



สมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของยางธรรมชาติ เบลนด์ยางรีไซเคิลและพอลิเอทิลีน
ความหนาแน่นต่ำ

Thermal and Mechanical Properties of Natural Rubber Blended with
Reclaimed Rubber and Low Density Polyethylene

ลียานา บินมะยะโกะ
Leeyana Binmayakok

Prince of Songkla University
Pattani Campus

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
of Master of Science in Applied Physics
Prince of Songkla University

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	สมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของยางธรรมชาติ เบลนด์ยางรีเคลมและ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
ผู้เขียน	นางสาวลิยานา บินมะยะโกะ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (รองศาสตราจารย์ ดร. สมบัติ พุทธจักร) ประธานกรรมการ (อ.ดร. แวอาแซ แวหามะ)
 กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร. สมบัติ พุทธจักร)
 กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรณิศ นาวารัตน์)
 กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลพัฒน์ รวบรวมเจริญ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ดี ฟ้าวรุ่งแสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วน
ช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมบัติ พุทธิจักร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นางสาวลียานา บินมะยะโกะ)

นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวลียานา บินมะยะโกะ)

นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ชื่อวิทยานิพนธ์	สมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของยางธรรมชาติ เบลนด์ยางรีเคลมและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
ผู้เขียน	นางสาวลิยานา บินมะยะโกะ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของยางธรรมชาติ (NR) เบลนด์ยางรีเคลม (RR) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และสารก่อฟอง (BA) วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสมบัติเชิงความร้อน เชิงกลของวัสดุตัวอย่างและได้นำวัสดุธรรมชาติรอบตัว ราคาถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยผสม NR ในปริมาณ 100 phr RR 200, 400 phr BA 0, 10 phr และแปรปริมาณ LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้ชุดทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนโดยใช้อุณหภูมิ 79°C พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ RR, BA และ LDPE สูตรยางที่ดีที่สุดคือ NR 100 phr RR 400 phr และ LDPE 8 phr ค่า k เท่ากับ 0.0004 W/m.K และศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึงความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 50, 100, 200, 300 และ 400 มม./นาที พบว่าเมื่อมีการเพิ่ม LDPE และ RR ค่า Tensile Strength และ ค่า Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่า BA เข้าไป พบว่าค่า Tensile Strength และค่า Modulus มีแนวโน้มลดลง

ชื่อวิทยานิพนธ์	สมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของยางธรรมชาติ เบลนด์ยางรีเคลมและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
ผู้เขียน	นางสาวลิยานา บินมะยะโกะ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของยางธรรมชาติ (NR) เบลนด์ยางรีเคลม (RR) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และสารก่อฟอง (BA) วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสมบัติเชิงความร้อน เชิงกลของวัสดุตัวอย่างและได้นำวัสดุธรรมชาติรอบตัว ราคาถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยผสม NR ในปริมาณ 100 phr RR 200, 400 phr BA 0, 10 phr และแปรปริมาณ LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้ชุดทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนโดยใช้อุณหภูมิ 79°C พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ RR, BA และ LDPE สูตรยางที่ดีที่สุดคือ NR 100 phr RR 400 phr และ LDPE 8 phr ค่า k เท่ากับ 0.0004 W/m.K และศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึงความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 50, 100, 200, 300 และ 400 มม./นาที พบว่าเมื่อมีการเพิ่ม LDPE และ RR ค่า Tensile Strength และ ค่า Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่า BA เข้าไป พบว่าค่า Tensile Strength และค่า Modulus มีแนวโน้มลดลง

Thesis Title	Thermal and Mechanical Properties of Natural Rubber Blended with Reclaimed Rubber and Low density Polyethylene
Author	Miss Leeyana Binmayakok
Major Program	Applied Physic
Academic Year	2017

ABSTRACT

The study of thermal and mechanical properties of natural rubber (NR) blended with reclaimed rubber (RR) low density polyethylene (LDPE) and blowing agent (BA) was carried out. The aim of this research is to enhance performance of NR insulator with low cost materials having fixed amount of NR of 100 phr, RR of 200, 400 phr, BA of 0, 10 phr and LDPE were 2, 4, 6 and 8 phr. Thermal conductivity (k) was tested at 79°C. The result showed k value decreased when RR, BA and LDPE decreased. The best formula is NR 100 phr RR 400 phr and LDPE 8 phr. It showed k value of 0.0004 W/m.K. In addition mechanical properties were tested by tensile tester with speed at 50, 100, 200, 300 and 400 mm./min. It was founded when LDPE and RR increased tensile strength and modulus increased, but when BA was introduced, tensile strength and modulus decrease.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ พุทธิจักร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนสำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณ มนูญ อ่องทวีสุข แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้การช่วยเหลือด้านเครื่องมือในการทดสอบต่าง ๆ ขอขอบคุณ แผนกเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้การสนับสนุนเกี่ยวกับอุปกรณ์และเครื่องมือในการทดสอบ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีในการทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่อง SEM และขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ที่ดีตลอดมาจาก ผศ.ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม และ ดร.อารีเพ็ญ รัศมีศาสน์

ขอขอบคุณแหล่งทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่

- 1) ทุนยกเว้นค่าธรรมเนียมการศึกษา จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- 2) ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- 3) ทุนเพื่อการศึกษา สมาคมราชกรีฑาสโมสร

ขอขอบพระคุณบุคลากร รวมทั้งนักศึกษา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลืองานวิจัยและอำนวยความสะดวกในการทำงานตลอดมา อีกทั้งขอขอบคุณกำลังใจที่สำคัญจากครอบครัวและเพื่อน ๆ ที่น่ารักทุกคน ท้ายนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในงานครั้งนี้

ลียานา บินมะยะโกะ

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(12)
สารบัญภาพ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 ความร้อนและอุณหภูมิต	4
2.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	4
2.2.1 การขยายตัวตามเส้น	4
2.2.2 การขยายตัวตามพื้นที่	5
2.2.3 การขยายตัวตามปริมาตร	5
2.3 ความเค้นที่เกิดจากความร้อน	6
2.4 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์	6
2.5 การส่งผ่านความร้อน	7
2.5.1 การนำความร้อน	7
2.5.2 การพาความร้อน	8
2.5.3 การแผ่รังสี	8
2.6 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ	9
2.6.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	9
2.6.2 การนำความร้อน	9
2.7 ยางธรรมชาติ	11
2.8 ยางรีเคลม	12

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า	
2.9	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	13
	2.9.1 คุณสมบัติทางกายภาพ	13
	2.9.2 การนำไปใช้	13
2.10	โซเดียมไบคาร์บอเนตหรือสารก่อฟอง	14
	2.10.1 กระบวนการผลิตโซเดียมไบคาร์บอเนต	14
	2.10.2 การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน	14
	2.10.3 การนำไปใช้	15
2.11	การวัดคาไนซ์โตไซท์กัมมะถัน	15
2.12	ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ	16
	2.12.1 ความหนาแน่น	16
	2.12.2 การหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะด้วยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ	16
2.13	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.14	สมบัติด้านการดิ่ง	17
	2.14.1 ความเครียด	18
	2.14.2 ความเค้น	19
	2.14.3 ค่ามอดูลัสของยัง	20
2.15	สมบัติการไหล	20
	2.15.1 การวัดความหนืด	21
	2.15.2 ลักษณะการไหลของของไหล	22
บทที่ 3	วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	26
3.1	วัสดุและสารเคมี	26
	3.1.1 ยางแท่ง	26
	3.1.2 ยางรีเคลม	26
	3.1.3 สารเคมี	26
	3.1.4 สารตัวเติม	26
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	26
	3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม	26

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ		หน้า
	3.2.2 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง	26
	3.2.4 เครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR)	27
	3.2.5 เครื่องขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัด	28
	3.2.6 ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนความร้อน	30
	3.2.7 เครื่องทดสอบสมบัติการดึง	32
	3.2.8 เครื่องทดสอบสมบัติการไหล	33
	3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	34
	3.2.10 เครื่องวัดความหนาแน่น	35
3.3	วิธีการทดลอง	35
	3.3.1 การเตรียมสารตัวเติม	35
	3.3.2 ออกแบบสูตรยาง	36
	3.3.3 การผสมยาง	37
	3.3.4 การหาเวลาสุกของยาง	37
	3.3.5 การอัดเข้า	37
	3.3.6 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน	37
	3.3.7 การหาความหนาแน่น	38
	3.3.8 การทดสอบสมบัติการดึง	38
	3.3.9 การทดสอบสมบัติการไหล	39
	3.3.10 การทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยใช้เครื่อง SEM	39
บทที่ 4	ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย	40
4.1	ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อน	40
	4.1.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์การนำความร้อนของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 และ 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr	41
	4.1.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์การนำความร้อนของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 และ 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr	42

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
4.1.3 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 และ 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr	43
4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล	44
4.2.1 ความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของยาง	44
4.3 ผลการศึกษาความหนาแน่น	58
4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างภายในโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope, SEM	59
4.4.1 อิทธิพลของ LDPE ต่อโครงสร้างภายในของแผ่นตัวอย่าง	59
4.4.2 อิทธิพลของ RR ต่อโครงสร้างภายในของแผ่นตัวอย่าง	61
4.4.3 อิทธิพลของ BA ต่อโครงสร้างภายในของแผ่นตัวอย่าง	62
4.5 ผลการศึกษาสมบัติการไหลโดยใช้เครื่อง Capillary Rheology	63
4.5.1 อิทธิพลของปริมาณเศษแผ่นฟิล์ม LDPE ที่มีผลต่อความหนืด	63
4.5.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนืด	65
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	69
5.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อน (ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน; k)	69
5.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล	70
5.3 ผลการศึกษาความหนาแน่น	70
5.4 ผลการศึกษาโครงสร้างภายในโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope, SEM	70
5.5 ผลการศึกษาสมบัติการไหลโดยใช้เครื่อง Capillary Rheometer	71
5.6 ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	72
ภาคผนวก	74
ประวัติผู้เขียน	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่า T_g และ T_f ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ	8
2.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ	12
3.1 สูตรการผสมยางสูตร BA 0 phr	37
3.2 สูตรการผสมยางสูตร BA 10 phr	38

Prince of Songkla University
Pattani Campus

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงการขยายตัวตามเส้น ตามพื้นที่และตามปริมาตร	7
2.2 แสดงการถ่ายเทพลังงานความร้อน	9
2.3 การนำความร้อนของวัตถุผ่านเนื้อวัสดุ พื้นที่ A หน้า Δx	11
2.4 แผนผังตำแหน่งอุณหภูมิของชุดทดลองสมบัติการเป็นฉนวน	12
2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	13
2.6 การเชื่อมโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน	16
2.7 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง SEM	18
2.8 แสดงขนาดและรูปทรงของชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง	20
2.9 การหาค่ามอดูลัสในแบบต่างๆ	22
2.10 กราฟการไหลแบบ Newtonian	24
2.11 กราฟการไหลแบบ Pseudoplastic	25
2.12 กราฟการไหลแบบ Dilatant	26
2.13 กราฟการไหลแบบ Bingham fluid	27
3.1 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill)	29
3.2 เครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR)	30
3.3 เครื่องขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัด	31
3.4 ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อน	32
3.5 ตัวเก็บข้อมูลรุ่น EASY SENSE Advanced ของบริษัท DATA HARVEST	34
3.6 เครื่องทดสอบสมบัติการดึง	35
3.7 เครื่องทดสอบสมบัติการไหล	35
3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM)	36
3.9 เครื่องวัดความหนาแน่น Electric Densimeter	37
4.1 กราฟอุณหภูมิที่ 1 และที่ 2 กับเวลาและกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลาตามลำดับ ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2 phr	42
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับเวลาของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 และ 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr	43
4.3 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับเวลาของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 และ 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.4 กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับเวลาของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 และ 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr	45
4.5 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที	46
4.6 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที	47
4.7 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที	47
4.8 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 300 มม./นาที	48
4.9 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที	48
4.10 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที	49
4.11 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที	50
4.12 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที	50
4.13 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที	51
4.14 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที	51
4.15 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที	52
4.16 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 300 มม./นาที	52
4.17 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.18 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที่	53
4.19 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที่	54
4.20 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที่	55
4.21 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที่	55
4.22 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที่	56
4.23 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที่	56
4.24 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที่	57
4.25 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที่	57
4.26 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 300 มม./นาที่	58
4.27 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 300 มม./นาที่	58
4.28 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที่	59
4.29 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที่	59
4.30 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผสม RR 0 phr BA 0 และ 10 phr	60
4.31 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผสม RR 200 phr BA 0 และ 10 phr	60
4.32 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผสม RR 400 phr BA 0 และ 10 phr	61
4.33 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S1 กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า	62
4.34 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S3 กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.35 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S8 กำลังขยาย 1,500 และ 10,000 เท่า	62
4.36 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S1 กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า	63
4.37 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S5 กำลังขยาย 1,500 และ 10,000 เท่า	63
4.38 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S9 กำลังขยาย 1,500 และ 10,000 เท่า	64
4.39 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S9 กำลังขยาย 1,500 และ 10,000 เท่า	64
4.40 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S13 กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า	65
4.41 แสดงกราฟระหว่างอัตราเร็วกับความหนืดของยางธรรมชาติและตัวอย่างที่ผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่อุณหภูมิ 100 ^o C, 115 ^o C และ 130 ^o C	66
4.42 แสดงกราฟระหว่างอัตราเร็วและความหนืด ที่อุณหภูมิ 100 ^o C, 115 ^o C และ 130 ^o C ของยางธรรมชาติและตัวอย่างที่ผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr	68

