties of the polyvinyl alcohol and natural rubber containing maleic acid can be improved by adding both maleic content and isoprorone diisocynate as shown in Table 1. The degree of cross-linking in a polymer network structure has a great influence on the molecular weight between the cross-links and greatly indicates different properties of a polymer gel, like mechanical strength and swelling ratio. The fraction of the cross-linking agent present in a polymer matrix is the prime controlling parameter for the degree of cross-linking in resultant polymer matrix. Depending upon the selected mode of cross-linking, the cross-link network density will vary with different factors like set reaction parameters, the extent of double-bond conversion, monomer reactivity ratios and reactive functionality of the selected monomers. The interaction of both reactive ends of a cross-linking agent with the same polymeric chain results in a loop-type structure. Such intramolecular cross-linking deteriorates the potentiality of the cross-linking reaction and the resultant polymer produced will not exhibit the desired properties. Hence, a proper balance between the intermolecular cross-linking is very essential to achieve the desired product. Maleic acid treated PVA exhibits intermediate heat stability. It is possible that in this temperature zone the total energy input is inadequate to break the double bond structure of heat-treated samples but it is sufficient to start the degradation of the –C-O- bond of maleic acid treated with PVA. Maleic acid being a difunctional acid may react with thy hydroxyl groups of PVA chains and this results in intermolecular-type ester linkages among them as shown in Figure 1.

Dynamic mechanical properties are most commonly used to characterize polymer blend between PVA and NR. From Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) results, it was found that the NR/PVA blends were miscible. Tg of PVA alone was higher than that of NR alone as shown in Table 2. The NR/PVA films had the highest tensile strength at 60/40 blending ratio with 20% (w/w) maleic acid compared to those of the others. In case of NR/PVA blends, the Tg increases with PVA contents in the blends. In addition, the Tg of NR/PVA blends remarkably increase after treatment with isophorone diisocynate. From DMTA evidence, it was found that the PVA/NR blend were the miscible blend due to single Tg. The NR/PVA films had the highest tensile strength at 60/40 blending ratio with 20% (w/w) maleic acid compared to those of the others. The thermal stability of NR/PVA containing maleic acid blend and reaction between polymer blend with

isoprorone diisocyante as well as swelling in organic solvent would be discussed in presentation.

Table 1 Tensile strength of NR alone and NR/PVA film before and after treatment with isophorone diisocyanate solution containing dibutyl tin laurate

Sample name	Amount of maleic acid % (w/w)	Tensile strength (MPa)	
		Before treatment with isophorone diisocyanate	After treatment with isophorone diisocyanate
NR	0	4.32	4.99
NR/PVA 60:40	0	5.12	8.92
NR/PVA 60:40	10	5.43	9.99
NR/PVA 60:40	20	4.03	11.03
NR/PVA 90:10	10	5.46	12.32

Table 2 Glass transition temperature of NR alone and NR/PVA blend contain different amount of maleic acid before and after diisocyanate observed by DMTA

Sample name	Amount of maleic acid % (w/w)	Tg (°C)	
		Before diisocyanate with isophorone diisocyanate	After diisocyanate with isophorone diisocyanate
PVA	0	32	-
NR	0	-53	-49
NR/PVA 60:40	0	16.34	-
NR/PVA 60:40	10	-52	48
NR/PVA 60:40	20	22	48
NR/PVA 90:10	10	32	49

References:

1. E.B. Denkbasa and M. Odabasi, *J. Appl. Polym. Sci.* 2000, **76**, 1637-1643.
2. C. Xiao, S. Gao, H. Wang, and L. Zhang, *J. Appl. Polym. Sci.* 2000, **76**, 509-515.
3. T. Koyanno, N. Koshizaki, H. Umehara, M. Nagura, and N. Monoura, *Polymer* 2000, **41**, 4461-4465.

Key words: blend, natural rubber, polyvinyl alcohol, maleic acid, crosslinking

Acknowledgements:
The authors are grateful to Prince of Songkla University and Thailand research fund for funding this research.

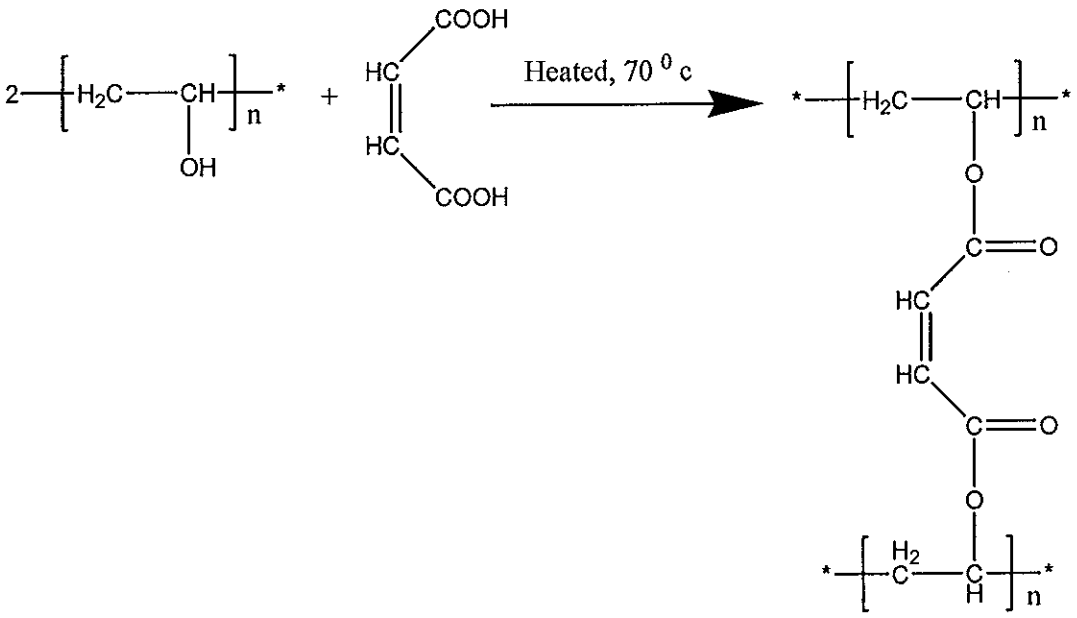


Figure 1 Schematic representation of the reaction between PVA and maleic acid.

Study the Semi-Interpenetrating between Natural Rubber and Polyvinyl Alcohol

Saad Riyajan[1*], Suwit Chaiphonban [1], Dararat Kothamnivet[1], Saengchao Thongseenuch[1]

[1]*Department of Polymer Science, Faculty of Science, Prince of Songkhla University, Hat Yai, (Thailand) 90112.*

*Corresponding author. Tel.: 6674-446925.
E-mail: saadriyajan@hotmail.com

Abstract

Natural rubber is naturally abundant, renewable, and showing many advantages, in which it can be used in several applications. However, this polymer film has some drawbacks including low oil resistance and thermal resistance. This research work involved a study of semi-interpenetrating made from natural rubber and polyvinyl alcohol (PVA) in order to improve properties of these polymer blend films. Then, the films were characterized for their properties including physical, mechanical and thermal properties. Some factors affecting film properties were studied such as blend ratios, amount of cross-linking agent, and factors. The ultimate goal is to produce a film with good overall properties in order to be used as coating film to prolong shelf life. It was found that modulus properties of the natural rubber and polyvinyl alcohol blend can be improved by adding either maleic acid or isophorone diisocyanate. Cross-linking properties of the blend films were increased as the maleic acid and polyvinyl alcohol content was increased. From Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) results, it was found that the natural rubber/PVA blends were miscible.

Keywords: blend, natural rubber, polyvinyl alcohol, maleic acid, crosslinking

Introduction

Natural rubber (NR) latex, a renewable polymeric material displaying excellent physical properties, is widely used in the manufacture of thin film products (Denkbasa, 2000). However, the characteristic property of NR film exhibits soft and tacky and therefore, the latex must be prevulcanized by sulphur, peroxide or γ-radiation system in order to provide better quality product. The deficient property such as poor oil resistance of NR, even after prevulcanization, is also needed to be improved. Among the chemical modifications, epoxidation is a simiple and efficient method for introducing reactive groups and polarity onto polyisoprene backbone (Denkbasa, 2000). Blending of NR with an appropriate rubber is an important technological process for increasing the oil resistance of NR (Xiao, 2000) and (Koyanno et al., 2000). However, a high proportion of synthetic rubber is normally required for the blending with NR in solid form for satisfactory improvement of oil resistance of NR (Xiao,2000) and (Koyanno et al.,2000), whereas the use of latex blending would consume less energy and time because there would be no need of mastication. The polyvinyl alcohol (PVA) has the ability to produce hydrogels and it is widely utilized in biotechnology and the pharmaceutical industry (Víctor et al., 2008). The PVA is industrially manufactured by polymerization of vinyl acetate to polyvinyl acetate, followed by a hydrolysis to PVA with release of the acetate groups. This conversion is not complete, and it is necessary to determine the degree of hydrolysis achieved, because the content of residual acetate groups has serious consequences for the chemical properties, the solubility, and the crystallization of the polymer.

The high polar PVA was preliminary investigated as the agglomerating latex or shell particles. Oil resistance of films casted from composite NR/ PVA latex was investigated. This research work involved a study of semi-interpenetrating made from natural rubber and PVA in order to improve properties of these polymer blend films. The physical property of this sample would be investigated.

Methodology

Polymers used in this experiment were polyvinyl alcohol (PVA); GB-17R with 31.0 mPa.s and natural rubber (local Thailand). Isophorone diisocyanate was obtained from Fluka. Dibutyl tin dilaurate was derived from Aldrich Company. PVA solution (10 % w/v) was prepared in water by heating it on a water bath at 85-90 °C under constant stirring. 2 g of Terric 16A with 10% w/w as a non-ionic surfactant (commercial grade) was added into 20 g of natural rubber latex with 60 % dry rubber content (DRC) under constant stirring for 10 min. Then, the varying amount of maleic acid was added in the natural rubber latex containing Teric 16 A under constant stirring for 20 min. The varying amount of PVA aqueous solution was blended with latex under constant stirring for 30 min. Several blending ratios between NR and PVA (100/0, 80/20 and 60/40 by weight) of the sheets were prepared. Each pair of the blends was shaped into sheet (thickness of 0.5 mm) by latex-solution casting technique. The all samples were cured at 120 °C for 5 h. Then some sample sheets were immersed into isophorone diisocyanate solution containing 2% w/w dibutyl tin dilaurate at 30 °C for 30 min. These samples were cured at 120°C for 1 h. Semi-interpenetrating sample sheets of specific dimensions (2.0x2.0cm^2) and with an average thickness of 0.50 mm were weighted and immersed in many organic solvents for a period of 7 days at 32 °C. The samples were taken out from the organic solvent, wiped with tissue paper, and the dimensions of the swollen samples were measured. The percentage swelling (in area) was calculated. The samples were then dried in an oven at 50 °C for 24 h and weighed till a constant weight was achieved. The degree of swelling ratio was estimated as this equation (1)

$$\text{Swelling ratio} = (W_2 - W_1)/ W_1 \quad \text{.....(1)}$$

Where W_1 = the original weight of the sample

W_2 = the weight of swollen sample

Thermal studies were conducted with Mettler-Toledo instrument (TGA/SDTA 851) analysis the heating rate for the thermo gravimetric analysis of these samples was 10, 15, 20, 25, 30 °C/min. The molecular characteristics of the sample were analyzed using FTIR (Bruker, EQUINOX 55). ATR-FTIR spectra (32 scans with a resolution of 4 cm^{-1}) were recorded by using a ZnSe crystal with multi-reflection mode. Glass transition temperature of the solid polymer materials were measured using Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMA 7 Perkin Elmer) in compression mode with stainless-steel parallel plate probe (1 mm diameter), at 10 Hz, and performed on small samples (10x50x0.5 mm^3) regularly taken from the polymer plate. The dynamic and static forces applied were 1000 and 1100 mN, respectively. Measurements were carried out in the range of -100 to 200 °C, at a rate of 10 °C/min. Modulus of semi-interpenetrating sample was measured according to JIS K6251 using the tensile tester (model Strograph E-L,according to TOYOSEIKI) at a crosshead speed of 500 mm/min with the load cell of 500 N. The sample sheets were cut into a dumb-bell shape with the dimensions according to JIS K6251 No.3. The influence of aging time at 90 °C was studied at various times. At lease 4 specimens were used for each measurement.

Results and Discussion

The semi-interpenetrating of natural rubber-polyvinyl alcohol containing maleic acid was prepared by solution-latex method. The influences of NR-PVA ratio, maleic acid content and isophorone diisocyanate on the properties of rubber blend were studies. The characteristic bands of PVA film appeared at approximately 3340 and

1730 cm^{-1} are due to the OH stretching and bending vibration (Han et al., 2003). The broad high absorption peak at 3340 cm^{-1} is assumed to arise from the O-H stretching frequencies of PVA and water hydroxyl groups. The band at 1730 cm^{-1} was attributed to the carbonyl functional groups due to residual acetate groups remaining after the manufacture of PVA from hydrolysis of polyvinyl acetate or oxidation during manufacturing and processing. The bands appeared at 2941, 1443,1324,1264,and 963 and 843 and 1109 cm^{-1} are attributed to the C-H stretching, C-H bending and C-O stretching of PVA, respectively. In the case of natural rubber, by analyzing the double bond stretching and all of the C-H vibrations, the strong asymmetrical (CH_2) and symmetrical (CH_2) stretching of methylene group vibrations present in NR are observed near 2950 and 2853 cm^{-1}, respectively (Gunasekaran et al., 2007). In spectra of all rubber materials, which contain methyl groups show two distinct bands occurring at around 2964 cm^{-1}. Figure 1 exhibits the plot of IR transmission spectra of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol. The selected PVA has a degree of hydrolysis of 98-99 %. The very strong broad band observed from 3,200 to 3,500 cm^{-1} may be assigned to O-H stretching due to the strong hydrogen bond of intramolecular and intermolecular type. Interaction of PVA with unsaturated ester owing to intermolecular or intramolecule cross-linking of the chains has the expected structure as shown in Figure 2. A transmission peak at 1566 cm^{-1} is a clear indication of the existence of -CO-CH=CH- stretching. This peak corresponds to the result of P. Ray and coworker (Gohil et al., 2006).

The presence of a large number of hydroxyl groups in PVA results for semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol in strong hydrogen bonding (may be of both intermolecular and intramolecular types), which in turn affects the solubility of PVA in water (Han et al., 2003). Maleic acid treated PVA exhibits intermediate heat stability (Gohil et al., 2006). It is possible that in this temperature zone the total energy input is inadequate to break the double bond structure (-C=C-) of heat-treated samples but it is sufficient to start the degradation of the -C-O- bond of maleic acid treated PVA as shown in Figure 2. The presence of acetate groups in partially hydrolyzed polymer weakens the hydrogen bonding and such polymer has

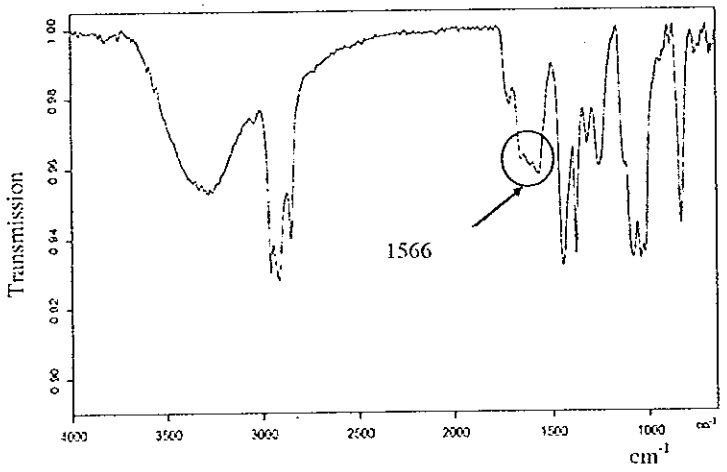


Figure 1. IR spectra of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol with 20 % w/w of maleic acid heated 120 °C for 3 h.

comparatively more water affinity but at the same time a higher content of the acetate group in the polymer imparts hydrophobicity and the polymer becomes less soluble in water (Gohil et al., 2006). For such typical characteristics, the solubility of PVA in water remains a very interesting area of study. The swelling of any polymeric film in a solvent depends upon the diffusion coefficient of the solvent, the relaxation rate of the amorphous regions of the polymer chain and its degree of crystallinity. Polymer gels may be classified into two different categories, i.e., physical gel and chemical gel. In a physical gel the junction points of the network arise owing to physical bonding like Van Der Waals interaction, hydrogen bonding, the presences of crystallites, etc.; hence, in a good solvent such networks exhibit a large extent of volume change owing to facile penetration of solvent (Victori et al., 2008). The PVA selected for the present study possesses a degree of hydrolysis of 98%. The swell ratio of semi-interpenetrating sample could be practically used to approximate the crosslinking density in sample.

The swelling study of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol in different organic solvents is shown in Figure 3. It was found that the swelling of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol blends was lower than that of NR alone due to hydrophilic behavior of PVA. The swelling ratio of NR alone was roughly 100 at all organic solvents. In the case of semi-interpenetrating sample, the swelling ration was between 45 and 80% depending on ratio between polyvinyl alcohol and natural rubber, maleic acid contents and types of organic solvent. The effect of isophorone diisocyanate on the swelling of semi-interpenetrating sample and NR alone is shown in Table 1. It was found that the % swelling of NR alone containing isophorone diisocyanate decrease from 98 to 70 and the swelling of all semi-interpenetrating samples dramatically decreased as shown in Table 1. Before treatment with isophorone diisocyanate, the swell of NR/PVA 60:40 containing 20% was 62, whereas the swelling of this sample with treatment with isophorone diisocyanate was 10%. The possible reaction between polyvinyl NR/PVA film and isophorone diisocyanate is expected as shown in Figure 4.

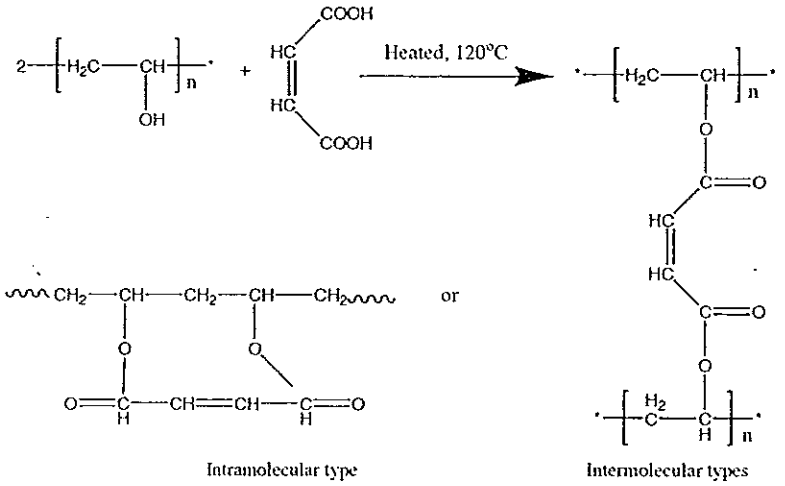


Figure 2. Schematic representation of the possible reaction between PVA and maleic acids (Gohil et al., 2006).

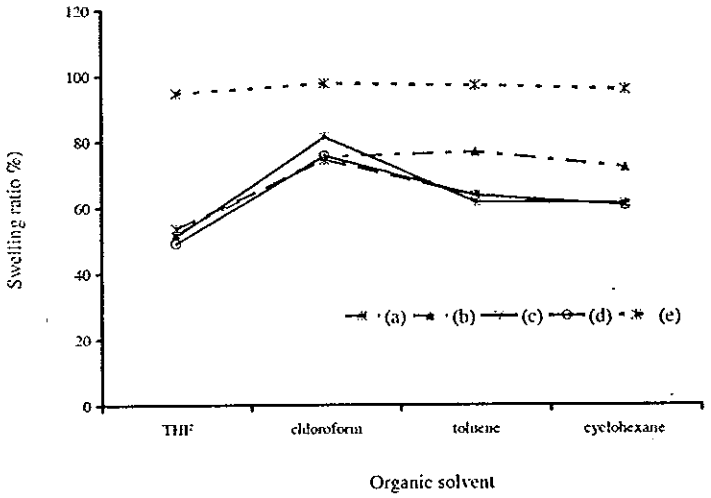


Figure 3. Swelling study of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol in different organic solvents (a) NR/PVA 80/20 containing maleic acid 10% w/w, (b) NR/PVA 60/40 containing maleic acid 10% w/w, (c) NR/PVA 60/40 containing maleic acid 20% w/w, (d) NR/PVA 60/40 containing maleic acid 0% w/w and (e) NR alone

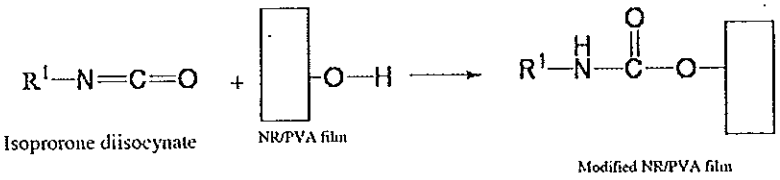


Figure 4. Possible reaction between polyvinyl NR/PVA film and isophorone diisocyanate.