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรมหรือจากการใช้รถยนต์เพิ่มมากขึ้น ผลกระทบที่เกิดจากการปล่อยก๊าซดังกล่าวก่อให้เกิดปัญหาที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนและปรากฏการณ์เรือนกระจก และความร้อนเหล่านี้ยังเป็นปัญหาทำให้อาคาร บ้านเรือนต่าง ๆ ร้อนไปด้วย การก่อสร้างอาคารจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่ช่วยกันความร้อนจากภายนอกอาคาร สมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีของวัสดุจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการก่อสร้างอาคาร (Abdel et al., 2011) ปูนซีเมนต์หรืออิฐบล็อกมาก่อสร้างอาคารนั้นมีความเป็นฉนวนความร้อนไม่ดีพอ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะหาวัสดุผสมมาใช้ คือ ใยธรรมชาติเบลนด์ยางรีไซเคิลและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เพื่อให้ได้วัสดุกันความร้อนที่ดีแล้วช่วยในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวและเพื่อเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศ อีกทั้งยังเป็นการนำยางที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่เพื่อช่วยลดปริมาณยางที่ใช้แล้ว ซึ่งในปัจจุบันมียางที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ก่อให้เกิดมลภาวะอีกเช่นเดียวกัน เพราะยางเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ง่ายและเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายนี้นานกว่าผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ชนิดอื่น (Abdel et al., 2011) เช่นเดียวกับกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) (เศษแผ่นฟิล์ม) ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้บรรจุอาหาร ใช้ถนอมอาหาร เป็นต้น เศษแผ่นฟิล์ม LDPE ยังสามารถนำมาเบลนด์กับยางรีไซเคิลได้ดี คุณสมบัติที่สำคัญของเศษแผ่นฟิล์มคือ มีความยืดหยุ่นได้ดี ลักษณะชิ้นงานจะนิ่มและสามารถเพิ่มการเป็นฉนวนความร้อนได้อีก

การเป็นฉนวนกันความร้อนนั้นสามารถทดสอบได้โดยใช้หลักการส่งผ่านความร้อน ใช้ชุดทดสอบที่มีสองตู้ ปล่อยความร้อนจากตู้ที่ 1 ผ่านแผ่นตัวอย่างไปยังตู้ที่ 2 แล้วนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากสมการ $q = k \cdot \Delta T / \Delta x$ เมื่อ q คือ ฟลักซ์ความร้อน, ΔT คือ อุณหภูมิต่างระหว่างผิวของวัสดุที่มีการส่งผ่านความร้อน และ Δx คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ นอกจากการศึกษาการเป็นฉนวนกันความร้อนแล้วผู้วิจัยยังได้ศึกษาสมบัติเชิงกลอีกด้วย นั่นคือ

สมบัติการต้านการดึง โดยใช้สมการสมบัติวิสโคอิลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยการเปลี่ยนรูปแบบโกซี ($\lambda^2 - 1/\lambda$) สมบัติเฉพาะดังกล่าวนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการผสมยางรีเคลมและ LDPE ในสัดส่วนที่เหมาะสมลงในยางธรรมชาติ สมบัติการต้านการดึงบ่งบอกถึงความแข็งแรงของชิ้นตัวอย่างที่จะนำมาประกอบการพิจารณาการนำไปใช้งานจริง ส่วนสมบัติการไหลนั้นบ่งบอกถึงเงื่อนไขการขึ้นรูปของชิ้นตัวอย่าง ดังนั้น การศึกษาจึงใช้ชุดทดลอง capillary rheometer เพื่อวัดความหนืดปรากฏของการไหลและหาความเหมาะสมของตัวอย่างสำหรับการขึ้นรูปจริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Turgut และ Yesilata. (2007) ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อนของอิฐมวลเบาผสมยางศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นฉนวนกันความร้อนของอิฐมวลเบา โดยผสมเศษยางเข้าไป พบว่าอิฐมวลเบาและเศษยางนี้มีความต้านทานความร้อนที่ดีตรวจสอบสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อนของอิฐมวลเบาผสมเศษยาง โดยการใช้เทคนิคกล่องความร้อนที่เป็นระบบปิดและจำลองสถานการณ์จริงฉนวนกันความร้อนที่ได้มีประสิทธิภาพการทำงานดีกว่าอิฐมวลเบาธรรมดาถึง 5 - 11%

Yesilata et al. (2009) ศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นฉนวนกันความร้อนในคอนกรีต โดยผสม PET และเศษยางรถยนต์ ทดสอบโดยใช้เทคนิคกล่องความร้อนที่เป็นระบบปิดและจำลองสถานการณ์จริง โดยเปรียบเทียบกับแผ่นฉนวนที่ไม่มีการผสมสารตัวเติมใด ๆ ผลการทดลองที่ได้คือ เปอร์เซ็นต์การเป็นฉนวนของ PET ที่ตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสคือ 10.27% แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าคือ 17.11% แบบไม้สามเหลี่ยมคือ 17.16% และเศษยางรถยนต์คือ 18.52% จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การเป็นฉนวนของเศษยางรถยนต์จะมากกว่าและสามารถเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่า PET

Piti (2008) ศึกษาความเป็นฉนวนกันความร้อนและสมบัติการดูดซับเสียงของคอนกรีตแบบพรีคาส (คอนกรีตที่สร้างขึ้นแบบสำเร็จรูปพร้อมนำไปใช้งาน) ที่ผสมยางครัมป์ (ยางที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ วัตถุประสงค์ของการศึกษาคั้งนี้คือ การนำยางครัมป์ในสัดส่วนต่างๆมาผสมขึ้นเป็นยางพรีคาส (pre-cast) ก่อนผสมเข้ากับคอนกรีต โดยยางครัมป์ที่ผสมเข้าไปจะเข้าไปในคอนกรีตนั้นจะเข้าไปแทนที่วัสดุมวลรวมและทดสอบตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย และ ASTM เมื่อผสมเศษยางเข้าไปประมาณ 10-30%,

น้ำหนักของคอนกรีตจะลดลงจาก 14% ถึง 28% เมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดาและพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง คือการเป็นฉนวนกันความร้อนดีขึ้นเมื่อเทียบกับยางครัมภ์ธรรมดา

Hrdicka et al. (2010) ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการเบลนด์ของยางรีเคลมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จากการศึกษาพบว่า เมื่อ LDPE มากขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นเพิ่มขึ้นโดยที่ตัวอย่างที่ดีที่สุดในการทดลองครั้งนี้มีค่าสมบัติการดึงเท่ากับ 8.6 MPa สมบัติเชิงกลจะเพิ่มขึ้น ณ จุดหนึ่งแล้วจะมีการลดลงเพราะเมื่อปริมาณ LDPE มากขึ้นทำให้วัสดุนั้นนิ่มลง จึงทำให้สมบัติเชิงกลนั้นด้อยลงด้วยเช่นกัน

Benkreira et al. (2011) ศึกษาและพัฒนาสมบัติการดูดซับเสียงและสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุเหลือใช้ เช่น ยางรถยนต์ เส้นใย พลาสติก โดยการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาโครงสร้างภายในของวัสดุที่เป็นเซลล์เปิดหรือว่าเซลล์ปิด และจากการศึกษานี้พบว่าเซลล์ที่มีลักษณะเป็นเซลล์ปิดจะทำให้สมบัติการดูดซับเสียงและสมบัติเชิงความร้อนนั้นดีขึ้น

Kader et al. (2011) ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของเศษยางธรรมชาติโดยการผสมยางธรรมชาติเพื่อเป็นการลดต้นทุน โดยจะผสมเศษยางเข้าไปในอัตราส่วน 200, 400, 600, 800, และ 1000 phr. จากการศึกษาจะเห็นว่าทั้งสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลจะดีขึ้นเมื่อผสมเศษยางเพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่นของยางนั้นจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเพิ่มเศษยางเข้าไปที่อัตราส่วน 600 phr. และหลังจากนั้นจะมีการลดลงเนื่องจากเมื่อเพิ่มเศษยางเข้าไปมากขึ้น ทำให้ยางเสื่อมสภาพลง

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและเชิงกลของยางธรรมชาติเบลนด์ยางรีเคลมและเศษแผ่นฟิล์ม

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆของยางธรรมชาติเบลนด์ยางรีเคลมและเศษแผ่นฟิล์มเมื่อผสมสารที่ทำให้เกิดฟอง

บทที่ 2

ทฤษฎี

การนำทางธรรมชาติแบบลวดลายรีเคลมและเศษแผ่นฟิล์ม เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นยางที่นำมาใช้เป็นแผ่นฉนวนกันความร้อน เนื่องจากวัสดุองค์ประกอบในการผสมนั้นมีสมบัติความเป็นฉนวนความร้อน จึงคาดว่าสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนภาพรวมของแผ่นยางนี้จะดีขึ้น

2.1 ความร้อนและอุณหภูมิ

ความร้อน (heat) เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสสาร พลังงานความร้อนที่ถูกส่งออกมา มนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ล้วนมีประสาทสัมผัสหรือปฏิกิริยาตอบสนองที่ไวต่อความร้อน

ความรู้สึก บอกระดับของความร้อนไม่ได้ ดังนั้น อุณหภูมิเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ซึ่งใช้บอกระดับความร้อนโดยใช้อุปกรณ์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

ปัจจุบันได้กำหนดหน่วยของอุณหภูมิ เป็น เคลวิน (K) และองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)

2.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

เมื่อวัตถุได้รับความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งโดยทั่วไปจะมีการขยายตัวใหญ่ขึ้น จึงทำให้เกิดฟองอากาศและเพิ่มปริมาตรอิสระภายในวัสดุ การขยายตัวมีหลายรูปแบบ เช่น การขยายตัวตามเส้น การขยายตัวตามพื้นที่ การขยายตัวตามปริมาตร เป็นต้น

2.2.1 การขยายตัวตามเส้น

พิจารณา เดิมวัตถุมีความยาว l_0 มีอุณหภูมิ t_0 เมื่อได้รับความร้อนเพิ่มจนอุณหภูมิเป็น t และความยาวเป็น l_t ส่วนที่ยืดออกไป $\Delta l = l_t - l_0$ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวเดิมและอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนไปดังสมการ

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t \quad (2.1)$$

โดยที่ α เป็นค่าคงที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น (Linear expansion coefficient)

2.2.2 การขยายตัวตามพื้นที่

พิจารณาวัตถุรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง a ยาว b ที่อุณหภูมิใด ๆ จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\text{Area} = ab = [a_0 (1 + \alpha \Delta t)] [b_0 (1 + \alpha \Delta t)] \quad (2.2)$$

$$\text{Area} = a_0 b_0 (1 + 2 \alpha \Delta t + (\alpha \Delta t)^2) \quad (2.3)$$

$$\text{Area} = A_0 (1 + 2 \alpha \Delta t); (\alpha \Delta t)^2 \approx 0 \quad (2.4)$$

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามพื้นที่ มีค่าเท่ากับ 2α

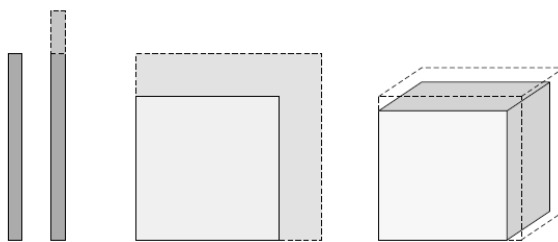
2.2.3 การขยายตัวตามปริมาตร

พิจารณาของแข็งที่มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง ปริมาตรเดิม V_0 เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปเป็น Δt สามารถหาปริมาตรใหม่ได้ดังสมการ

$$V_t = V_0 (1 + \beta \Delta t) \quad (2.5)$$

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตร เท่ากับ $\beta = 3\alpha$ โดยที่

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{(V_t - V_0)}{\Delta t} = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.6)$$



ภาพที่ 2.1 แสดงการขยายตัวตามเส้น ตามพื้นที่และตามปริมาตร

2.3 ความเค้นที่เกิดจากความร้อน

แท่งวัตถุที่ถูกตรึงไว้ปลายทั้งสองด้วยความยาว l_0 มีพื้นที่ A ถูกดึงทำให้ความยาวเปลี่ยนไป Δl เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะเกิดแรงดันหรือแรงดึง F ขึ้นในวัตถุนั้น ทำให้เกิดความเค้นดึงหรือความเค้นอัดขึ้น เรียกว่าความเค้นที่เกิดจากความร้อน (thermal stress)

$$\text{ความเครียด} = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha(t - t_0) = \alpha \Delta t \quad (2.7)$$

$$\text{จากค่ามอดูลัสของยังของวัตถุ} = Y = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l} \quad (2.8)$$

$$\text{ความเค้นเกิดจากความร้อน} = \frac{F}{A} = Y \alpha \Delta t \quad (2.9)$$

2.4 สมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal Properties of Polymer)

พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีสายโซ่ยาว มีพันธะคู่ โดยสายโซ่โมเลกุลสามารถขยับตัวได้หลายระดับ จึงสามารถดูดซับพลังงานที่ผ่านเข้ามาได้ พอลิเมอร์จึงเป็นฉนวนความร้อนที่ดี การจัดเรียงตัวให้มีความเป็นระเบียบทุกบริเวณจึงทำได้ยาก พอลิเมอร์จึงไม่สามารถเกิดผลึกได้ 100% เหมือนสารประกอบโมเลกุลเล็กทั่วไป สามารถจำแนกพอลิเมอร์ตามปริมาณผลึกได้ 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) คือ พอลิเมอร์ที่ไม่มีบริเวณที่เป็นผลึกเลยและพอลิเมอร์กึ่ง

ผลึก (semi-crystalline polymer) ซึ่งประกอบด้วยผลึกบางส่วน ปริมาณผลึกในพอลิเมอร์นี้ส่งผลถึงสมบัติทางความร้อนที่สำคัญ คือ อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (melting point temperature, T_m) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สายโซ่พอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวคล้ายกับการหลอมเหลวของของแข็งชนิดอื่นและสมบัติทางความร้อนที่สำคัญอีกประการของพอลิเมอร์ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g)

ตาราง 2.1 ค่า T_g และ T_m ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ (ชูศักดิ์, 2554)