Table 1 Swelling study of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol in different organic solvents, before and after treatment with isophorone diisocyanate containing 2% Dibutyl tin dilaurate

Sample name	Amount of maleic acid % (w/w)	Swelling ratio in toluene	
		Before treatment with isophorone diisocyanate	After treatment with isophorone diisocyanate
NR	0	98±5	70±5
NR/PVA 60:40	0	72±5	45±5
NR/PVA 60:40	10	78±4	15±5
NR/PVA 60:40	20	62±5	10±5
NR/PVA 80:20	10	83±4	30±5

Figure 5 shows the differential thermogravimetric analysis of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol blends at different frequencies. It is clear that the maximum peak loss shift was a function with heating rates. The maximum of weight loss of (NR/PVA 60/40 containing 20% w/w was found at 380°C and 10°C/min of heating rate.

At 100% strain, the modulus of the semi-interpenetrating sample and NR alone was studied at various aging time, as given in Table 2. It was clear that the modulus of semi-interpenetrating sample was higher than that of NR alone under aging times. The modulus of NR alone was about 0.40 MPa under various aging times, whereas the modulus of semi-interpenetrating sample was between 1.2 and 1.8 MPa. It was implied that the affecting polyvinyl alcohol sample contained semi-interpenetrating sample. The modulus of polyvinyl alcohol was higher than that of the NR sample. In addition, the modulus of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol was more little increased due to aging time.

It was found that mechanical properties of the polyvinyl alcohol and natural rubber containing maleic acid can be improved by adding both maleic content and isophorone diisocynate as shown in Table 3. The degree of cross-linking in a polymer network structure has a great influence on the molecular weight between the cross-links and greatly indicates different properties of a polymer gel, like mechanical strength and swelling ratio. The fraction of the cross-linking agent present in a polymer matrix is the prime controlling parameter for the degree of cross-linking in resultant polymer matrix. Depending upon the selected mode of cross-linking, the cross-link network density will vary with different factors like set reaction parameters, the extent of double-bond conversion, monomer reactivity ratios and reactive functionality of the selected monomers. Cross-linking may be of both intramolecular and intermolecular type (Gohil et al., 2006). The interaction of both reactive ends of a cross-linking agent with the same polymeric chain results in a loop-type structure. Such intramolecular cross-linking deteriorates the potentiality of the cross-linking reaction and the resultant polymer produced will not exhibit the desired properties. Hence, a proper balance between the intermolecular and intramolecular cross-linking is very essential to achieve the de-

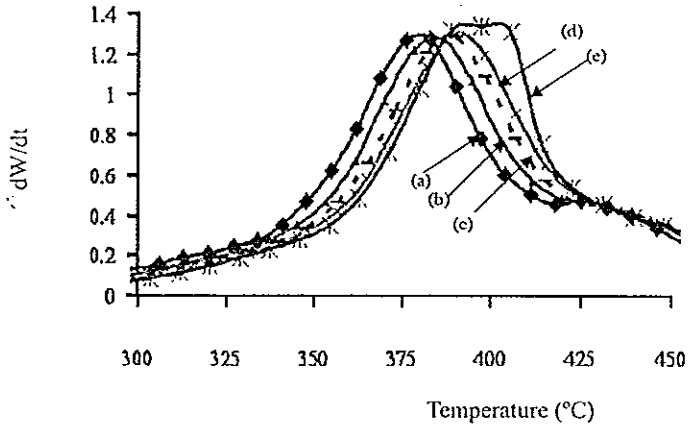


Figure 5. Differential thermogravimetric analysis of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol (NR/PVA 60/40 containing 20% w/w) at different heating rates, (a) 10 (b) 15, (c) 20, (d) 25 and (e) 30°C/min.

Table 2 100% Modulus of semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol at 90 °C with different aging times

Aging time (h)	100 % Modulus (MPa)				
	NR	NR/PVA 80/20 maleic acid 10%w/w	NR/PVA 60/40 containing different maleic acid contents (%w/w)		
			0	10	20
0	0.25±0.05	1.25±0.5	1.45±0.5	1.35±0.4	1.50±0.3
1	0.24±0.03	1.38±0.3	1.46±0.3	1.52±0.2	1.51±0.3
3	0.25±0.01	1.56±0.04	1.46±0.04	1.44±0.06	1.51±0.03
5	0.24±0.02	1.75±0.02	1.43±0.02	1.60±0.02	1.53±0.02
9	0.24±0.05	1.65±0.5	1.50±0.5	1.48±0.5	1.65±0.4
12	0.25±0.03	1.45±0.03	1.58±0.3	1.50±0.3	1.68±0.5
24	0.25±0.03	1.75±0.03	1.62±0.3	1.75±0.3	1.82±0.2

Table 3 Tensile strength of NR alone and semi-interpenetrating NR and PVA before and after treatment with isophorone diisocyanate

Sample name	Amount of maleic acid % (w/w)	Tensile strength (MPa)	
		Before treatment with isophorone diisocyanate	After treatment with isophorone diisocyanate
NR	0	4.32	4.99
NR/PVA 60:40	10	5.43	9.99
NR/PVA 60:40	10	4.03	11.03
NR/PVA 90:20	20	5.46	12.32

sired product. Maleic acid treated PVA exhibits intermediate heat stability. It is possible that in this temperature zone the total energy input is inadequate to break the double bond structure of heat-treated samples but it is sufficient to start the degradation of the -C-O- bond of maleic acid treated with PVA.

Dynamic mechanical properties are most commonly used to characterize interpenetrating polymer (Dean et al., 2006). The dampling (dissipation factor Ee″/E′ or tanδ) curve goes through a maximum and then decreases as the temperature increases. In the glass-rubber transition region the damping (tanδ) curve goes through a maximum. Dynamic mechanical properties are most commonly used to characterize semi-interpenetrating sample. From DMTA results, it was found that the NR/PVA blends were miscible. Tg of PVA alone was higher than that of NR alone as shown in Table 4. In case of NR/PVA blends, the Tg increases with PVA contents in the blends. In addition, the Tg of NR/PVA blends remarkably increase after treatment with isophorone diisocyanate. The NR/PVA blend sheets had the highest tensile strength at 60/40 blending ratio with 20% (w/w) maleic acid compared to those of the others. It was found that the NR/PVA blends at 60/40 showed the optimum thermal stability.

Table 4 Glass transition temperature of NR alone and semi-interpenetrating NR/PVA containing different amounts of maleic acid before and after treatment with isophorone diisocyanate observed by DMTA

Sample name	Amount of maleic acid % (w/w)	Tg (°C)	
		Before treatment with isophorone diisocynate	After treatment with isophorone diisocyanate
PVA	0	32	33
NR	0	-53	-49
NR/PVA 60:40	0	16	48
NR/PVA 60:40	10	-52	48
NR/PVA 60:40	20	22	48
NR/PVA 80:20	10	32	49

Conclusions

The semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol blends containing maleic acid and isophorone diisocyanate was achieved. The modulus properties of the natural rubber and polyvinyl alcohol blend can be improved by adding maleic acid as catalyst. The maximum for tensile strength of semi-interpenetrating NR/PVA 60/40 containing 20 %w/w maleic acid was observed. Cross-linking properties of semi-interpenetrating sheets were increased by addition of maleic acid content and treatment with isophorone diisocynate.

Acknowledgements

The authors are grateful to Prince of Songkla University (SCI111990038S) for funding this research.

References

Dean, K.M., Cook W.D. and Lin, M.L. 2006. Small angle neutron scattering and dynamic mechanical thermal analysis of dimethacrylate/epoxy IPNs. European Polymer Journal. 42:2872-2887.

Denkbasa, E.B. 2000. Chitosan microspheres and sponges: Preparation and characterization. Applied Polymer Science.76:1637-1638.

Gohil, J.M., Bhattacharya, A., and Ray, P. 2006. Studies on the crosslinking of poly(vinyl Alcohol). Journal Polymer Research. 13:161-169.

Gunasekaran, S., Natarajana, R.K. and Kalab, A. 2007. FTIR spectra and mechanical strength analysis of some selected rubber derivatives. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 68:323-330.

Han, B., Li, J. Chen, C., Xu, C. and Wickramasinghe, S.R. 2003. Effects of degree of formaldehyde acetal treatment and maleic acid crosslinking on solubility and diffusivity of water in PVA membranes. Chemical Engineering Research and Design. 81:1385-1392.

Koyanno, T., Koshizaki, N., Umehara, H., Nagura, M. and Monoura, N. 2000. Surface states of PVA/chitosan blended hydrogels. Polymer. 41:4461-4465.

Victor, D.M., Luis R.P. and Mirta N.B. 2008. Polyvinyl alcohol-polyethylenglycol blends with tungstophosphoric acid addition: synthesis and characterization. Matereial Chemistry and Physics. 108:331-336

Xiao, C.S. 2000. Blend films from chitosan and konjac glucomannan solutions.Applied Polymer Science.76:509-513.

Preparation and characterization of semi-interpenetrating polymer network based on NR/PVA and ENR/PVA

Suwit Chaiponban[1], Sa-Ad Riyajan[1*]

[1]Polymer Science Program, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90112, Thailand, *Corresponding author. Ph: 074-446925; Email: saadriyajan@hotmail.com

Abstract

The semi-interpenetrating polymer network (semi-IPN) based on natural rubber/poly (vinyl alcohol) (NR/PVA) or epoxidized natural rubber/poly (vinyl alcohol) (ENR/PVA) system has been investigated in details. The semi-IPN were prepared using NR latex or ENR latex, PVA solution and maleic acid as the cross-linker and cross-linking of PVA using maleic acid by heat to give the semi-IPN sample. Solubility of semi-IPN based on NR/PVA and ENR/PVA in water and toluene were decreased with increasing maleic acid content due to crosslink between PVA and maleic acid. It is surprised that the tensile strength of semi-IPN ENR/PVA was 32 MPa after crosslinked with maleic acid of 60% w/w. The contact angle value of semi-IPN ENR/PVA increased with increasing maleic acid content. ATR-FTIR study indicated the presence of an ester linkage in maleic acid crosslinked with semi-IPN sample. The morphology of the semi-IPN sample observed by scanning electron microscopy and atomic force microscopy exhibited miscible blend.

Keywords: Maleic acid, Natural rubber, Epoxidized natural rubber, Poly (vinyl alcohol), Crosslink

1. Introduction

Interpenetrating polymer networks (IPNs) are a kind of polymer blends in network form in which at least one component is polymerized and/or crosslinked in the presence of the other [1]. IPNs consist of two or more polymers in network form, held together by permanent entanglements, with no more than a few accidental covalent bonds between chains of the two different types of polymers. IPNs mostly possess enhanced physical properties as compared to the normal polymer blends of their components [2]. In this way, unique properties can be achieved with these biomaterials, electronic materials, membrane materials, conducting polymer and other applications [3-5].

In the present study, semi-IPNs from NR/PVA and ENR/PVA by using maleic acid as crosslinker for PVA, amount of crosslinking agent was varied at 10, 20, 30, 40, 50 and 60 percent of PVA. Semi-IPN samples have been prepared from NR having good elastic and damping properties and PVA, which is hydrophilic plastic and biodegradable polymer. After the phase of PVA in semi-IPN sample is crosslinked with maleic acid, the formed product posses good strength, hydrophilicity and hydrophilicity. Swelling properties in water and toluene have been studied in detail. The tensile strength, 100 % modulus and % elongation at break were determined. Interaction between PVA and maleic acid were confirmed by ATR-FTIR. The mophology of

semi-IPNs was studied using scanning electron microscopy and atomic force microscopy.

2. Experimental

High ammonia latex natural rubber (HA NR, Chalong Latex Industry Co.,Ltd.), hydrogen peroxide (Riede-de Haen Co.,Ltd., Germany), formic acid (Riede-de Haen Co.,Ltd., Germany), poly(vinyl alcohol) (PVA, Nippon Gohsei Co.,Ltd., Singapore), terric 16A-16, maleic acid (MA, Fluka Co.,Ltd., Switzerland), all of A.R. grade were used for the present study.

PVA solution (20% w/v) was prepared in Millipore water by heating it on a water bath at 70°C under constant stirring. The desired amount of maleic acid (dose varied from 10 to 60% wt) was mixed with mixture between NR latex and PVA solution (NR latex/PVA: 60/40) with the help of a mechanical stirrer. The mixture was poured on glass sheet substrates. The samples was dried at ambient temperature and subsequently cured in an oven by the curing time for 60 min at 120°C.

In case of epoxidized NR, preparation of epoxidized NR latex obtained from NR latex (96.3 g) having 20% DRC was mixed with a nonionic surfactant, Terric 16A-16 at room temperature under stirring for 1 h. The mixture was neutralized and then acidified by adding 85% formic acid (22 g) 30% aqueous solution of hydrogen peroxide (88 mL) was added into the mixture at 50°C within 15–20 min and then the epoxidation was carried out at 50 °C for 2.5 h and gave the ENR having 20% of epoxide content which was used in the study. Preparation of ENR with PVA blend similar to NR with PVA

Polymer blend was characterized by FTIR spectrometer. Tensile testing of the modified rubber was measured according to ASTM D412-98a at a crosshead speed of 500 mm/min with the load cell of 100 N. The surface morphologies of samples after fractured the films in nitrogen were studied under SEM and AFM. PVA films of specific dimensions (2.5 cm × 2.5 cm) and with an average thickness of 0.5 mm were weighed and immersed in Millipore water for a period of 5 days at 32°C. The percentage solubility was calculated. The samples were then dried in an oven at 50°C for 24 h weighed till a constant weight was achieved. The percentage solubility was calculated as $(W-W_1)/W$, where W is the original weight of the sample and W_1 is the weight of the swollen sample and dried. The water contact angle of sample was also investigated in this work.

3. Results and discussion

Figure 1 reflects the ATR-FTIR spectrum of ENR/PVA M40 (with 40% maleic acid) and ENR/PVA M40w (with 40% maleic acid) after swelling test. Interaction of PVA with unsaturated maleic acid results in the formation of unsaturated ester owing to intermolecular or intramolecular cross-linking of the chains. Maleic acid crosslinked PVA has C=O and C-O-C linkages, which support cross-linking of PVA due to the ester linkage formed between maleic acid and PVA. A transmission peak at 1,663 cm^{-1} for C=O and 1,152 cm^{-1} for C-O-C linkages are clear indication of the existence of ester linkage [6].

The chemical stability of the maleic acid crosslinked ENR/PVA having different maleic acid contents and cured at 120 °C for 60 min was studied in water and toluene by keeping the samples immersed in solvents for 5 days. Both excess maleic acid and PVA dissolved in water while unphysically crosslinked epoxidized natural rubber dissolves in toluene. This implied that

solubility of semi-IPN ENR/PVA sample is an opposite of chemical stability (stability α 1/solubility). Semi-IPN ENR/PVA sample showed lower weight loss after cured by using maleic acid (Figure 2) comparing to the other sample without cure This indicates the stability of semi-IPN ENR/PVA networks in the test solvents.

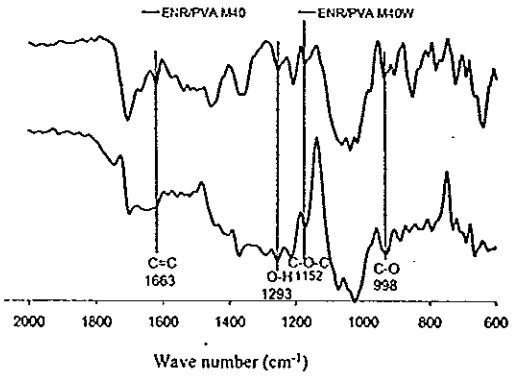


Figure 1. ATR-FTIR spectra of ENR/PVA M40 and ENR/PVA M40w (M is referred to maleic acid).

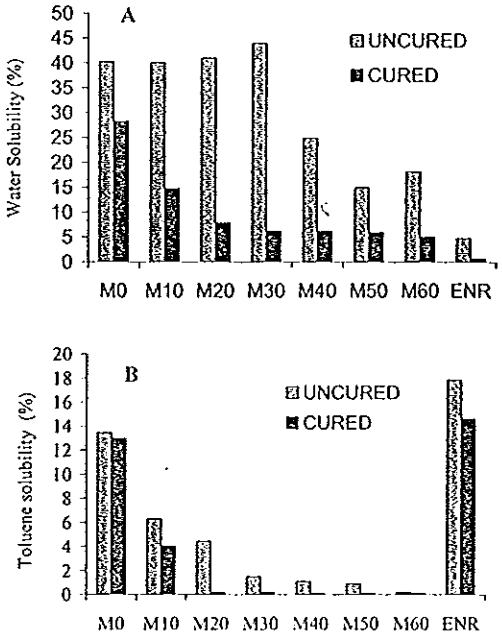


Figure 2. Solubility of semi-IPN ENR/PVA with different maleic acid contents, A water solubility and B toluene solubility.

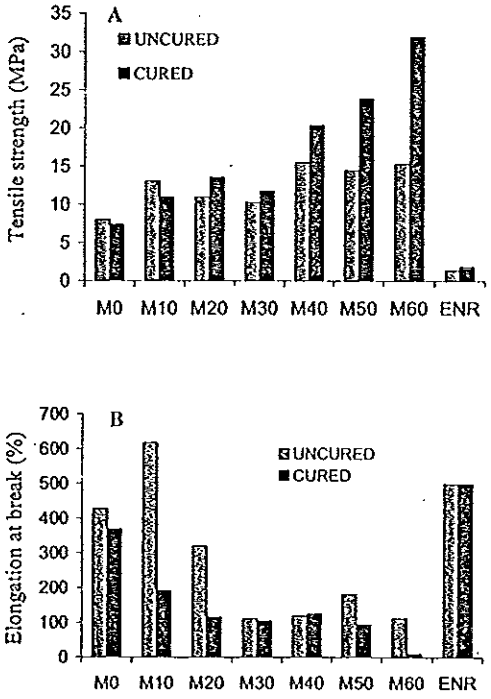


Figure 3. Mechanical properties of semi IPN ENR/PVA in the presence of different maleic acid contents A tensile strength and B elongation at break.

Tensile strength of semi-IPN sample increased as a function of cured time and dose maleic acid but the elongation at break of these sample decreased with increasing amounts of maleic acid are presented in Figure 3. This might be used as an evidence that crosslink affected bulk properties. It could be noticed that the tensile strength of semi-IPN ENR/PVA obtained from 60%w/w maleic acid was 32 MPa but % elongation at break of this sample was low value (113 %).

This can be explained that certain amount of cross-linked of PVA were generated by activation of the double bond of maleic acid during cure. It should be emphasized that both the values of tensile strength and elongation at break of semi-IPN NR/PVA blend cured was in

acceptable range. The water contact angle of NR, ENR and semi-IPN NR/PVA and semi-IPN ENR/PVA with different amount of maleic acid showed in Figure 4. It was clearly observed that the contact angle of NR decreased from 79 to be 60° value when modified NR to ENR. The decrease of the contact angle indicated the presence of polar groups possibly resulted from reaction of epoxidation of NR. The contact angle of semi-IPN ENR/PVA blend without maleic acid was 48° while the contact angle of crosslinked semi-IPN ENR/PVA increased with increasing maleic acid content due to reaction of maleic acid with hydroxyl content in PVA which confirmed by Figure 1.

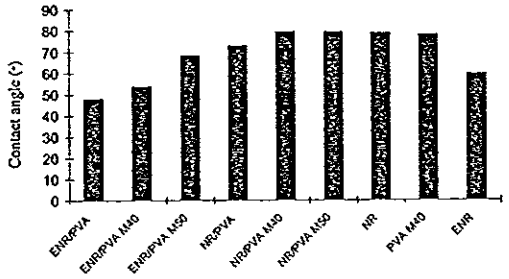


Figure 4 Water contact angle with NR, ENR, semi-IPN NR/PVA and semi-IPN ENR/PVA in the presence of different maleic acid contents.

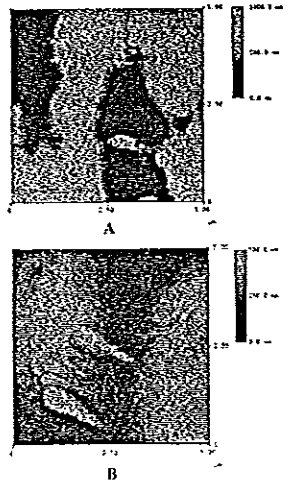


Figure 5. Atomic force micrographs of cured semi-IPN ENR/PVA in the presence of maleic acid (M). A 0% and B 40%.