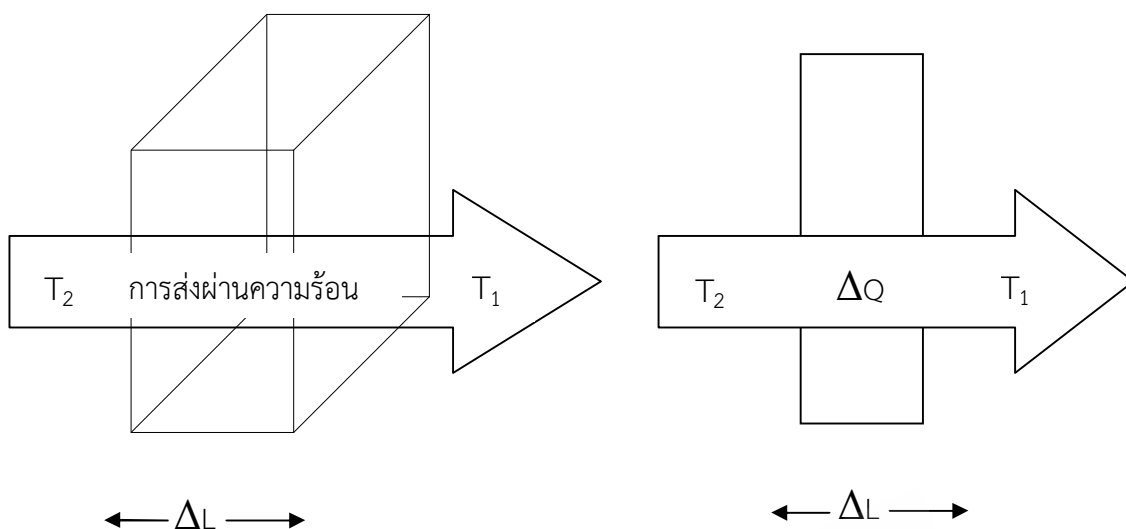
Polymers	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)
High Density Polyethylene (HDPE)	-90	137
Low Density Polyethylene (LDPE)	-110	115
Polypropylene (PP)	-18	175
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	-97	327
Polyvinyl chloride (PVC)	87	212
Polystyrene (PS)	100	-
Polycarbonate (PC)	150	265
Nylon 6,6	57	265

2.5 การส่งผ่านความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งซึ่งจะส่งผ่านหรือถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการส่งผ่านความร้อนอาจจำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการส่งผ่านหรือไม่จำเป็นก็ได้ การถ่ายเทความร้อนมีสามแบบคือ การนำ (conduction) การพา (convection) และการแผ่รังสี (radiation)

2.5.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ความร้อนจะไหลจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูง โดยไหลผ่านตัวกลางซึ่งเชื่อมต่อสู่แหล่งที่มีระดับอุณหภูมิต่ำกว่า การนำความร้อนเป็นการส่งผ่านพลังงานความร้อนไปในเนื้อวัสดุ เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ โดยที่เนื้อวัสดุหรือตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ อัตราการส่งถ่ายพลังงานแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัด A ผลต่างอุณหภูมิ ΔT และแปรผกผันกับความหนาของตัวกลาง ดังรูป



ภาพที่ 2.2 แสดงการถ่ายเทพลังงานความร้อน

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta L} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta L} \quad (2.10)$$

โดยที่ k เป็นค่าคงที่เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อน (thermal conductivity)

2.5.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยมีตัวกลางพาความร้อนดังกล่าวไป การพาความร้อนอาจเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ เช่น อากาศบริเวณใกล้พื้นโลกในเวลากลางวันจะได้รับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทจากพื้นดิน ทำให้ความหนาแน่นของอากาศลดลงจึงลอยตัวพาความร้อนขึ้นจากพื้นดิน อากาศส่วนที่เย็นกว่าจะไหลมาแทนที่ เป็นต้น

2.5.3 การแผ่รังสี (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ความร้อนจะถูกส่งไปแบบคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเมื่อไปกระทบวัตถุใดพลังงานบางส่วนอาจสะท้อน บางส่วนอาจผ่านทะลุส่วนที่เหลือ จะถูกดูดกลืนเข้าสู่ภายในวัตถุ

2.6 ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัตถุ

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของวัตถุนั้น นอกจากจะได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมภายนอกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับสมบัติต่างๆ ของแต่ละวัตถุด้วยและสมบัติที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วย

2.6.1 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity; k)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน คือ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของวัตถุใดๆ ซึ่งจะแปรผันตรงกับปริมาณความร้อนและความหนา แต่จะแปรผกผันกับความต่างระวางอุณหภูมิทั้งสองด้าน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีหน่วยในระบบ SI คือ $W/m.K$

2.6.2 การนำความร้อน (Thermal conductance; C)

การนำความร้อน คือ ปริมาณความร้อนที่แปรผันตรงกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและแปรผกผันกับความหนาของพื้นที่ 1 หน่วย มีหน่วยในระบบ SI คือ $W/m^2.K$

2.6.2.1 กฎเบื้องต้นของการนำความร้อน

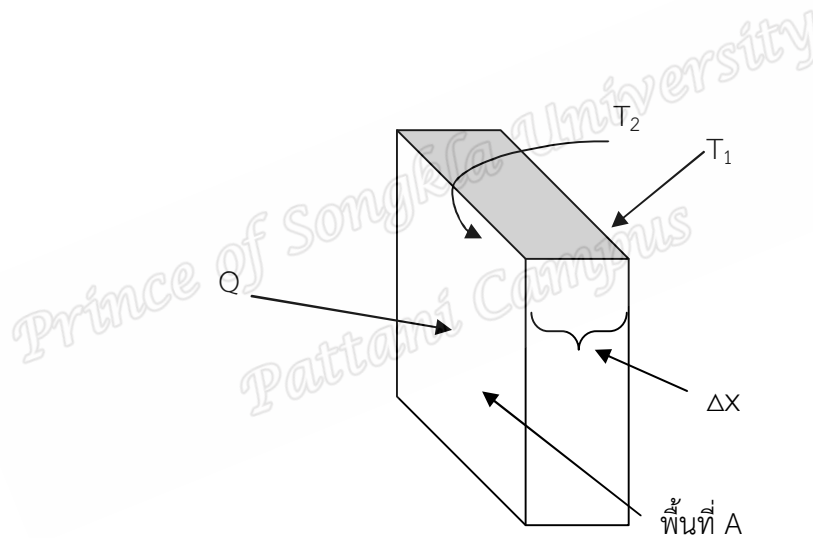
ความร้อนซึ่งเป็นการถ่ายเทโดยการนำจะไหลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ผ่านตัวกลางที่มีพื้นที่ A ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ ดังรูปที่ 2.1 วัสดุที่มีความหนา Δx ผิวด้านหนึ่งมีอุณหภูมิตั้งที่ T_1 ส่วนอีกด้านหนึ่งมีอุณหภูมิตั้งที่ T_2 ซึ่งถ้าทำให้อุณหภูมิตั้งที่ T_1 สูงกว่าผิวด้านตรงข้าม T_2 แล้ว จะได้

$$Q = kAt \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.11)$$

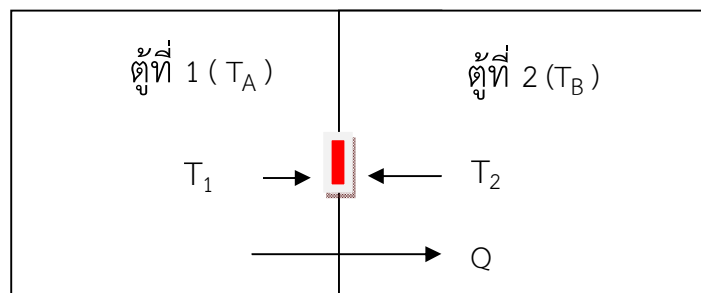
$$q = k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad ; \quad q = \frac{Q}{t} \frac{1}{A} \quad (2.12)$$

โดยที่

- Q คือ ปริมาณความร้อนความร้อนทั้งหมด (J)
- k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m-K)
- A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของฟลักความร้อน (m^2)
- ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวทั้งสอง (K)
- q คือ Heat flux (W/m^2)
- x คือ ความหนาของวัตถุ (m)



ภาพที่ 2.3 การนำความร้อนของวัตถุผ่านเนื้อวัสดุ พื้นที่ A หนา Δx



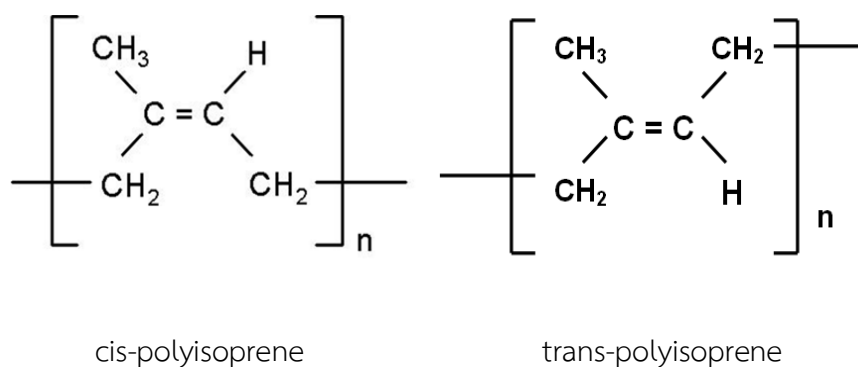
ภาพที่ 2.4 แผนผังตำแหน่งอุณหภูมิของชุดทดลองสมมติการเป็นฉนวน

ตาราง 2.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ (ประยูร สุรินทร์, 2544)

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/mK)
อะลูมิเนียมบริสุทธิ์	201
ทองเหลือง	110
ทองแดง	385
เหล็กหล่อสีเทา	75
ตะกั่ว	35
เงิน	419
เหล็กผสมคาร์บอนต่ำ	63
ดีบุก	65
สังกะสี	111
ไนลอน	0.25
พอลีสไตรีน	0.08
ยาง	0.15
ไม้	0.15

2.7 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติที่ได้จากยางพาราฮีเวียบราซีเลียสซิส (*Hevea brasiliensis*) เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบหลักร้อยละ 94 โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบที่เหลือเป็นโปรตีน ไขมัน และเกลืออินทรีย์อื่นๆ เช่น ซีลี้า และอนุมูลของโลหะ เป็นต้น มีหน่วยซ้ำกันเป็นไอโซพรีน (C_5H_8) ยางธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุลที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 50,000 – 3,000,000 g/mole โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นไอโซเมอร์ชนิด cis-isomer มากกว่า 99.99% และมี trans-isomer ปริมาณน้อยมาก ดังนั้นจึงเรียกกยางธรรมชาติว่า cis-1, 4- polyisoprene



ภาพที่ 2.5 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารา *Hevea brasiliensis* และ *Guayule* อยู่ในรูป cis-form ส่วนยางที่ได้จากยางชนิด Gutta – percha และ Balata อยู่ในรูป trans-form คำว่า cis และ trans ต่างกันตรงความสามารถในการเรียงตัวให้เป็นระเบียบ ทำให้เกิดการตกผลึกคือ trans-form จะตกผลึกได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิห้อง ส่วน cis-form เมื่อโมเลกุลจัดตัวจะทำให้เกิดการตกผลึกบางส่วน ดังนั้น trans-form จะแข็งที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีสมบัติเป็นยาง แต่ cis-form ยังมีสมบัติเป็นยาง

จากสูตรโครงสร้างของยาง จะเห็นว่ายางมีพันธะคู่และพันธะเดี่ยวอยู่ในโมเลกุล ลักษณะคล้ายว่ามีส่วนเป็นของแข็งและส่วนอ่อนอยู่ในโมเลกุล และการจัดเรียงตัวเป็นโมเลกุลยาวแบบนี้ ทำให้ยางมีสมบัติยืดหยุ่นได้ การที่มีพันธะคู่ ทำให้ไฮโดรเจนตรงใกล้พันธะนั้นแข็งแรงและเป็นจุดที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกับสารประกอบกำมะถัน หรือ peroxide ได้ และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง methyl group เป็นกลุ่มที่ส่งอิเล็กตรอนเข้าไปยังพันธะคู่ จึงเป็นตัวกระตุ้นให้พันธะคู่แสดงประสิทธิภาพแรงขึ้น ก็ยิ่งทำให้ไฮโดรเจนตรงใกล้พันธะคู่ มีสถานะแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นยางธรรมชาติจึงทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับกำมะถันหรือ peroxide ได้ไว

2.8 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber)

การรีเคลมเป็นกระบวนการเปลี่ยนยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว (เกิดโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ) โดยใช้สารเคมีและความร้อนตัดพันธะเชื่อมขวางโมเลกุลของยาง ให้เกิดเป็นยางที่มีสมบัติที่ไหลและขึ้นรูปใหม่ได้ อย่างไรก็ตามยางรีเคลมที่ถูกนำมาวัลคาไนซ์ใหม่จะมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่ายางใหม่ ดังนั้นยางรีเคลมจึงมักจะถูกนำไปผสมร่วมกับยางใหม่เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางรีเคลมให้ดีขึ้น

โดยทั่วไปยางล้อหนึ่งเส้นประกอบด้วยส่วนที่เป็นยางร้อยละ 50-55 เขม่าดำร้อยละ 30 น้ำมันร้อยละ 8-10 และสารเคมีอื่นๆ ร้อยละ 6-8 การผสมยางรีไซเคิลลงไปใหม่ๆ จะไม่ทำให้สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป แต่จะทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง

2.9 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)

พอลิเอทิลีนผลิตจากแก๊สเอทิลีนที่ผ่านกระบวนการเติมสารที่ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้ภายใต้แรงดันขนาดต่าง ๆ ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ลักษณะเป็นน้ำมัน หรือไขข้น) ไปจนถึงขนาดโมเลกุลสูง (ลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้)

2.9.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

LDPE เป็นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (0.910 - 0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่ผลิตโดยใช้แรงดันสูง จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุกรมอิสระมีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ดี ทนต่อการกรอกรอบแตก มีความนิ่ม ความใสแต่ใสไม่เท่าพลาสติกชนิด PP (polypropylene, สัญลักษณ์เลข 5) โครงสร้างทางเคมีเป็นกิ่งสาขา (branching) มากกว่าโครงสร้างทางเคมีของ HDPE (high-density polyethylene, สัญลักษณ์เลข 2) จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่ำกว่า และมีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่า HDPE LDPE ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี โดยทนความร้อน (ทนอุณหภูมิสูงถึง 80°C และทนอุณหภูมิสูงถึง 95°C ในช่วงสั้น ๆ) แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงในหม้ออัดไอน้ำ (autoclave) เท่าพลาสติกชนิด PP และทนต่อสารเคมีน้อยกว่า HDPE เริ่มหลอมตัวที่ 120°C ทนความเย็นได้ถึง - 50°C ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้ LDPE มีสีขาวขุ่น โปร่งแสงมีความลื่นมันในตัวมีความเหนียวและยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้

2.9.2 การนำไปใช้

LDPE มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่น เหมาะสำหรับผลิตแผ่นฟิล์มต่างๆ เช่น วัสดุสำหรับบรรจุหีบห่ออาหาร ซองอาหาร ถุงใส่ของ และเคลือบด้านในของถังกระดาษ

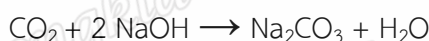
2.10 โซเดียมไบคาร์บอเนตหรือสารก่อกอง (Sodium bicarbonate)

ผงฟูมีชื่อเรียกทางเคมีว่าโซเดียมไบคาร์บอเนตหรือโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (sodium bicarbonate or sodium hydrogen carbonate) เป็นสารประกอบที่มีสูตรทางเคมี NaHCO_3 ผงฟูมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีโครงสร้างเป็นผลึก แต่ปรากฏในรูปผงละเอียด มีคุณสมบัติเป็นเบส ผงฟูมีชื่อทางการค้าที่เรียกกันทั่วไปหลายชื่อด้วยกัน เช่น เบรกกิ้งโซดา (baking soda) เบรดโซดา (bread soda) คุกกิ้งโซดา (cooking soda) และ ไบคาร์บอเนตโซดา (bicarbonate of soda)

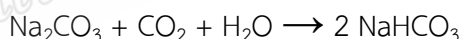
2.10.1 กระบวนการผลิตโซเดียมไบคาร์บอเนต

NaHCO_3 เตรียมได้จากกระบวนการโซลเวย์ (Solvay process) โดยมีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมคาร์บอเนตและน้ำ

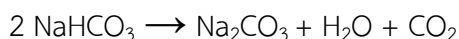


2. จากนั้นเติมคาร์บอนไดออกไซด์ให้ไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมคาร์บอเนตก็จะได้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต หรือผงฟูตกตะกอนลงมาเมื่อมีความเข้มข้นมากเพียงพอ

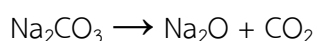


2.10.2 การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน

เมื่อผงฟูได้รับความร้อนมากกว่า 70°C จะค่อยๆ สลายตัวไปเป็นโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปฏิกิริยาการสลายตัวนี้เกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิ 250°C



หากเผาโซเดียมคาร์บอเนตต่อที่อุณหภูมิ 1000°C ก็จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์



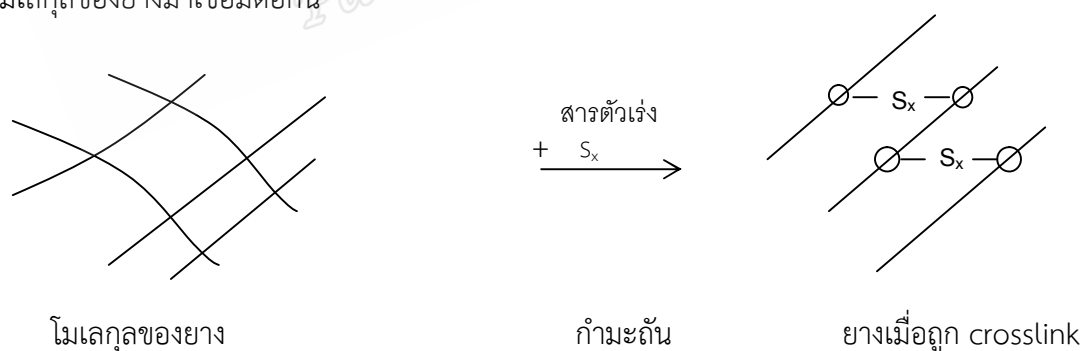
2.10.3 การนำไปใช้

ที่พบได้ทั่วไปคือใช้ในการทำอาหาร ทำเบเกอรี่ ซึ่งผงฟูนี้จะใช้เป็นแหล่งให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการสลายตัว ในขั้นตอนการอบเบเกอรี่ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายใน ทั้งนี้สามารถผสมผงฟูเป็นส่วนประกอบของเบเกอรี่ชนิดต่าง ๆ และสามารถทิ้งส่วนผสมนี้ไว้โดยที่ไม่เกิดก๊าซ CO₂ ก่อนขั้นตอนการอบได้ นอกจากนี้ยังใช้ปรับสภาพสระว่ายน้ำ หรือตู้ปลาให้มีความเป็นกลาง เนื่องจากการเติมคลอรีนที่มากเกินไปทำให้สระว่ายน้ำมีความเป็นกรดมากเกินไป

2.11 การวัลคาไนซ์โดยใช้กำมะถัน

การวัลคาไนซ์ คือขบวนการเปลี่ยนแปลงที่อยู่สภาพที่ไม่คงตัวให้เป็นอย่างที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้างโดยการใช้สารวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุล ซึ่งเรียกว่าเกิดการ crosslink

การวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ สารที่นิยมใช้วัลคาไนซ์จะเป็นกำมะถัน สารที่ให้กำมะถัน (sulphur donor) และเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น (พรพรรณ, 2527) โดยเมื่อใส่กำมะถันในยางแล้วนำยางมาให้ความร้อนจะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้นคือ เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่เหนียว และไม่ละลายในตัวทำละลายเป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากกำมะถันทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน



ภาพที่ 2.6 การเชื่อมโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน (พรพรรณ, 2527)

2.12 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

การวัดความหนาแน่น (density) และความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) หรือความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) จัดเป็นวิธีที่ง่ายในการตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นทางฟิสิกส์ของยาง ยางผสมสารเคมี หรือสารเคมีต่างๆที่ใช้ เพราะเป็นวิธีที่ง่ายสะดวกและไม่ต้องการเครื่องมือที่ซับซ้อน สามารถนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าเชิงทฤษฎีได้

2.12.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น เป็นอัตราส่วนระหว่างมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ดังนั้นความหนาแน่นจึงเป็นค่าที่บอกปริมาณเนื้อสารชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยปริมาตรสารเนื้อเดียวกันจะมีความหนาแน่นที่สามารถใช้บอกชนิดของวัตถุได้ ความหนาแน่นของสารจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเพราะการเปลี่ยนอุณหภูมิทำให้ปริมาตรของสารเปลี่ยนแปลงไป หน่วยมาตรฐานสากลของความหนาแน่นคือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หน่วยปฏิบัติที่นิยมใช้คือ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.12.2 การหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะด้วยวิธีแทนที่ด้วยน้ำ

วิธีนี้ใช้หลักการคิมิตีส์ที่ว่า แรงพยุงของของเหลวมีค่าเท่ากับมวลของของเหลวที่ถูกแทนที่เมื่อชั่งวัตถุในของเหลวนั้นจะทำให้สามารถหาปริมาณของวัตถุได้ดังนี้

ชั่งวัตถุในอากาศได้ W กรัม

ชั่งในน้ำได้ W_1 กรัม

น้ำหนักวัตถุหายไปในน้ำเท่ากับ $W - W_1$ กรัม ซึ่งมีค่าเท่ากับปริมาตรของวัตถุ
นั้นที่ถูกแทนที่อยู่

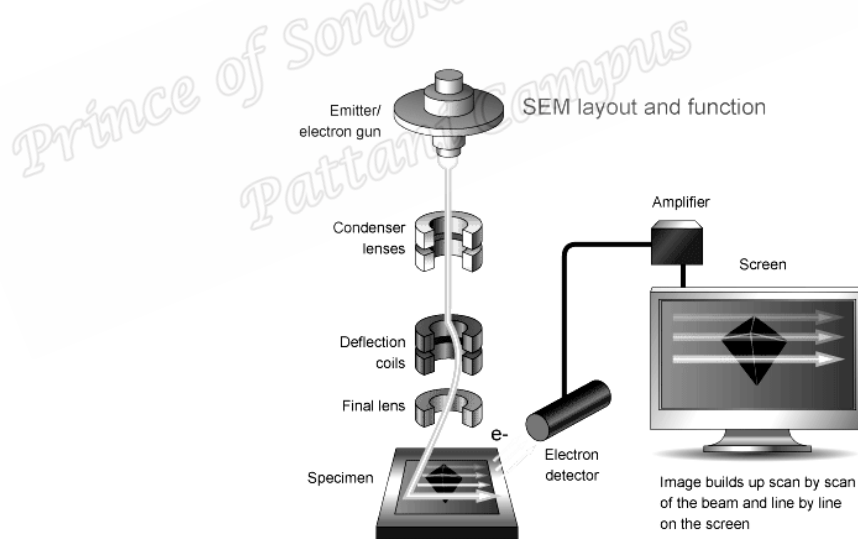
$$\text{ดังนั้น ปริมาตรวัตถุ } V = \frac{W - W_1}{d_w} \quad (2.13)$$

$$\text{นั่นคือ } \text{ถ.พ. ของวัตถุ} = \frac{W}{(W - W_1)_1} \times d_w \quad (2.14)$$

เมื่อ d_w เป็นความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ $t^\circ\text{C}$

2.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมากและเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตรและให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 10^5 เท่าและสามารถแจจแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร



ภาพที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง SEM (Nada, 2015)

2.14 สมบัติการต้านการดึง (Tensile test)

สิ่งที่สำคัญของการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ คือ ชิ้นงานทดสอบซึ่งส่วนใหญ่จะมีรูปทรง dumbbell ซึ่งจะได้จากการเตรียมชิ้นงานแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุ เช่นกรณีที่มี

เป็นยางก็จะได้จากการตัดแผ่นยางเป็นรูป dumbbell (จากแผ่นยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ในเครื่องอัดเข้า)

ในขณะที่ทดสอบจะใช้เครื่อง Universal testing machine โดยจะทำการจับชิ้นงานที่ตำแหน่งปลายทั้งสองด้านด้วยระยะคงที่ (ตามมาตรฐานกำหนด) แล้วทำการดึงยืดชิ้นงานด้วยอัตราการดึงที่คงที่ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงและระยะยืดของชิ้นงานบริเวณตรงกลาง ผลที่ได้เบื้องต้นจากการทดสอบคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะทาง ซึ่งอาจจะมีการรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์และสถานะ (ความเร็ว, อุณหภูมิ) ที่ทำการดึง จากแรงและระยะทางที่ได้ สามารถนำมาคำนวณค่า tensile parameters ต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.14.1 ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ การเปลี่ยนรูปของวัสดุ (deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำซึ่งคือการตอบสนองของวัสดุเมื่อมีความเค้นมากระทำต่อวัสดุนั้นและทำให้มีการเคลื่อนที่ภายในเนื้อของวัสดุนั้น รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะทั่วไปของชิ้นงานรูป dumbbell สำหรับการทดสอบแรงดึง โดยในการ คำนวณค่าความเครียด (strain) จะใช้ค่า Δl ต่อ l_0 ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.15)$$

โดยที่

ε คือ ความเครียด

Δl คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป (m)

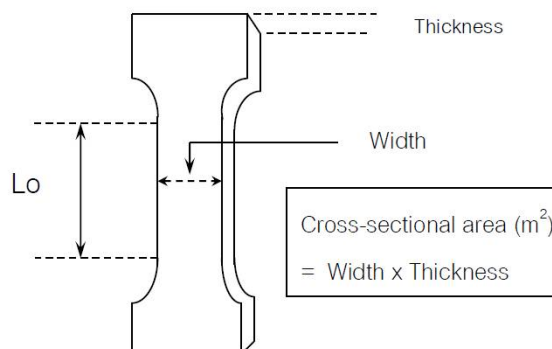
l_0 คือ ความยาวเริ่มต้น (m)

การเปลี่ยนรูปของวัสดุสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

2.14.1.1 การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปของวัสดุเมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุจะคงรูปร่างเดิมเอาไว้หรือวัสดุจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิมเมื่อหยุดให้แรงกระทำ

2.14.1.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) เป็นการเปลี่ยนรูปของวัสดุเมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น กล่าวคือ เมื่อมีแรงกระทำต่อ

วัสดุให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่เมื่อหยุดให้แรงกระทำ วัสดุจะไม่เคลื่อนที่กลับเข้ามาในตำแหน่งเดิม



ภาพที่ 2.8 แสดงขนาดและรูปทรงของชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง

2.14.2 ความเค้น (Stress)

ความเค้น คือ แรงต้านทานภายในเนื้อของวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ว่าการวัดแรงต้านทานภายในเนื้อของวัสดุนั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ เพราะฉะนั้นโดยทั่วไปแล้วความเค้นมักถูกกล่าวถึงในแง่ของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เนื่องจากแรงภายในเนื้อวัสดุคือปฏิกิริยาของวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำ ซึ่งแรงทั้งสองนี้มีขนาดเท่ากัน สามารถคำนวณหาค่าความเค้นได้จากสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.16)$$

โดยที่

- σ คือ ความเค้น (MPa)
- F คือ แรงที่มากระทำต่อวัสดุ (N)
- A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (m^2)

โดยทั่วไปแล้วความเค้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับแรงภายนอกที่มากระทำ คือ

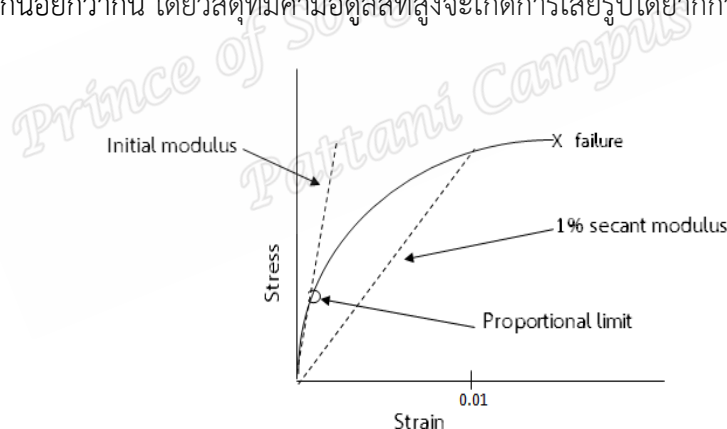
2.14.2.1 ความเค้นแรงดึง (tensile stress) เมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางโดยพยายามให้วัสดุยืดออกและแยกออกจากกัน