Three dimensional AFM topographic deflection images (scan area 5 x 5 μm) of semi-IPN ENR/PVA M0 and semi-IPN ENR/PVA M40 showed in Figure 5. The topographic images shows heterogeneous phase structure i.e., the co-continuous darker color regions dispersed in continuous regions of brighter color. Given that these two polymers are incompatible, it is not surprising that there are two distinct phases but semi-IPN ENR/PVA with 40 % w/w of maleic acid showed the increasing continuous phase in Figure 5B.

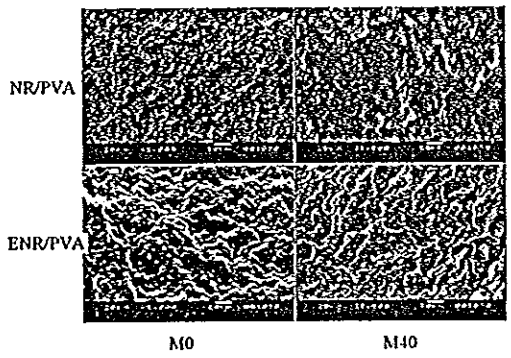


Figure 6. SEM micrographs of semi-IPNNR/PVA with and semi-ENR/PVA.

The phase morphology of semi-IPN NR/PVA and ENR/PVA at varying maleic acid as shown in Figure 6 was observed from scanning electron microscopy. It was found that the morphology of semi-IPN NR/PVA and semi-IPN ENR/PVA showed the continuous phase and distinct layered morphology. In addition, the semi-IPN sample showed roughness arises, at increasing maleic acid and a definite structural pattern arises in the samples of semi-IPN NR/PVA and semi-IPN ENR/PVA with maleic acid, which is somewhat similar to the dense layer morphology.

4. Conclusion

Semi-IPN polymer network was successfully prepared from NR/PVA and ENR/PVA with maleic acid as crosslinking. Maleic acid has been effectively used as a cross-linker of this system when used maleic acid content at 40-50% (w/w). Semi-IPN was very low soluble in water and toluene and good mechanical properties referred to crosslinking reaction formation. Particularly, it is noted that tensile strength of semi-IPN ENR/PVA with 60% maleic acid was 32 MPa.

Acknowledgements

The author would to thank Graduate School Prince of Songkla University and Polymer Science Program, Faculty of Science, Prince of Songkla University (SC 505S207) for financial support.

References

[1] Prashantha KV. Bull Mater Sci, 24,535–8 (2001).

[2] Vilas A, Sachin R. Transparent. Phys Chem, 2,1249–54 (2000).

[3] Diez-Pena E, Quija-Garido I, Frutos P. Macromolecules, 35, 2667–75 (2002).

[4] Long Y. Chiang, Lee Y. Wang, C. S. KUO, J. G. Lin, and C. Y. Huang. Synthetic Metals, 84, 721-724 (1997).

[5] N.R. Singha, S. Kar, S. Ray, S.K. Ray. Chemical Engineering and Processing (2009)

[6] S. Majumdar, B. Adhikari. Sensors and Actuators, B 114, 747–755 (2006).

เรื่อง : ดร.สอาด วิยะจันทร์* เกษสุริยา ไชยพลมาล**

การพัฒนาดัดแปรพิวยางธรรมชาติในรูปแผ่น

ความสำคัญของยางธรรมชาติหรือยางพาราที่เป็นพืชเศรษฐกิจอันดับหนึ่งของไทยนั้น ครองปริมาณส่งออกยางดิบตลอดมา โดยในระยะ 3 ปีที่ผ่านมาเฉลี่ยแล้วประมาณปีละ 2,000,000 เมตริกตัน หรือคิดเป็นมูลค่าไม่ต่ำกว่าปีละ 150,000 ล้านบาท และหากรวมผลิตภัณฑ์ยางด้วยก็มีมูลค่าประมาณ 250,000 ล้านบาท ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาคุณภาพยางธรรมชาติให้ดีขึ้นย่อมเป็นการเพิ่มมูลค่าได้อย่างมหาศาล รูปที่ 1 แสดงต้นยางพารา และลักษณะของน้ำยางที่ได้จากต้นยางพารา



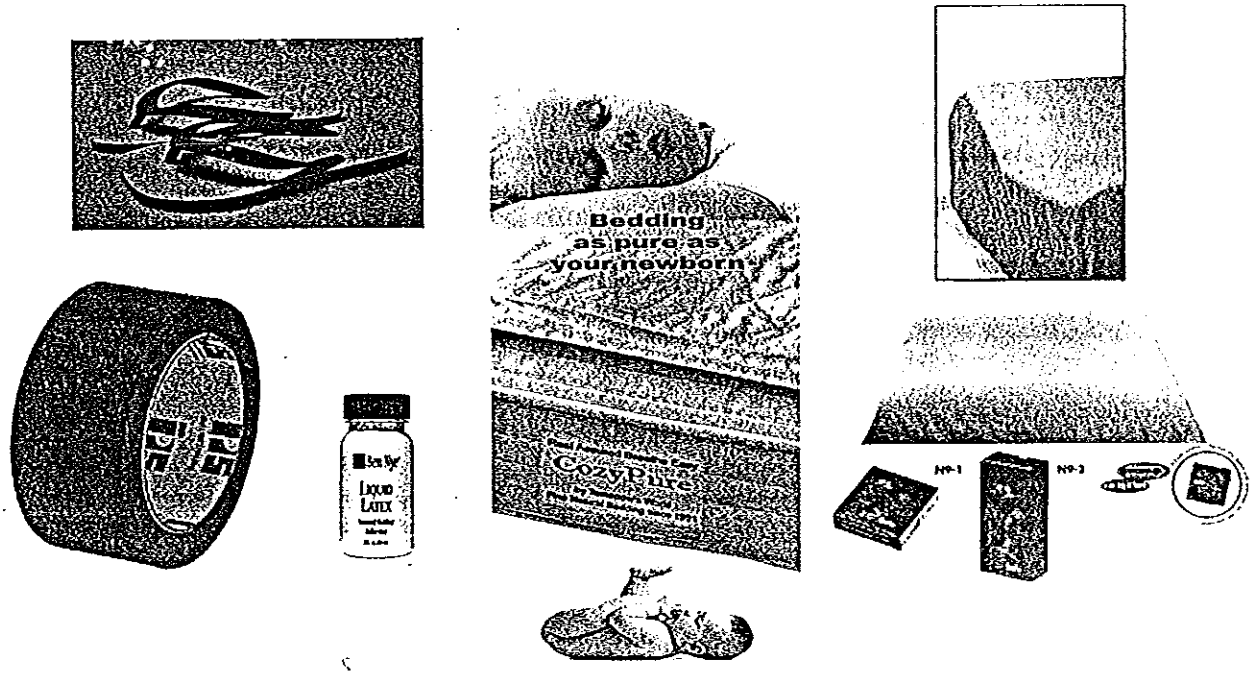
รูปที่ 1 ต้นยางพารา และลักษณะของน้ำยางที่ได้จากต้น

ยางธรรมชาติมีลักษณะเด่นคือ จัดว่าเป็นยางอเนกประสงค์ที่สามารถใช้ได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งด้านอุตสาหกรรม การแพทย์หรือในครัวเรือน และมีความพร้อมใช้ทั้งในรูปของน้ำยาง และยางแห้ง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีคือ ทนต่อแรงดึงได้ดีมาก เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความบาง แต่แข็งแรง เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย เป็นต้น ยังมีราคาถูกกว่ายางสังเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติมีคุณสมบัติบางประการที่ก่อให้เกิดปัญหาสำคัญ ได้แก่ การก่อให้เกิดภูมิแพ้ชนิดเฉียบพลัน และความปรวนแปรในคุณสมบัติของยาง อาทิ ความบริสุทธิ์ของยางธรรมชาติที่ขึ้นอยู่กับปริมาณสารที่ไม่ใช่ยาง ความหนืดและความยืดหยุ่นซึ่งมีผลต่อความสามารถในการนำไปใช้งาน โดยมักจะพบว่า ถ้าเก็บยางไว้เป็นเวลานาน จะทำให้ความยืดหยุ่นเหนียวของยางเสียไป เป็นต้น

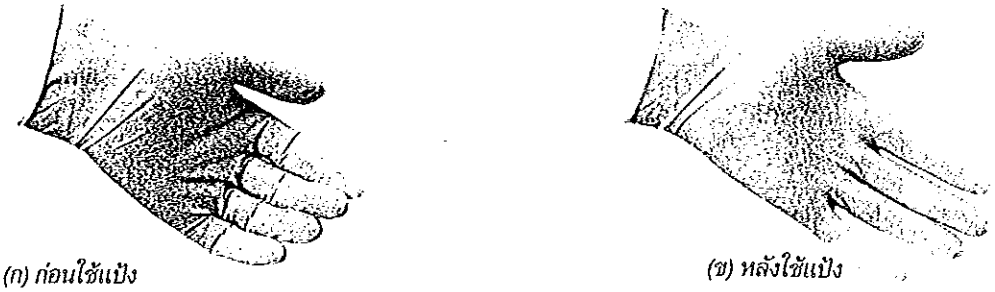
*อาจารย์ ระดับ 6 ภาควิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
**นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ในปัจจุบันนี้ยางธรรมชาติที่ใช้ในรูปของน้ำยางถูกใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น ถุงมือตรวจสอบหรือผ่าตัด ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง อุปกรณ์ทางการแพทย์ วัสดุทางการแพทย์ และอื่น ๆ อีกมาก รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ทำมาจากน้ำยางธรรมชาติ เช่น รองเท้าฟองน้ำจากยางธรรมชาติ ที่นอนจากยางธรรมชาติ เทปกาวจากยางธรรมชาติ ตุ๊กตาเด็กเล่นจากยางธรรมชาติ ถุงยางอนามัยจากยางธรรมชาติ เป็นต้น