2.14.2.2 ความเค้นแรงกด (compressive stress) เมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางโดยพยายามกดให้วัสดุหดตัวลง

2.14.2.3 ความเค้นแรงเฉือน (shear stress) เมื่อมีแรงมากระทำขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านกันโดยที่ความเค้นแรงเฉือนมีค่าเท่ากับผลลัพธ์ของแรงเฉือนและพื้นที่ภาคตัดขวางที่ขนานกับแรงเฉือนที่มากระทำ

2.14.3 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus)

มอดูลัสที่กล่าวถึงข้างต้นนี้ จะได้จากการคิดคำนวณจากกราฟในช่วง linear หรือช่วงที่ยังมีพฤติกรรมเป็นแบบอิลาสติก (ช่วงการยืดตัวหรือ strain น้อยๆ) และบางครั้งจะเรียกค่ามอดูลัสในแบบดังกล่าวว่า Young's modulus หรือ initial modulus นอกจากนี้ยังมีค่ามอดูลัสอีกลักษณะหนึ่งคือ secant modulus ซึ่งได้จากอัตราส่วนความเค้นต่อความเครียดที่วัดจากช่วงต่างๆ ในเส้นกราฟ (รูปที่ 2.9) ค่ามอดูลัสยังสามารถบอกแนวโน้มว่าวัสดุชนิดใดมีความต้านทานต่อการเสียรูปมากน้อยกว่ากัน โดยวัสดุที่มีค่ามอดูลัสที่สูงจะเกิดการเสียรูปได้ยากกว่าวัสดุที่มีค่ามอดูลัสที่ต่ำ



ภาพที่ 2.9 การหาค่ามอดูลัสในแบบต่างๆ

2.15 สมบัติการไหล (Rheology)

คำว่าวิทยาศาสตร์การไหล (Rheology) มีที่มาจากภาษากรีก โดยคำว่า rheo หมายถึง การไหล Bingham และ Crawford ได้เสนอแนะว่าเป็นศาสตร์ที่ใช้อธิบายการไหลของของเหลวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแข็ง ความหนืด (viscosity) จึงเป็นความต้านทานของของเหลวต่อการไหล ความหนืดที่สูงขึ้นก็จะมี ความต้านทานต่อการไหลมากขึ้นด้วย (สมบัติ, 2549) ของเหลวธรรมดา

สามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ ในขณะที่สารกระจายตัวที่มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีคุณสมบัติการไหลที่ซับซ้อนและไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้

2.15.1 การวัดความหนืด

การวัดความหนืดทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของของไหล เมื่อมีแรงกระทำ (F) ขนานกับพื้นผิว เรียกว่าแรงเฉือน (shear force) เมื่อพิจารณาถึงของไหล ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน ชั้นที่อยู่ล่างสุดของของไหลจะถูกยึดไว้ถ้าแผ่นด้านบนของของไหลได้รับแรงกระทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แผ่นด้านล่างถดถอยไปจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแผ่นของไหลชั้นล่างสุดที่ไม่เคลื่อนที่ ความแตกต่างของความเร็ว (dv/dx , S) ค่าแรงต่อหน่วยพื้นที่ (F/A) ที่ทำให้เกิดการไหล เรียกว่า แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (shear stress, F') ถ้าของไหลมีความหนืดสูงขึ้น ก็ต้องใช้แรงเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้อัตราเฉือนเท่าเดิม (สಾಯน์ท์และวิรัตน์, 2549) ดังนั้น อัตราเฉือนจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงเฉือน ดังสมการ

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} \quad (2.17)$$

η คือ สัมประสิทธิ์ของความหนืด (coefficient of viscosity) สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\eta = \frac{F'}{S} \quad (2.18)$$

เมื่อ

F' คือ แรงเฉือน (shear stress, τ) ต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น Pascal (Pa)

S คือ อัตราเฉือน (shear rate, γ) การเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อระยะทาง dx (velocity gradient) มีหน่วยเป็น sec^{-1} หน่วยของความหนืดคือ poise

1 poise คือ แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 cm^2 หนา 1 cm เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/sec (1 poise=100 centipoise) ส่วนกลับของความหนืด เรียกว่า fluidity (ϕ)

2.15.2 ลักษณะการไหลของของไหล (Kinematic viscosity)

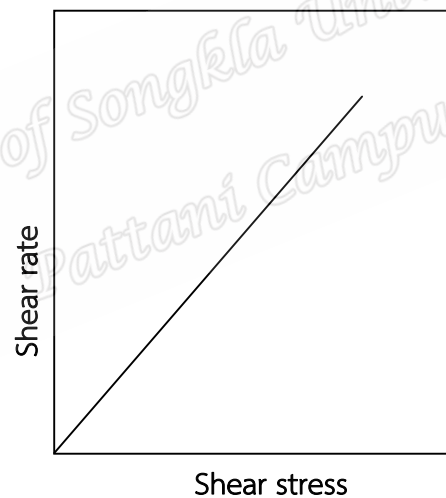
U.S.P จะกำหนดให้แสดงความหนืดในรูปของ kinematic viscosity นั่นคือค่า absolute viscosity (η) หารด้วยค่า density (ρ) ของของเหลวที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ หน่วย stoke (st)

$$\text{Kinematic viscosity} = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.19)$$

ลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ

1. Newtonian fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คืออุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน

เมื่อเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ที่หลายๆ ค่า จะได้กราฟการไหล (Rheogram) ที่เป็นเส้นตรงออกจากจุดกำเนิด



ภาพที่ 2.10 กราฟการไหลแบบ Newtonian

2. Non Newtonian fluid เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งออกเป็น 4 แบบ

2.1 Pseudoplastic ของไหลที่เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนค่าความหนืดลดลงพฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น shear thinning (ส่ายันท์และวิรัตน์, 2549) เช่น น้ำผลไม้เข้มข้น สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

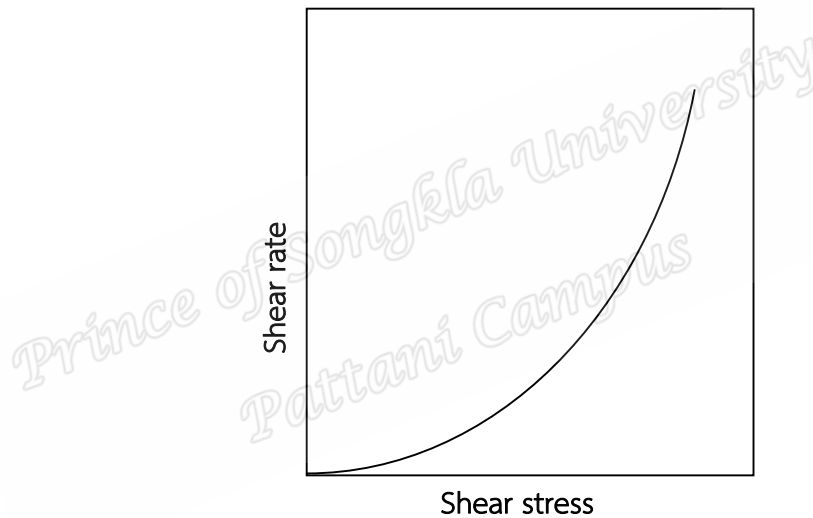
เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate หลาย ๆ ค่า จะได้กราฟไม่เป็นเส้นตรง ความหนืดของสารจะไม่คงที่ ดังนั้นในการเปรียบเทียบความหนืดของสารที่มีการไหลในรูปแบบนี้ต้องใช้การเปรียบเทียบหรือใช้สมการ exponential

หาก N มีค่า 1 ก็จะเท่ากับสมการการไหลแบบ Newtonian เมื่อค่า exponent เพิ่มมากกว่า 1 การไหลจะเป็นแบบ Pseudo plastic

เมื่อแปลงเป็น logarithmic จะได้

$$\log \dot{\gamma} = N \log \tau - \log \eta \quad (2.20)$$

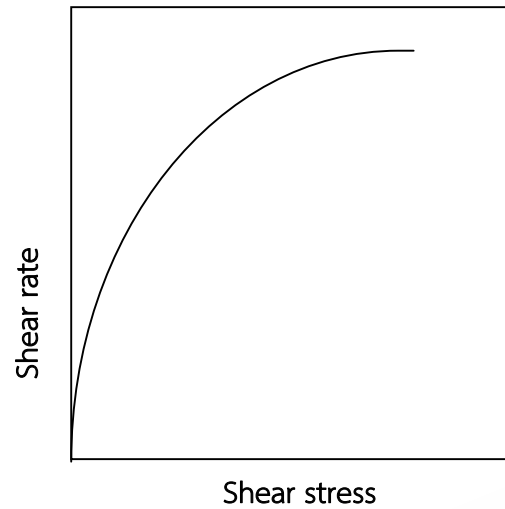
ถ้านำค่า shear stress และ shear rate มาพลอตบนกราฟ log จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน คือ N และจุดตัดแกน y คือ $-\log \eta$



ภาพที่ 2.11 กราฟการไหลแบบ Pseudoplastic

2.2 Dilatant ของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น shear thickening ตัวอย่างเช่น ยาน้ำแขวนตะกอนที่มีความเข้มข้นของผงยาสูงกว่า 50% น้ำดินชั้น น้ำแป้ง เป็นต้น

เมื่อเขียนในรูปสมการที่ 2.20 จะได้ค่า N น้อยกว่า 1

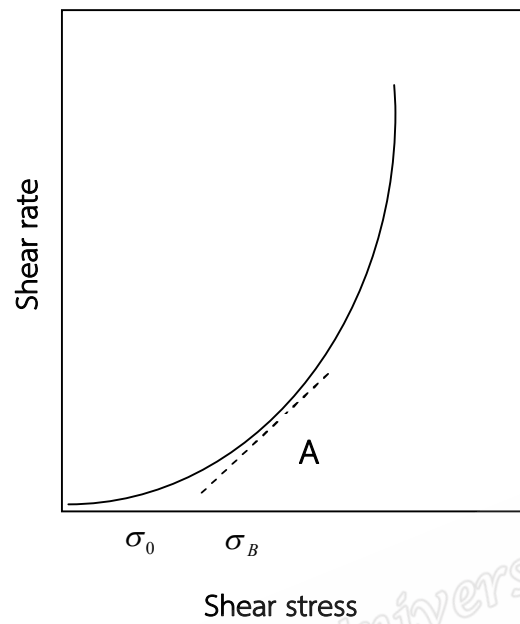


ภาพที่ 2.12 กราฟการไหลแบบ Dilatant

2.3 Bingham fluid ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงมากจนถึงจุดที่เรียกว่า yield value หรือ yield stress จึงจะเกิดลักษณะการไหลแบบ Newtonian Fluid ตัวอย่างเช่น ยาสีฟัน น้ำเคลือบของเซรามิก นมช็อกโกแลต เป็นต้น

เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ที่หลายๆ ค่า จะได้กราฟการไหล ดังรูป เมื่อลากเส้นต่อจากจุด A ตัดแกน shear stress ที่ τ_B คือค่าของ yield value จากค่าความชันของกราฟ สามารถหาค่าความหนืดได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ ได้เป็น plastic viscosity (U) ตามสมการต่อไปนี้

$$U = \frac{\tau_0 - \tau_B}{\gamma} \quad (2.21)$$



ภาพที่ 2.13 กราฟการไหลแบบ Bingham fluid

2.4 Plastic ของไหลที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอเพื่อเอาชนะค่าความเค้น ณ จุด yield stress ถึงจะเริ่มไหลได้และจะไหลแบบ Pseudoplastic หรือตามโมเดลของ Herschel-Buckley ตัวอย่างเช่น ซอสมะเขือเทศ สี ดินเหนียว มายองเนส เป็นต้น

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการนำเอาวัสดุ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆมาใช้ในการเตรียมตัวอย่าง ในบทนี้ได้มีการกล่าวถึงรายละเอียดวิธีการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และการทดสอบหาค่าการนำความร้อน ทดสอบการทนต่อการดึง ทดสอบสมบัติการไหล และค่าความหนาแน่น ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดต่างๆดังนี้

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 ยางแท่ง (NR (STR 5L))

3.1.2 ยางรีเคลม

3.1.3 สารเคมี

3.1.3.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ชนิด White seal

3.1.3.2 กรดสเตียริก (Stearic acid)

3.1.3.3 Tetramethylthiuram Disulphide (TMTD)

3.1.3.4 N-phenyl-N'-1, 3-dimethylbutyl-p-phenylenediamine (6PPD)

3.1.3.5 กำมะถัน (Sulphur)

3.1.4 สารตัวเติม

3.1.3.1 โซเดียมไบคาร์บอเนต

3.1.3.2 เศษแผ่นฟิล์ม LDPE

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม

3.2.2 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll Mill)

เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง เป็นเครื่องมือที่ใช้ทำให้ยางมีความแข็งลดลงหรือนิ่มลง ในกระบวนการดังกล่าว โมเลกุลของยางเกิดการฉีกขาดจากกัน ทำให้ขนาดของโมเลกุลของยางเล็กลง การที่

ยางนิ่มลงทำให้สามารถแปรรูปยางได้ รวมทั้งสามารถนำสารเคมีมาผสมในยางให้มีสมบัติตามต้องการได้ กระบวนการที่ทำให้ยางนิ่มนี้มีชื่อเรียกว่า masticate การที่เครื่องบดยางสองลูกกลิ้งทำให้ยางนิ่มลงได้นั้น เกิดจากปัจจัยหลายประการ (บุญธรรมและปรีชา, 2534) เช่น

3.2.2.1 ความเร็วของผิวของลูกกลิ้งทั้งสองไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการฉีกขาดได้

3.2.2.2 ออกซิเจนในบรรยากาศ จะทำให้โมเลกุลของยางที่ขาดออกจากกันนั้น ไม่อาจกลับมารวมตัวกันใหม่ได้

3.2.2.3 อุณหภูมิของลูกกลิ้ง มีผลทำให้ยางนิ่มช้าหรือเร็วได้ ถ้าให้อุณหภูมิของลูกกลิ้งต่ำ ยางจะแข็งตัว



ภาพที่ 3.1 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill)

3.2.4 เครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR)

เครื่อง Oscillating Disc Rheometer เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับหาเวลาการสุกของยาง

3.2.4.1 หลักการทำงานโดยย่อของเครื่อง

ทำได้โดยการนำยางที่ผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วใส่ลงในห้องใส่ยางที่ปิดมิดชิด ใช้ความดันกดยางให้อยู่ภายในห้องนั้น รักษาอุณหภูมิของห้องให้สูงตามกำหนดที่ต้องการจะทดสอบภายในห้องจะมีจานโลหะรูปกรวยป้านสองด้านประกบกันอยู่ จานโลหะดังกล่าวจะถูกห่อหุ้มด้วยยางตัวอย่างที่ใส่เข้าไป จานโลหะนี้จะหมุนทำมุมน้อยๆกลับไปกลับมาตามแนวแกนตั้ง การหมุนเช่นนี้ก่อให้เกิดแรงเฉือนกระทำต่อยาง แรงที่ต้องใช้ในการหมุนจานโลหะในตำแหน่งสูงสุดจะขึ้นกับความแข็งหรือ shear modulus ของตัวอย่างยางนั้น แรงบิดดังกล่าวจะแสดงผลบันทึกตามเวลาที่ผ่านไป ความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในระหว่างวัฏคาบการทดสอบจะถือว่าสิ้นสุดเมื่อแรงบิด

ที่บันทึกได้ถึงจุดสมดุลหรือถึงจุดสูงสุดหรือถึงเวลาที่กำหนดไว้ เวลาดังกล่าวขึ้นอยู่กับส่วนผสมสารเคมีในยางและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ (บุญธรรมและปรีชา, 2534)

สูตรคำนวณการหาเวลาวัลคาไนซ์ (cure time)

$$t_{90} = \frac{90}{100}(M_H - M_L) + M_L$$

เมื่อ t_{90} คือ เวลาเป็นนาที ที่เส้นกราฟจะสูงเป็น 90% ของแรงบิดที่เพิ่มขึ้น
หน่วย min

M_H คือ ค่าทอร์กหรือโมเมนต์สูงสุด หน่วย dN.m

และ M_L คือ ค่าทอร์กหรือโมเมนต์ต่ำสุด หน่วย dN.m



ภาพที่ 3.2 เครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR)

3.2.5 เครื่องขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัด (Compression Moulding)

การอัดยางเข้าแม่พิมพ์เป็นกระบวนการแปรรูปยางชนิดหนึ่ง เพื่อผลิตยางให้มีรูปร่างตามแบบพิมพ์ที่ต้องการ ซึ่งในการอัดยางแบบ compression moulding จะใช้ระบบไฮดรอลิกเป็นหลัก กระบวนการการทำผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้วิธี Compression Moulding มีดังต่อไปนี้ (บุญธรรมและปรีชา, 2534)

3.2.5.1 การเตรียม Rubber Compound (ยางที่ทำการผสมสารเคมีแล้ว)

นำยางที่ผสมสารเคมีแล้ว มาทำการตัดให้ได้ขนาด รูปร่าง และน้ำหนักตามต้องการโดยทั่วไปมักจะให้ยางคอมพาวนด์นี้มีปริมาตรมากกว่าปริมาตรของแบบพิมพ์อยู่ประมาณ 5 – 15%

3.2.5.2 การเตรียมแบบพิมพ์เพื่ออัดยาง

แบบพิมพ์ที่ใช้ในการอัดยางมักจะทำด้วยเหล็กหรืออลูมิเนียม แบบพิมพ์จะมีช่องที่จะให้ยางไหลเข้าไปอยู่รอบๆ ของแบบพิมพ์และจะมีช่องให้ยางที่ใส่เกินปริมาตรไหลล้นออกมา นอกจากนี้ก่อนที่จะนำยางใส่ลงไปแบบพิมพ์จะต้องอุ่นแบบพิมพ์ให้ร้อนเท่ากับอุณหภูมิที่จะอัดยางเสียก่อน

3.2.5.3 การอัดยาง

นำยางคอมปาวนิใส่เข้าไปในแบบพิมพ์ที่ให้ความร้อนแล้วปิดฝา นำเข้าไปอัดในเครื่องอัดไฮดรอลิกแล้วทำการอัดยางโดยเร็ว จนกระทั่งฝาบนของแบบพิมพ์ใกล้จะสัมผัสกับแผ่นอัดบนจากนั้นลดความเร็วในการอัดลงเพื่อให้ยางไหลเข้าไปในแบบพิมพ์อย่างสม่ำเสมอและไล่อากาศออกไป เพราะในบางครั้งการอัดครั้งเดียวไม่อาจที่จะไล่อากาศที่ขังในเนื้อยางและแบบพิมพ์ได้ จะต้องมีการไล่อากาศโดยการอัดแล้วคลายการอัดออกเล็กน้อยแล้วอัดใหม่ อาจจะทำ 1 - 2 ครั้งหรือมากกว่านั้น

3.2.5.4 การกำหนดอุณหภูมิและเวลาในการอัดยาง

เวลาและอุณหภูมิของการอัดเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องกำหนดในการอัดทุกครั้ง เวลาและอุณหภูมิมิมีความสัมพันธ์กันอย่างยิ่ง โดยทั่วไปถ้าเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีก 10 องศาเซลเซียส เวลาในการอัดจะลดลงได้ประมาณครึ่งหนึ่ง แต่ระยะเวลาที่ใช้จริง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับสูตรของยางและความหนาของยาง



ภาพที่ 3.3 เครื่องขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัด (Compression Moulding)

3.2.6 ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนความร้อน

ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อน เป็นเครื่องมือสำหรับวัดสมบัติการถ่ายเทความร้อนของฉนวนกันความร้อนประกอบด้วยตัวเก็บข้อมูลรุ่น EASY SENSE Advanced หัววัดอุณหภูมิรุ่น Smart Temperature Sensor และหัววัดค่าการส่งผ่านความร้อนรุ่น Smart Q Heat flow Sensor ผลิตโดย DATA HARVEST (นพดล ผลไชย,2551)

3.2.6.1 หลักการทำงานโดยย่อของเครื่องมือ

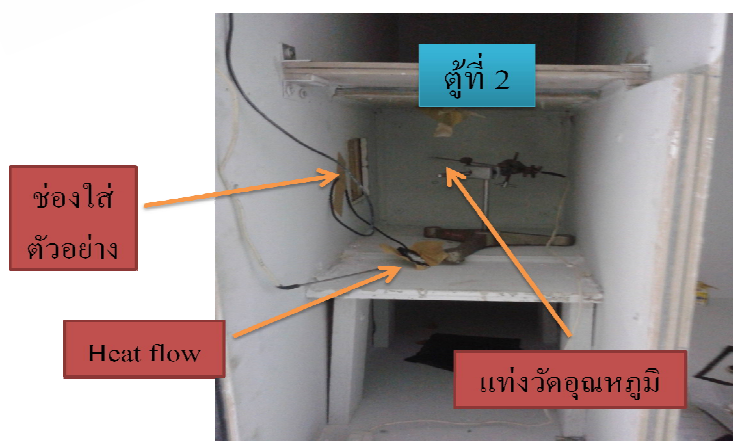
ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อนสร้างขึ้นมาเพื่อกันความร้อนจากภายนอกเป็นพิเศษ สร้างตู้หุ้มฉนวน 3 ชั้น พร้อมควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบ ชุดทดสอบจะประกอบไปด้วยตู้ 2 ตู้ โดยจะให้ความร้อนจากตู้ที่ 1 ส่งผ่านตัวอย่างไปยังตู้ที่ 2 ในตู้ที่ 1 นั้นจะประกอบด้วยหลอดไฟทำหน้าที่ให้ความร้อน พัดลมทำหน้าที่กระจายความร้อนให้คงที่ ทั้งตู้และมีแท่งวัดอุณหภูมิ 2 ตัว คือ แท่งวัดอุณหภูมิห้องและแท่งวัดอุณหภูมิสัมผัสตัวอย่าง ส่วนในตู้ที่ 2 นั้นจะไม่มีให้ความร้อนใด ภายในห้องที่ 2 จะประกอบไปด้วยแท่งวัดอุณหภูมิ 3 ตัว คือ แท่งวัดอุณหภูมิห้อง แท่งวัดอุณหภูมิสัมผัสตัวอย่างและ Heat flow ที่ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิที่ส่งผ่านแผ่นตัวอย่าง อุณหภูมิที่ได้ทุกตัวจะถูกบันทึกไว้ด้วยเครื่อง Data logger ควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์มีความไวในการวัดข้อมูลทุกวินาทีและวัดข้อมูลละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.2.6.2 การเตรียมตัวอย่าง

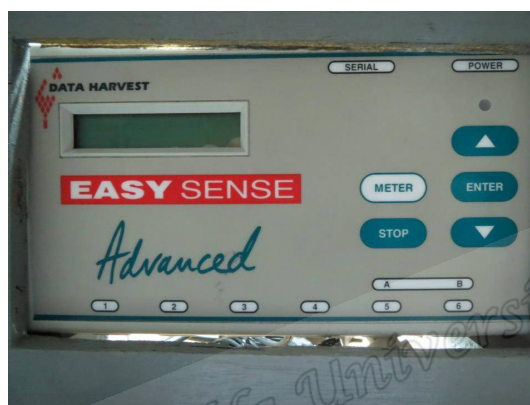
ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการเป็นฉนวนนั้น เตรียมได้จากการนำยางที่ผสมสารเคมีแล้วไปอัดเข้าเพื่อให้คงรูป แล้วนำมาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด $16 \times 16 \text{ cm}^2$ ความหนาที่ใช้คือ 0.1 mm

3.2.6.3 การทดสอบ

จะทำการทดสอบโดยการให้ความร้อนภายในตู้ที่ 1 อุณหภูมิที่ใช้ คือ 79°C เวลาในการทดสอบ คือ 24 ชั่วโมง ให้ความร้อนไปจนถึง 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการปิดเครื่องหรือลดความร้อนใน 12 ชั่วโมงหลัง เพื่อเป็นการเปรียบเทียบในสภาวะจริง จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่อไป



ภาพที่ 3.4 ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อน



ภาพที่ 3.5 ตัวเก็บข้อมูลรุ่น EASY SENSE Advanced ของบริษัท DATA HARVEST (นพดล ผลไชย, 2551)

3.2.7 เครื่องทดสอบสมบัติการดึง (Tensile Meter) รุ่น H10KS

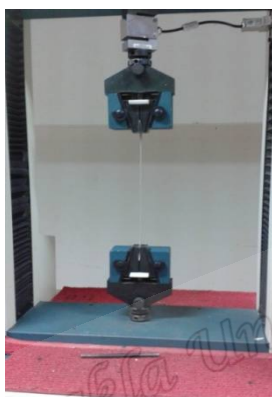
การทดสอบด้วยการดึงเป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติของวัสดุด้านความยืดหยุ่นหรือจุดที่วัสดุรับแรงได้สูงสุดโดยไม่เสียรูป การทดสอบโดยการดึงจะเป็นการให้แรงในแนวแกนเดียว แรงจะทำการกระจายไปทั่วพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ หากนำแรงดังกล่าวมาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบจะได้ค่าความเค้น (Stress, σ) ของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็น N/m^2 หรือ Pa ในขณะที่ให้แรงแก่วัสดุทดสอบจะเกิดระยะยืดขึ้น หากนำระยะยืดดังกล่าวมาหารกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบจะได้ค่าความเครียด (Strain, ϵ) ค่าความเครียดของชิ้นทดสอบจะไม่ มีหน่วย และหากนำค่าความเค้นมาหารด้วยความเครียดจะได้ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus, γ) ของชิ้นทดสอบ

3.2.7.1 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการนำยางที่ทำการอัดเข้าแล้วไปตัดเป็นรูปดัมเบล เพื่อให้ง่ายต่อการยึดกับเครื่องมือในขณะที่ทำการทดสอบ

3.2.7.2 การทดสอบ

การทดสอบนั้นทำได้โดยการเปิดโปรแกรมที่ใช้ในการดึง ทำการป้อนข้อมูลต่างๆ เช่น ความยาว อัตราเร็วที่ใช้ เป็นต้น โดยการทดสอบนี้คือ 50, 100, 200, 300 และ 400 มม./นาที่ ทำการทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่ามอดูลัสต่อไป



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบสมบัติการดึง (Tensile Meter)

3.2.8 เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary Rheometer) รุ่น Geottfert-Rheograph

20

การทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary เป็นการทดสอบการไหลของตัวอย่าง โดยจะทำการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Capillary การไหลของพลาสติกเหลวเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างจากความเค้นเฉือน ในช่วงที่ตัวอย่างมีความเค้นเฉือนมากระทำนั้นโมเลกุลของตัวอย่างจะเกิดการเรียงตัวใหม่เพื่อทำให้เคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลอื่นได้ง่าย ข้อดีของการทำให้ความหนืดลดลงนั้นมีหลายประการ เช่น ทำให้ลดพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเครื่องจักรใช้ในการผลิตมีขนาดลดลง เพิ่มปริมาณการผลิตได้มากขึ้น เป็นต้น



ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary Rheometer) รุ่น Geotfert-Rheograph 20

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Quanta 400 โดยมีกำลังขยายสูงสุดถึง 300,000 เท่า

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบเพื่อต้องการดูโครงสร้างภายในของตัวอย่างทดสอบได้โดยใช้เครื่อง SEM การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง ภาพที่ได้เครื่อง SEM นี้มีลักษณะเป็นสามมิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ลักษณะพื้นผิวด้านนอกและด้านในของวัสดุ เป็นต้น