เนื่องจากยางธรรมชาติมีคุณสมบัติที่ดีในด้านของความยืดหยุ่น ความทนทานต่อการหักงอ และความทนทานต่อการฉีกขาด เป็นต้น อย่างไรก็แล้วแต่ ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติข้อด้อย เช่น การทนความร้อนและแสงต่ำ โปรตีนที่ตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดอาการแพ้ต่อผู้ใช้ ความลื่น การยึดติดกันระหว่างผิวยาง และความไม่สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ (Biocompability) รูปที่ 3 แสดงปัญหาการยึดติดของถุงมือยางธรรมชาติ แสดงการแก้ปัญหาในเรื่องของการเหนียวติด โดยการใช้แป้ง โดยรูป ก. ก่อนการใช้แป้ง และ รูป ข. หลังการใช้แป้ง พบว่า รูปที่มีการใช้แป้งสามารถลดการเหนียวติดได้คือมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ แต่มีปัญหาก็คือ เมื่อใช้เป็นระยะเวลานานจะทำให้แป้งนี้หลุดออกไป จึงมีความน่าสนใจที่จะปรับปรุงคุณสมบัติให้สามารถใช้งานได้ในระยะยาว



รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของยางธรรมชาติ



(ก) ก่อนใช้แป้ง *(ข) หลังใช้แป้ง*

รูปที่ 3 แสดงปัญหาการยึดติดของถุงมือยางธรรมชาติ (ก) ก่อนใช้แป้ง และ (ข) หลังใช้แป้ง

ดังนั้น การวิจัยและพัฒนาเพื่อดัดแปรผิวยางธรรมชาติจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อแก้ข้อด้อยของยางธรรมชาติดังกล่าว ทำให้ยางธรรมชาติมีคุณภาพดีขึ้น สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น

วิธีการในการปรับปรุงผิวยางธรรมชาติ

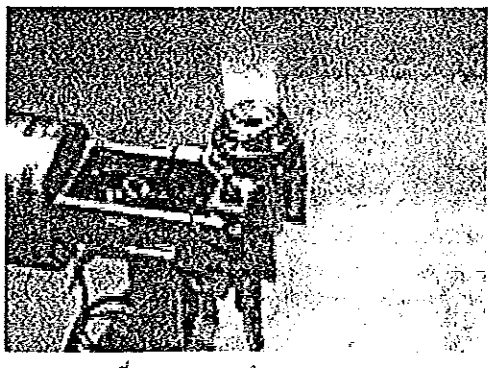
มีหลายวิธีดังนี้

1. การใช้เปลวไฟ (Flame treatment)
2. การใช้โลหะเคลือบ (Metal deposition)
3. การใช้สารเคมี (Chemical treatment)
4. การใช้โคโรน่า (Corona discharge)
5. การใช้รังสี (Irradiation)
6. การกราฟต์ (Graft copolymerization)

รายละเอียดแต่ละวิธีสามารถกล่าวโดยสรุปดังต่อไปนี้

1. การใช้เปลวไฟ (Flame treatment)

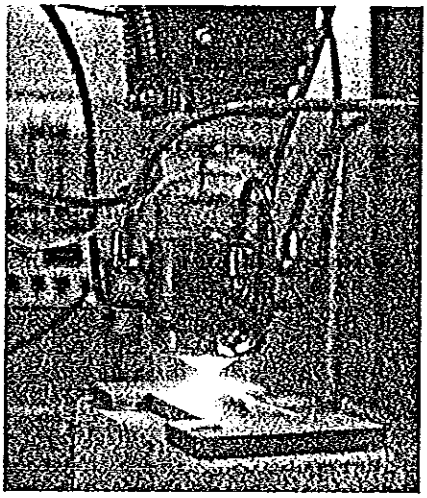
เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ปรับปรุงผิวของพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มความเป็นขั้ว (Hydrophilic) ให้กับพื้นผิวของพอลิเมอร์ แม้จะเป็นวิธีการที่ง่ายแต่ก็ต้องมีความชำนาญจึงจะได้ผลดี การออกซิเดชันที่ผิวของพอลิเมอร์จากการทำ Flame treatment ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ มากมาย เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอนิล (=C=O) และคาร์บอกซิล (-COOH,-COOR) การเกิดออกซิเดชันที่ผิวเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์อื่นจากการกระตุ้นโดยไฟ ประสิทธิภาพของ Flame treatment ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอากาศกับก๊าซ อัตราการให้อากาศกับก๊าซ ระยะห่างระหว่างไฟกับวัตถุ ระยะเวลาในการปรับปรุง และชนิดของก๊าซ ข้อด้อยของเทคนิคนี้คือ มีข้อจำกัดใช้ได้กับวัตถุขนาดเล็ก และต้องมีทักษะและความชำนาญ ดังรูปที่ 4 การดัดแปรผิวของพอลิเมอร์โดยวิธีการใช้เปลวไฟ



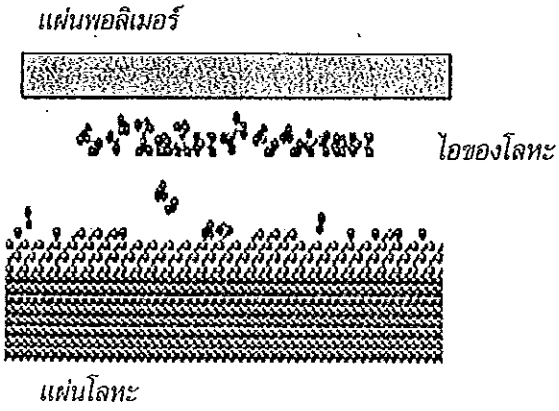
รูปที่ 4 แสดงการทำ Flame treatment

2. การใช้โลหะเคลือบ (Metal deposition)

การใช้โลหะเคลือบสามารถช่วยในการปรับปรุงผิว เช่น การนำไฟฟ้า วิธีการนี้เริ่มต้นพัฒนาต้นทศวรรษที่ 70 และยังคงใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม โดยทั่วไปมี 2 วิธีการใหญ่ ๆ คือ วิธี Electroless plating และ *Vacuum* deposition การเคลือบโลหะโดย Electroless plating แตกต่างจาก Electro plating การให้อิเล็กตรอนโดยวิธี Electroless plating ใช้สารเคมีที่ให้ประจุ (Chemical reducing agent) ในรูปของสารละลาย ขณะที่ Electroplating ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานจากภายนอก เช่น แบตเตอรี่ นอกจากนี้ Electroless plating สามารถประยุกต์ใช้กับสารที่ไม่นำไฟฟ้า เช่น พอลิเมอร์และเซรามิก



รูปที่ 5 แสดงการทำ Metal deposition

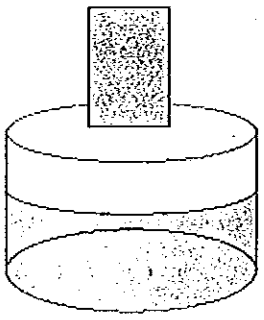


รูปที่ 6 แสดงลักษณะการเกิด Metal deposition

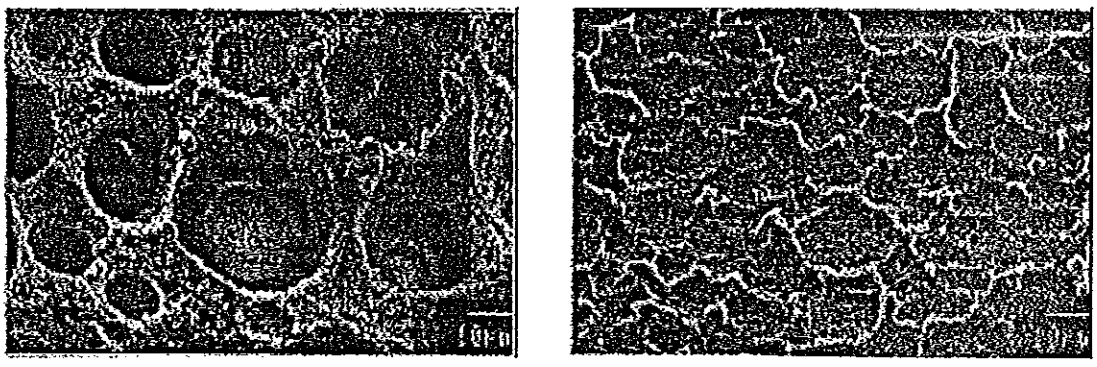
เทคนิค *Vacuum* deposition ที่ใช้กันมากที่สุดคือ การทำให้ระเหยเป็นไอ (Evaporation) และการพ่น (Sputtering) วิธีการทำให้ระเหยเป็นไอให้ความร้อนแก่โลหะ โดยนำอิเล็กตรอน (Electron beam) ไปเคลือบบนผิว ระบบนี้กระทำภายใต้สภาวะสุญญากาศ (ระหว่าง 10^{-5}–10^{-6} torr) และอัตราการให้โลหะตั้งแต่ 100 – 250,000 A^{o}/min แม้ว่าวิธีการนี้จะดีเยี่ยม แต่ต้องทำในสภาวะสุญญากาศ ทำให้ค่าใช้จ่ายโดยเทคนิคนี้มีราคาแพง จึงนิยมใช้กันในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เท่านั้น

3. การใช้สารเคมี (Chemical treatment)

เป็นวิธีการที่ใช้กันมากโดยทั่วไปในการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์ วิธีการนี้ทำได้ตั้งแต่ทำให้ผิวเรียบเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic polymer) จนไปถึงการทำให้ผิวมีลักษณะขรุขระเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic polymer) โดยการออกซิเดชันที่ผิว และสลายตัวในส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ดังรูปที่ 7 แสดงการปรับปรุงผิวโดยวิธีนี้ นิยมใช้กับวัตถุขนาดใหญ่และมีปริมาณมากที่ไม่สามารถปรับปรุงผิว โดยวิธีการอื่นได้ในอุตสาหกรรม วิธีการขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปใช้กรดแก่ เช่น กรดโครมิก



รูปที่ 7 แสดงการปรับปรุงผิวของพอลิเมอร์ โดยวิธี Chemical treatment



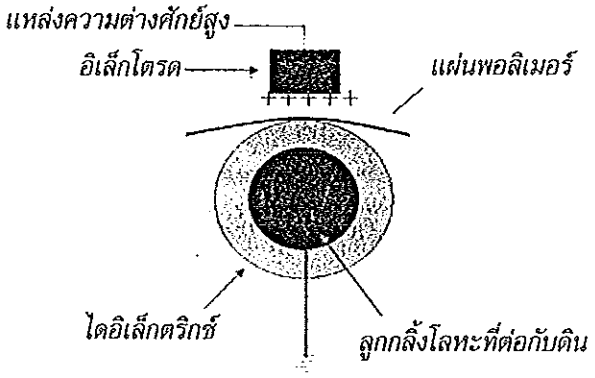
(ก) (ข)