ภาพที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Quanta 400

3.2.10 เครื่องวัดความหนาแน่น Electric Densimeter รุ่น MD – 300S และ Minimum density resolution: 0.001

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นโดยใช้หลักการแทนที่ของน้ำ เมื่อนำชิ้นทดสอบไปหาน้ำหนักโดยการชั่งในอากาศและในน้ำจะสามารถนำค่าที่ได้ไปหาค่าความหนาแน่นได้จากสูตร

$$\rho = \frac{m}{V}$$

โดยที่

ρ คือ ความหนาแน่น (Kg/m³)

m คือ มวลของชิ้นตัวอย่าง (Kg)

V คือ ปริมาตรของชิ้นตัวอย่าง (m³)



ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดความหนาแน่น Electric Densimeter

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารตัวเติม

3.3.1.1 เศษแผ่นฟิล์ม LDPE (Low Density Polyethylene; LDPE)

เศษแผ่นฟิล์ม LDPE ที่นำมาเป็นสารตัวเติมนั้นเป็นถุงพลาสติกที่ใช้บรรจุผักและผลไม้ ผลิตโดย บริษัท ทานตะวันอุตสาหกรรม จ.นครปฐม ก่อนนำไปผสมในเนื้อยางจะต้องตัดถุงเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อให้เกิดกระจายตัวในเนื้อยางอย่างสม่ำเสมอ

3.3.1.2 ยางรีเคลม (Reclaimed Rubber; RR)

3.3.3 การผสมยาง

นำยางและสารเคมีบดผสมกันด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) โดยใส่สารเคมีลงไปในเรื่องตามลำดับ

3.3.4 การหาเวลาสุกของยาง

ตัดชิ้นยางผสมสารเคมี (Rubber Compound) ที่ได้ไปหาเวลาสุกของยางด้วยเครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR)

3.3.5 การอัดเบ้า

นำยางผสมสารเคมีไปอัดขึ้นรูป ด้วยเครื่องขึ้นรูปแม่พิมพ์แบบอัด (Compression Moulding) ใช้แม่พิมพ์ขนาดความหนา 0.1

3.3.6 ทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

นำยางที่ผ่านการอัดเบ้าแล้วไปทดสอบการเป็นฉนวน ทดสอบการส่งผ่านความร้อน โดยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของฉนวนกันความร้อน โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างที่จะทดสอบ ขนาด กว้าง 16 cm. ยาว 16 cm. และหนา 0.1 cm. ใส่ไว้ในช่องทดสอบระหว่างตู้ทั้งสองหลังจากนั้นเลื่อนตู้เข้าหากัน ชั้นน็อตให้แน่นพร้อมทดสอบ และทำการเปิดชุดความร้อนในตู้ที่ 1 พร้อมกับเก็บข้อมูล (Data logger) เวลาที่ทดสอบ 24 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบคือ 79°C ซึ่งเปรียบเทียบกับอุณหภูมิกลางแดดในเวลากลางวัน ทำการให้ความร้อนใน 12 ชั่วโมงแรก และจะลดอุณหภูมิในอีก 12 ชั่วโมงหลัง จากนั้นนำข้อมูลในเครื่องเก็บข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์เพื่อไปวิเคราะห์ผลและนำค่าอุณหภูมิที่สัมผัสตัวอย่างในตู้ที่ 1 และ 2 มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากสมการ (นพดล ผลไชย,2551)

$$Q = kAt \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

โดยที่

Q	คือ ปริมาณความร้อนทั้งหมด (J)
k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.K)
A	คือ พื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของฟลักความร้อน (m^2)
ΔT	คือ อุณหภูมิที่สัมผัสตัวอย่างระหว่างตู้ที่ 1 และ 2 (K)
Δx	คือ ความหนาของวัสดุ (m)
t	คือ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ (s)

3.3.7 การหาความหนาแน่น

หาความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ โดยการนำชิ้นทดสอบมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ $4 \times 4 \text{ cm}^2$ หาความหนาแน่นโดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่น Electric Densimeter รุ่น MD – 300S และ Minimum density resolution: 0.001

3.3.8 การทดสอบสมบัติการดึง

3.3.8.1 เตรียมชิ้นตัวอย่างโดยนำแผ่นยางที่ได้จากการผสมยางธรรมชาติ สารเคมี และสารตัวเติมต่างๆ นำไปอัดเข้าเพื่อให้ยางคงรูปแล้วนำไปตัดให้เป็นรูปดัมเบล ความยาวที่ใช้คือ 40 ซม.

3.3.8.2 วัดค่า A_0 และ l_0 ของชิ้นตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบสมบัติการดึงโดยเครื่อง Tensile Meter ยึดตัวอย่างกับเครื่องทดสอบให้แน่น แผ่นตัวอย่างที่ยึดนั้นจะต้องไปเอนไปข้างใดข้างหนึ่งและดึงตัวอย่างไม่ให้หย่อนเพื่อความแม่นยำในการทดสอบ ทำการคีย์ข้อมูลลงในโปรแกรม พร้อมทั้งกำหนดความเร็วในการดึงตัวอย่าง ความเร็วที่ใช้ในการดึงคือ 50, 100, 200, 300 และ 400 มม./นาที ทำการทดลองซ้ำอีก 3 รอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล

3.3.8.3 นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่า $\varepsilon, \sigma_n, \sigma_t(t), \lambda$ และค่า $E(t)$ โดยใช้สมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} - 1$$

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0}$$

$$\sigma_t(t) = \sigma_n(1 + \varepsilon)$$

$$\lambda = \varepsilon + 1$$

$$E(t) = \frac{\sigma_t(t)}{\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}}$$

โดยที่

ε	คือ ความเครียด Nominal stress (N/m^2)
Δl	คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป (m)
l_0	คือ ความยาวเริ่มต้น (m)
σ_n	คือ ความเค้น Nominal strain (N/m^2)
F	คือ แรงดึง (N)
A_0	คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น (m^2)
$\sigma_t(t)$	คือ ความเค้นที่เวลาใด ๆ (N/m^2)

$$\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \quad \text{คือ ค่าการเปลี่ยนรูปของโคชี (N/m}^2\text{)}$$

3.3.9 การทดสอบสมบัติการไหล

3.3.9.1 เตรียมตัวอย่างสำหรับนำไปทดสอบสมบัติการไหล ผสมยางกับสารเคมีตามสูตรแต่โดยไม่ต้องผสมกัมมะถันเพื่อที่จะไม่ให้ยางสุกก่อนที่จะไหลในไดน์ ในการทดลองนี้ได้ศึกษาเฉพาะตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมใดๆ และตัวอย่างที่ผสมเศษแผ่นฟิล์ม LDPE ที่ 2, 4, 6, และ 8 phr เท่านั้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบอิทธิพลของสารตัวเติมและอุณหภูมิต่อความหนืดของตัวอย่างดังกล่าว

3.3.9.2 นำยางที่ผสมแล้วไปทดสอบโดยใช้เครื่อง Capillary Rheometer ใช้อุณหภูมิในการทดสอบคือ 100°C, 115°C และ 130°C และใช้อัตราเฉือน 0.1, 1, 10, 100, 300, 600, 800 และ 1,000 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าความหนืดปรากฏของตัวอย่างโดยใช้สมการ

$$\eta_a(T, \dot{\gamma}) = \pi R^3 \Delta P / 8 L Q = \tau_w / \dot{\gamma}_a$$

โดยที่

η_a	คือ ความหนืด (Pa.s)
$\dot{\gamma}_a$	คือ อัตราเฉือนปรากฏ (s^{-1})
τ_w	คือ ความเค้นที่ผนังไดน์ (N/m^2)
ΔP	คือ ความดันต่างที่ปากทางเข้าและปลายไดน์ (Pa)
Q	คือ อัตราการไหล (m^3/s)
R	คือ รัศมีของไดน์ (m)
L	คือ ความยาวของไดน์ (m)

3.3.10 การทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยใช้เครื่อง SEM

3.3.10.1 เตรียมตัวอย่างสำหรับนำไปทดสอบโดยตัดชิ้นตัวอย่างเป็นชิ้นเล็ก นำไปติดกับวัสดุรองรับตัวอย่างที่ส่วนใหญ่ทำมาจากทองเหลือง เรียกว่า stub นำเทปคาร์บอนมาเป็นตัวช่วยยึดตัวอย่างให้ติดกับ stub แล้วยังเป็นตัวเชื่อมการนำไฟฟ้าของตัวอย่างกับ stub อีกด้วย

3.3.10.2 ก่อนนำเข้าเครื่อง SEM ควรปรับความชื้นจากตัวอย่างเสียก่อนเพราะภายในเครื่อง SEM เป็นระบบสุญญากาศ ซึ่งถ้าตัวอย่างมีความชื้นสูงอาจทำให้ระบบสุญญากาศไม่สามารถลดความดันจนเหมาะสมสำหรับการทำงานของเครื่อง SEM ได้

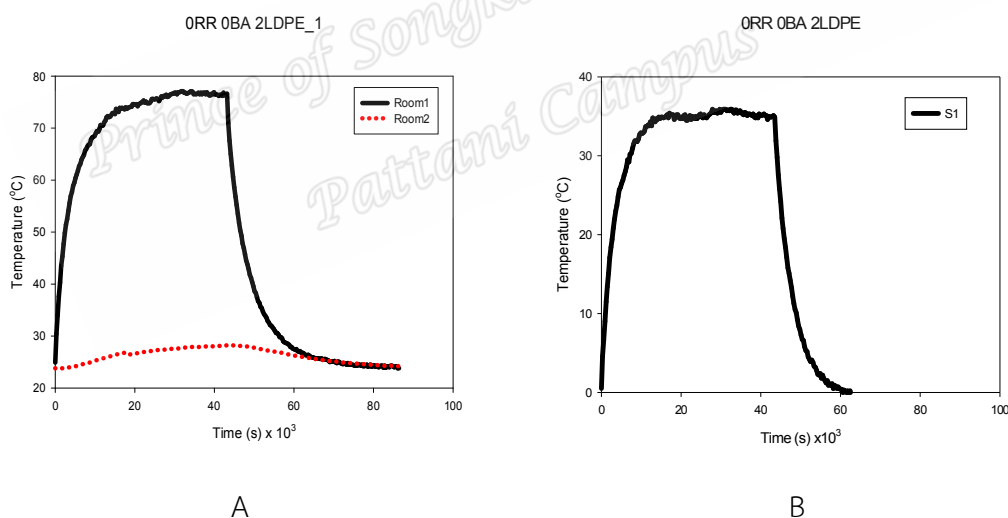
3.3.10.3 นำชิ้นตัวอย่างที่เตรียมไว้แล้วไปทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยใช้เครื่อง SEM โดยเลือกกำลังขยาย 5,000 เท่า, 10,000 เท่า และ 20,000 เท่า

บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อน เชิงกายภาพ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล ความหนาแน่น และศึกษาโครงสร้างและการกระจายตัวจากภาพ SEM ในบทนี้จึงกล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดได้ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อน (ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน; k)



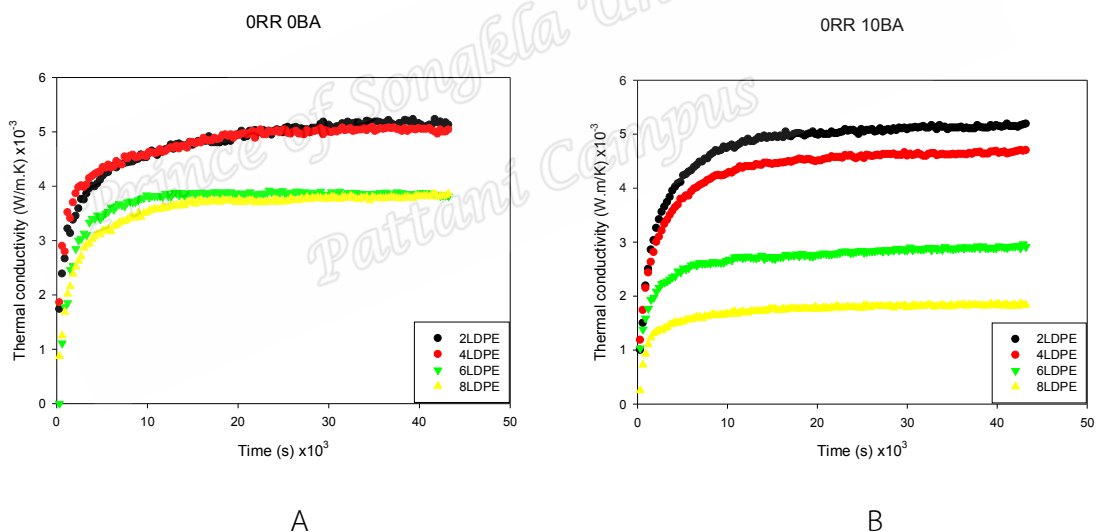
ภาพที่ 4.1 A กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และ B กราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2 phr

จากรูปที่ 4.1 กราฟอุณหภูมิของตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 ในตอนเริ่มต้นจะอ่านค่าได้ค่าเดียวคือ 25°C ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของเครื่องมือ จากนั้นให้ความร้อนในตู้ที่ 1 ถึง 79 °C จะสังเกตเห็นว่าความร้อนที่ผ่านแผ่นยางเข้าไปในตู้ที่ 2 ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 28 °C เท่านั้น การออกแบบสูตรยางต่างๆ เพื่อเพิ่มกลไกหลากหลายในการดูดซับความร้อน เช่น การดูดซับโดยการขยับตัวของโซ่

ยาง การดูดซับโดยการขั้วตัวเล็กน้อยของอนุภาคยางรีเคลม การดูดซับจากโมเลกุลของอากาศใน ฟองอากาศที่เกิดจากสารก่อฟองและยังถูกกันด้วยเศษแผ่นฟิล์ม LDPE จึงส่งผลให้อุณหภูมิในตู้ที่ 2 นั้นเพิ่มขึ้นเพียง 3-4 °C ซึ่งแตกต่างจากฉนวนกันความร้อนแบบเดิมนั้นเป็นการดูดซับความร้อนเพียง หนึ่งกลไกเท่านั้น