รูปที่ 8 แสดงการปรับปรุงผิวด้วยกรดซัลฟูริค (ก) Poly (Sulfone) (ข) Poly (Ether ketone)

4. การใช้โคโรน่า (Corona discharge)

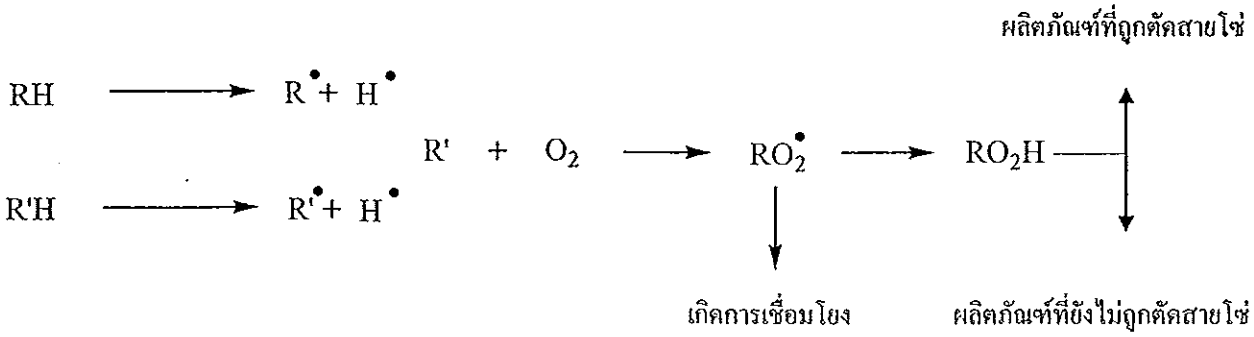
Corona discharge เป็นวิธีการที่เป็นที่ยอมรับเป็นอย่างดีในการปรับปรุงแผ่นฟิล์มพอลิโอลีฟินส์ในโรงงานอุตสาหกรรม เทคนิคนี้ใช้เป็นหลักในอุตสาหกรรมพลาสติก เพื่อปรับปรุงการเกาะติดของแผ่นฟิล์มพอลิโอลีฟินส์ อุปกรณ์ในการทำ Corona treatment ติดตั้งได้ง่ายและคุ้มค่าการลงทุน ประกอบด้วยแหล่งให้ความต่างศักย์ และความถี่สูง ขั้วไฟฟ้า และลูกกลิ้งโลหะที่เคลือบด้วยฉนวนไฟฟ้า ดังรูปที่ 9

การปรับปรุงผิวด้วย Corona discharge ทำให้คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของพื้นผิวของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ความสามารถในการเกิดพันธะกับวัสดุอื่นง่ายขึ้น จำนวนของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น บนพื้นผิวของพอลิเมอร์จากการปรับปรุงผิวด้วย Corona discharge ขึ้นกับอิเล็กตรอน ไอออน นิวตรอนที่ถูกกระตุ้น และโฟตรอน ซึ่งอนุภาคต่าง ๆ ขั้นต้นทำให้เกิดอนุมูลอิสระ โดยอนุมูลอิสระนี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ แสดงได้ในรูปที่ 10 การสลายตัวของหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 9 แสดงลักษณะของการทำ Corona discharge

ทำให้เกิด >C-OH, >C=O, -COOH จากการปรับปรุง ด้วย Corona discharge อย่างไรก็ตามการตัดสายโซ่ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งเกิดจากการออกซิไดซ์ระหว่างการทำ Corona discharge หรือน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของพอลิเมอร์จากการปรับปรุงผิวด้วย Corona discharge

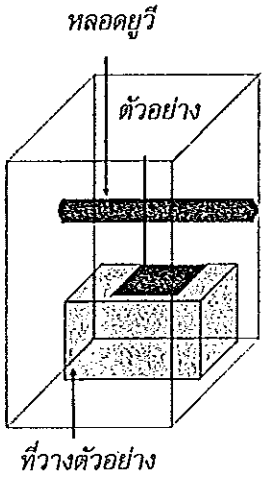
เทคนิคนี้สามารถใช้ทำการดัดแปรผิวของพอลิเมอร์ได้อย่างต่อเนื่อง (continuous) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อจำกัด คือ คุณภาพของการดัดแปรพื้นผิวของพอลิเมอร์ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากความแปรปรวนจากเงื่อนไขต่าง ๆ อาทิเช่น อุณหภูมิ และความชื้น เป็นต้น

Toth และคณะ ศึกษาการดัดแปรพื้นผิวของพอลิเอทิลีนโดยใช้แหล่งกำเนิดไอออน (keV ion beams) โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูงมากยิ่งยวด (ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) และพอลิเอทิลีนโครงสร้างแบบเชิงเส้น (linear polyethylene, LPE) ทำการปรับปรุงของพอลิเมอร์ดังกล่าว โดยใช้แหล่งกำเนิดไอออนต่ำของ H_2^+, He^+ และ N_2^+ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพื้นผิวของพอลิเมอร์ตรวจสอบโดยใช้ ฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer) และเอ็กซเรย์ โฟโตอิเล็กตรอน สเปคโตรสโคปี (X-ray photoelectron spectroscopy) การปรับปรุงผิวของพอลิเมอร์ดังกล่าวโดยใช้ไอออน N_2^+ ทำให้ไนโตรเจนไปติดบนพื้นผิวของพอลิเมอร์ปริมาณไนโตรเจนบนพื้นผิวของพอลิเมอร์มีค่าประมาณ 1017 ions/cm ^{2}

5. การใช้รังสี (Irradiation)

Radiations เป็นวิธีการดัดแปรพื้นผิวของพอลิเมอร์วิธีหนึ่ง ซึ่งอาศัยหลักการแผ่รังสี ซึ่งระดับพลังงานของการแผ่รังสีมีอยู่ด้วยกัน 3 ระดับ คือ การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง (High-energy radiation) โดยได้จากการใช้รังสีเอ็กซ์ (X-rays) รังสีแกมมา (γ-rays) และลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam) จากโคบอลต์-60 (^{60}Co) และแมกนีเซียม-58 (^{58}Mg) การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานระดับกลาง (Mid-energy radiation) โดยปกติได้จากรังสียูวี (UV rays) แหล่งพลาสมา (plasma sources) และการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานระดับต่ำ (low-energy radiation) จากอินฟราเรด (infrared) อัลตราโซนิค (ultrasonic) ไมโครเวฟ (microwave) และรังสียูวี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์ เช่น การเกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (irradiation time) และพลังงานของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขั้นตอนแรกของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ เพื่อทำให้พอลิเมอร์มีผิวใหม่เกิดขึ้น

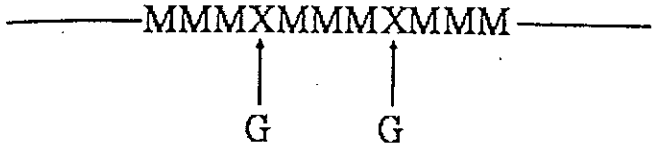
Ranby และคณะ ศึกษาการดัดแปรผิวของพอลิเอทิลีนโดยใช้กระบวนการทางเคมีของแสง แสง (Photochemical) เหนี่ยวนำหมู่ซัลโฟนิค (Sulfonic group) บนพอลิเอทิลีนจากการใช้แสงยูวีในบรรยากาศที่มีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และอากาศ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตซัลโฟเนชัน (Photosulfonation) บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ แต่เทคนิคนี้มีข้อเสียคือ ทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์ถูกทำลาย และได้มีความพยายามปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์ดังกล่าวโดยการใช้เทคนิคพลาสมา ซึ่งลักษณะของพื้นผิวของพอลิเมอร์ โดยเทคนิคพลาสมาขึ้นอยู่กับอัตราการให้พลังงานพลาสมา และระยะระหว่างแหล่งให้พลังงานพลาสมากับพื้นผิวพอลิเมอร์ ผลการทดลองพบว่า พื้นผิวของพอลิเอทิลีน มีความชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีหมู่ซัลโฟนิคอยู่บนพื้นผิวของพอลิเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการขั้นต้นดังกล่าว



รูปที่ 11 แสดงลักษณะการปรับปรุงผิวโดยการใช้รังสี

6. การกราฟต์ (Graft copolymerization)

เมื่อไม่นานมานี้ เทคนิค Graft copolymerization เป็นที่นิยมในการดัดแปรพื้นผิวของพอลิเมอร์ หลักการของ Graft copolymerization คือ การนำพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะมาทำปฏิกิริยากับสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่น

โดย M แทนหน่วยของโมโนเมอร์ในแกนหลักของพอลิเมอร์ และ G แทนสายโซ่พอลิเมอร์ที่มาทำปฏิกิริยากับสายโซ่หลัก และ X แทนหน่วยบนแกนหลักของพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ กลไกของการ Graft copolymerization มีด้วยกัน 2 แบบคือ กลไกแบบอนุมูลอิสระ (free-radical mechanism) และกลไกแบบไอออนิก (ionic mechanism)

ยางธรรมชาติ

จากวิธีการปรับปรุงผิวของพอลิเมอร์หลากหลายวิธีที่กล่าวมาทั้งหมด สำหรับในยางธรรมชาตินั้น วิธีการที่เหมาะสมและนิยมกันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ การกราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชั่น โดยการนำพอลิเมอร์ชนิดอื่นมากราฟต์ลงบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้หลากหลายขึ้น ดังเช่นงานวิจัยที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

Razzak และคณะ ทำการดัดแปรพื้นผิวของหลอดเลือดที่ทำจากยางธรรมชาติเนื่องจากความเข้ากันได้กับเลือด โดยการใช้รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้น เพื่อเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ของ *N,N*-dimethyl-acrylamide (DMAA) บนหลอดเลือดที่ทำมาจากยางธรรมชาติเพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของเลือด (Blood compatibility) จากการศึกษาผลของตัวทำละลายต่าง ๆ ต่อปริมาณการกราฟต์ พบว่า คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) เป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามปริมาณการกราฟต์สูงสุดเมื่อใช้ 30% โดยปริมาตรของ DMAA ใน CCl_4 เมื่อให้อุณหภูมิคงที่พบว่า ปริมาณการกราฟต์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการให้รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า และมีแนวโน้มคล้ายกันเมื่ออัตราการให้รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าคงที่ และเพิ่มอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

Sanguansap และคณะ พอลิเมอไรเซชั่นของเมทิลเมทาคริเลท (MMA) บนผิวของยางธรรมชาติ (NR) เพื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นของความแข็งของผิว (surface hardness) และการลดลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยาง วิธีการคือ นำแผ่นฟิล์มของยางธรรมชาติมาจุ่มในสารละลายของเมทิลเมทาคริเลทที่มีตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ tert-Butyl hydroperoxide/ferrous redox system จากนั้นให้ระยะเวลาในการจุ่มต่าง ๆ กัน จากนั้นนำแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ได้จากการกราฟต์ไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ความแข็งของพื้นผิวและความขรุขระเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PMMA

Shanmugharaj และคณะ ทำการกราฟต์อัลลิลเอมีน (allylamine) บนผิวของยางธรรมชาติเพื่อให้ผิวของยางธรรมชาติมีความชอบน้ำมากขึ้น โดยการใช้แสงยูวีเพื่อให้เกิดการกราฟต์ เบนโซควิโนนจะถูกใช้เพื่อเป็นตัวรับแสงยูวี ศึกษาสเปกตรัมจาก FTIR เพื่อยืนยันการเกิดขึ้นของ Allylamine บนผิวของยางธรรมชาติ รวมทั้งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) และจุลทรรศน์แบบใช้แรงระหว่างอะตอม (Atomic force microscopy, AFM) เพื่อยืนยันการกราฟต์ Allylamine บนผิวของยางธรรมชาติ ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) พบว่า การกราฟต์ allylamine บนผิวของยางธรรมชาติช่วยให้อัตราการสลายตัวจากความร้อนลดลง และจากผลการทดลองการวัดมุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างน้ำกับผิวของยางธรรมชาติ พบว่า contact angle ของยางธรรมชาติมีค่าลดลง เมื่อมีการดัดแปรผิวของยางธรรมชาติโดยการใช้แสงยูวีในการกราฟต์ allylamine บนผิวของยางธรรมชาติดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของยางธรรมชาติมีความชอบน้ำมากขึ้น

Wang และคณะ ทำการปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มยางธรรมชาติโดยอาร์กอน พลาสมา (Argon plasma) รวมทั้งการใช้แสง UV ทำให้เกิดการกราฟต์ของฟิล์มยางธรรมชาติที่ปรับปรุงผิวด้วย argon plasma กับ (Either acrylamide, AAm) กับ 2, 2, 3, 3, 4, 4, 4-เฮปตะฟลูออโรบิวทิลอะคริเลท (2, 2, 3, 3, 4, 4, 4-heptafluorobutylacrylate, HFA) ทำให้เกิดผิวใหม่ขึ้น เช่น การมีขั้วและไม่มีขั้วของฟิล์มยางธรรมชาติ X-ray photoelectron spectroscopy ใช้ตรวจสอบผิวของยางธรรมชาติที่ได้จากการ

ปรับปรุงผิวแล้ว พื้นผิวของยางธรรมชาติจะมีหมู่ฟังก์ชันของเปอร์ออกไซด์เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของผิวยางธรรมชาติกับอากาศหลังจากทำการปรับปรุงผิวด้วย argon plasma การใช้ UV ทำให้ผิวของยางธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันของเปอร์ออกไซด์เกิดกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่น ซึ่งโดยทั่วไปการที่จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การกราฟต์ที่สูง จะต้องทำที่ความเข้มข้นของโมโนเมอร์ที่ใช้ในการกราฟต์สูง ๆ ระยะเวลาการใช้ UV กราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่นนาน ๆ และระยะเวลาในการปรับปรุงผิวด้วย argon plasma นาน ๆ การวัดมุมสัมผัส (contact angle) ทำให้รู้ความเป็นขั้วของผิวของฟิล์มยางธรรมชาติซึ่งดีขึ้น จากการปรับปรุงผิวด้วย argon plasma และการกราฟต์พอลิเมอไรเซชั่นกับ AAm ในทางตรงกันข้าม contact angle กว้างเท่ากับ 109 องศา ได้จากการกราฟต์บนผิวยางกับ HFA แสดงให้เห็นว่าการกราฟต์ AAm บนผิวของยางธรรมชาติจะทำให้พอลิเมอร์มีความชอบน้ำมากกว่าการกราฟต์ HAF บนผิวของยางธรรมชาติ

สรุปผล

1. วิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวในแผ่นฟิล์มของพอลิเมอร์

   1.1 Flame treatment

   1.2 Metal deposition

   1.3 Chemical treatment

   1.4 Corona discharge

   1.5 Irradiation

   1.6 Graft copolymerization

2. วิธีการที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในการดัดแปรผิวของยางธรรมชาติคือการกราฟต์โคพอลิเมอไรเซชั่น โดยการนำพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะกราฟต์บนโมเลกุลของยางธรรมชาติ

3. คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการดัดแปรผิวความสามารถในการยึดติด (Adhesion) ความสามารถในการติดสี (Dyeability) ความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ (Blood compatibility) ความเสียดสี (Friction) ความขรุขระ (Roughness) เพิ่มขึ้น

บรรณานุกรม

- A. Toth, T. Bell, I. Bertoti, M. Mohai and B. Zelei, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res.Sect. B.*, 148, 1131 (1999).
- B. Ranby, *Mater Res Innovations* 2, 64 (1994).
- M. T. Razzak, K. Otsuhata, Y. Tabata, F. Ohashi and A. Takeuchi, *J. Appl. Polym.Sci.*, 36, 645 (1988).
- Sanguansap, Thonggoom, Tangboriboonrat. European Polymer Journal 42 (2006) 2334–2342.
- A.M. Shanmugharaj, Jin Kuk Kim, Sung Hun Ryu. Applied Surface Science 252 (2006) 5714–5722.
- Peng Wang, K.L. Tana, C.C. Ho, M.C. Khew, E.T. Kang. European Polymer Journal 36 (2000) 1323-1331.
- www.weber-schaer.com
- www.imtek.uni-freiburg.de
- www.polymer.kth.se

สาระน่ารู้

ประวัติยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นน้ำยางจากต้นไม้ยืนต้นมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งคือยางพาราหรือต้นยางพารา ยางพารามีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิล และเปรู ทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งชาวอินเดียนแดงเผ่ามายันในอเมริกากลาง ได้รู้จักการนำยางพารามาใช้ก่อนปี พ.ศ. 2000 โดยการจุ่มเท้าลงในน้ำยางดิบเพื่อทำเป็นรองเท้า ส่วนเผ่าอื่น ๆ ก็นำยางไปใช้ประโยชน์ในการทำผ้ากันฝน ทำขวดใส่น้ำ และทำลูกบอลยางเล่นเกมส์ต่าง ๆ เป็นต้น จนกระทั่งคริสโตเฟอร์ โคลัมบัส ได้เดินทางมาสำรวจทวีปอเมริกาใต้ ในระหว่างปี พ.ศ. 2036-2039 และได้พบกับชาวพื้นเมืองเกาะฮิติที่กำลังเล่นลูกบอลยาง ซึ่งสามารถกระดอนได้ ทำให้คณะผู้เดินทางสำรวจประหลาดใจจึงเรียกว่า "ลูกบอลผีสิง"

ต่อมาในปี พ.ศ. 2279 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อชาลส์ มารีเดอลา คองตามีน (Charles Marie de la Condamine) ได้ให้ชื่อเรียกยางตามคำพื้นเมืองของชาวอินเดียว่า "คาโอชู" (Caoutchouc) ซึ่งแปลว่าต้นไม้ร้องไห้ และให้ชื่อเรียกของเหลวที่มีลักษณะขุ่นขาวคล้ายน้ำนม ซึ่งไหลออกมาจากต้นยางเมื่อกรีดเป็นรอยแผลว่า ลาเทกซ์ (Latex) และใน พ.ศ. 2369 ฟาราเดย์ (Faraday) ได้รายงานว่ายางธรรมชาติเป็นสารที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน มีสูตรเอมไพริเคิล คือ C_5H_8 หลังจากนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติของยางพาราเพื่อให้ใช้งานได้กว้างขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายสุวิทย์ ไชยพลบาล

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4910220094

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยียาง)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนวิจัย เพื่อการทำวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

สอาด ริยะจันทร์ และสุวิทย์ ไชยพลบาล. 2551. "การพัฒนาดัดแปรผิวยางธรรมชาติในรูปแผ่น." วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา วารสารทางการศึกษาเพื่อสื่อมวลชล, 20, 67, 15-22.

Chaiponban S. and Riyajan S. 2009. Preparation and characterization of semi-interpenetrating polymer network based on NR/PVA and ENR/PVA, The 2nd Polymer Graduate Conference of Thailand, Faculty of Science Chulalongkorn University, Thailand.

Riyajan, S. and **Chaiponban, S.** 2009. "Activation Energy and Thermal Behaviors of Thermoplastic Elastomer Based on Natural Rubber and Poly(vinyl Alcohol)" Kaustschuk Gummi Kunststoffe.

Riyajan S. and **Chaiponban S.** 2008. "Semi-interpenetrating based on epoxided natural rubber and polyvinyl alcohol blends containing maleic acid as crosslining." 6TH Regional IMT-GT Umomet conference 2008, Universiti Sains Malaysia, 11800 Minden, Penang, Malaysia.

Riyajan S., **Chaiponban S.**, Kothamnivet D. and Thongseenuch S. 2008. "Study the semi-interpenetrating between natural rubber and polyvinyl alcohol". Kasetsart University Science Journal. Vol. 26 No. 1, 29-34.

Riyajan S., **Chaiponban S.** and Kothamnivet D. 2007. "To Study the Physical Properties of Natural Rubber-polyvinyl alcohol blends." 33th Congress on science and Technology of Thailand (STT), 18-20, Walailak University, Thailand.

Riyajan S., **Chaiponban S.** and D. Kothamnivet. 2007. "Study the Semi-Interpenetrating between Natural Rubber and Polyvinyl Alcohol Blends." The 10th Pacific Polymer Conference, 4-7, Kobe, Japan.

Riyajan S., **Chaiponban S.** and Kothamnivet D. 2008. "Study the Mechanism of Semi-Interpenetrating between Natural Rubber and Polyvinyl Alcohol Blend Containing Maleic Acid and Diisocyanate." Pure and Applied International Chemistry Conference 2008 (PACCON 2008), Sofitel Centara Grand Bangkok, Bangkok, Thailand.

Sa-Ad Riyajan, **Suwit Chaiponban**, Kridtiya Tanbumrung. 2009. "Investigation of the preparation and physical properties of a novel semi-interpenetrating polymer network based on epoxised NR and PVA using maleic acid as the crosslinking agent" Chemical Engineering Journal. 153, 199-205.