4.1.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์การนำความร้อนของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 และ 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแต่ละสูตร จะต้องนำข้อมูลผลการทดลองมาเขียนกราฟอุณหภูมิกับเวลาของตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพันธ์ด้านหน้า และด้านหลังของตัวอย่างกับเวลา ดังรูปที่ 4.1 แล้วนำค่าต่างๆ ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับเวลา ตามสมการ $Q = kAt \frac{\Delta T}{\Delta x}$ ดังรูปที่ 4.2

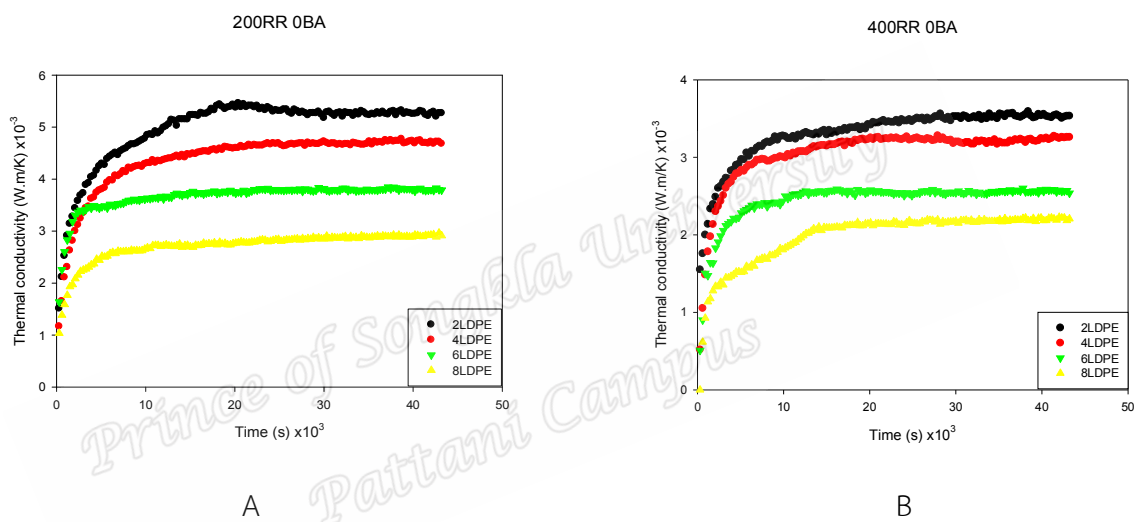


ภาพที่ 4.2 A, B กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับเวลาของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 และ 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นตัวอย่างที่ผสม NR 100 phr BA 0 และ 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ตามลำดับจะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มเศษแผ่นฟิล์ม LDPE สารก่อฟองเข้าไป เนื่องจากเศษแผ่นฟิล์ม LDPE นั้นมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนและมีความยืดหยุ่นและเมื่อเพิ่มปริมาณ

ขึ้น เศษแผ่นฟิล์ม LDPE จะคลี่ตัวออกมาได้ดีขึ้น จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการกั้นความร้อนที่ไหลจากด้านหนึ่งไปสู่อีกด้านของแผ่นยาง เช่นเดียวกันกับสารก่อกองเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อกองเข้าไป จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนนั้นลดลงเช่นกัน เนื่องจากโมเลกุลภายในนั้นได้ดูดซับความร้อนที่ส่งผ่านเข้าไปในเนื้อยาง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจึงลดลง

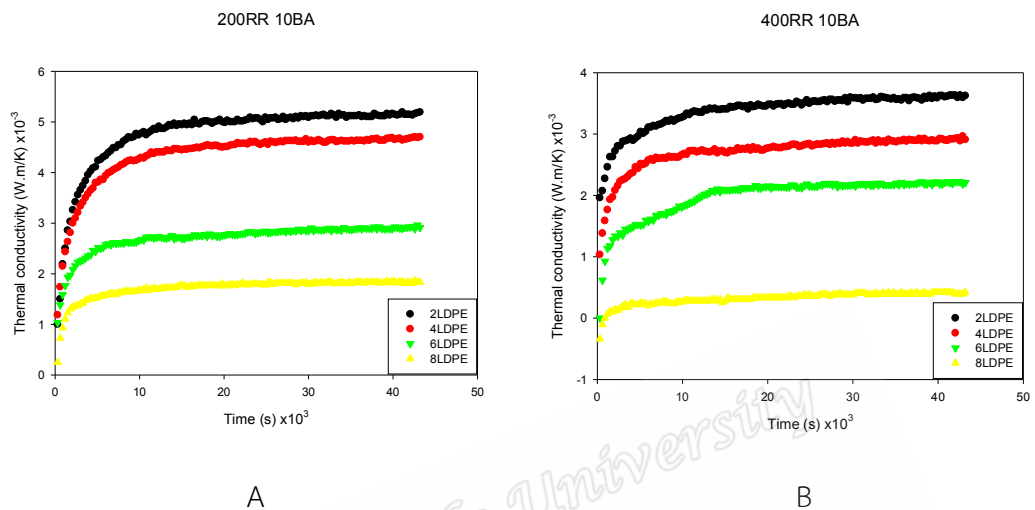
4.1.2 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 และ 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr



ภาพที่ 4.3 A, B กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับเวลาของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 และ 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr โดยทำการแปร RR 200 และ 400 phr และเศษแผ่นฟิล์ม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่ม RR และเศษแผ่นฟิล์ม LDPE เนื่องจาก RR มีส่วนผสมของเขม่าดำที่เป็นโครงสร้าง Agglomerate ภายในโครงสร้างนี้จะมีช่องว่างที่มีอากาศอยู่ภายในซึ่งเป็นตัวช่วยดูดซับความร้อนได้ดีและเมื่อความร้อนผ่านเข้าไปทำให้อุณหภูมิของ RR นั้นขยับตัวเล็กน้อยจึงทำให้เกิดการดูดซับความร้อนได้อีกทางหนึ่ง ในสูตรยังมีการเพิ่มเศษแผ่นฟิล์ม LDPE เข้าไปเพื่อช่วยในเรื่องการกั้นความร้อนอีกทางหนึ่ง ดังนั้นเมื่อผสม RR และเศษแผ่นฟิล์ม LDPE ในปริมาณเพิ่มขึ้น จึงมีแนวโน้มทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง

4.1.3 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 และ 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr



ภาพที่ 4.4 A, B กราฟเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับเวลาของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 และ 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ลดลงไปอีกเมื่อมีการเพิ่ม RR, BA และเศษแผ่นฟิล์ม LDPE เข้าไป สูตรยางนี้ได้มีการผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ตัวเข้าไป จึงเป็นการเพิ่มกลไกการดูดซับความร้อนของแผ่นตัวอย่างให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการดูดซับ RR ซึ่งเป็นยางรีไซเคิลที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว เมื่อนำมาดกกับยางธรรมชาติ จะทำให้โซ่ยางนั้นสั้นลง เมื่อความร้อนผ่านเข้าไปทำให้โซ่ยางเกิดการขยับตัว อีกทั้งยังมีการขยับตัวของอนุภาคภายในของ RR อีกด้วย กลไกการดูดซับความร้อนของยางจึงดีขึ้น การดูดซับจากสารก่อฟอง สารก่อฟองในทำให้เกิดฟองอากาศภายในเมื่อมีความร้อนส่งผ่านเข้ามาฟองอากาศนี้เกิดการขยับตัวชนกัน จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนภายใน และมีการผสมเศษแผ่นฟิล์ม LDPE นอกจากจะช่วยในเรื่องกันความร้อนแล้ว เศษแผ่นฟิล์ม LDPE ยังเป็นตัวที่ทำให้ปริมาตรอิสระในแผ่นยางเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นการเพิ่มกลไกการดูดซับความร้อนได้อีกทางหนึ่งเช่นเดียวกัน

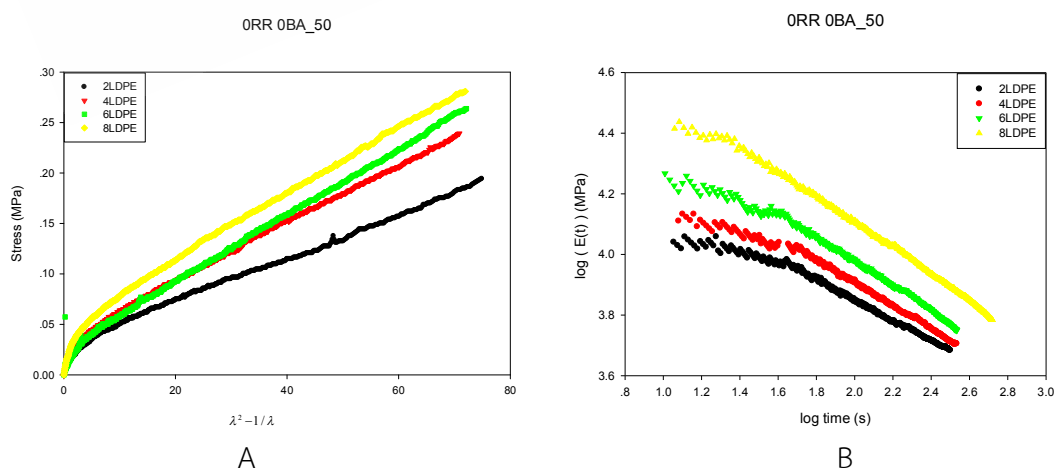
4.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

4.2.1 ความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของยาง (Tensile strength and Modulus)

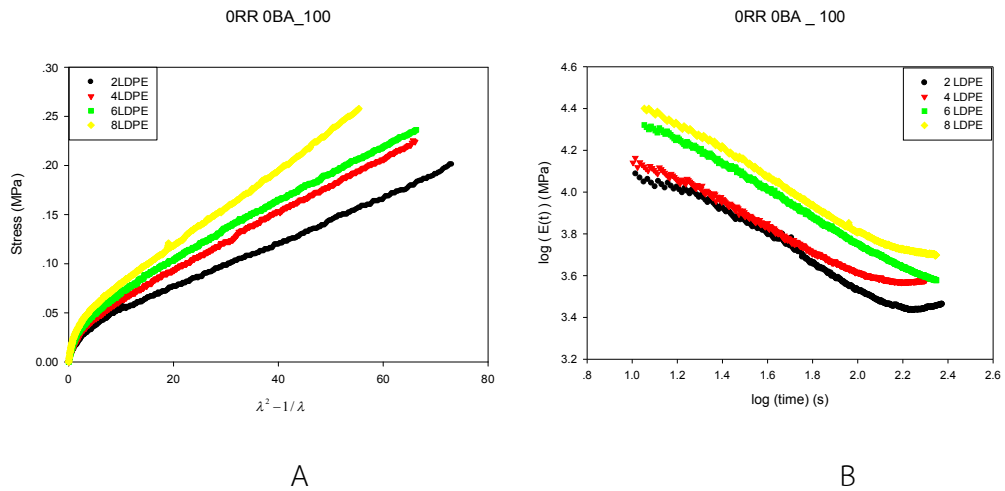
ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองดึงตัวอย่างโดยการนำแผ่นตัวอย่างไปตัดเป็นรูปดัมเบล วัดความยาวเริ่มต้น 18 เซนติเมตร จากนั้นนำไปดึงด้วยเครื่อง Tensile Testing โดยทำการดึงที่ความเร็ว 50, 100, 200, 300 และ 400 มม./นาที จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้น ตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมสารก่อกองค่า Tensile Strength จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ LDPE และ RR เพิ่ม แต่เมื่อมีการเติมสารก่อกองเข้าไป ค่า Tensile Strength จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม LDPE และ RR เข้าไป

4.2.1.1 ผลของ LDPE ต่อค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ความเร็วต่างๆ

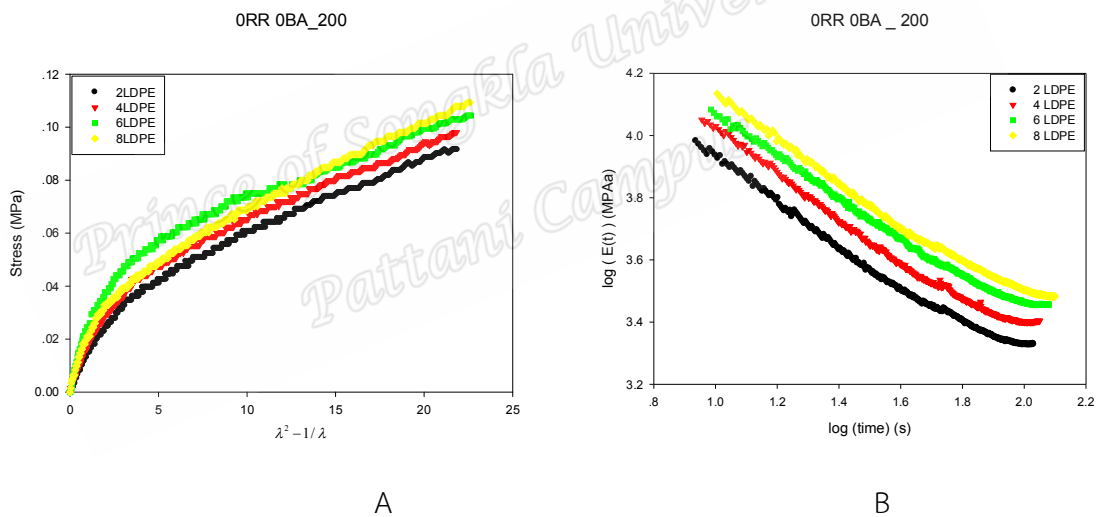
จากการทดสอบการดึงตัวอย่างที่ความเร็วต่างๆ เมื่อเพิ่มเศษแผ่นฟิล์ม LDPE เข้าไป จะได้ว่าค่าของความทนต่อการดึงและร้อยละการยืดของตัวอย่างนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเศษแผ่นฟิล์ม LDPE เนื่องจากโครงสร้างภายในของเศษแผ่นฟิล์ม LDPE เป็นแบบกิ่งก้านสาขา จึงเกิดการยึดเกาะกับอนุภาคของยางได้ดีประกอบกับเมื่อผสมแผ่นฟิล์มเข้าไป โครงสร้างภายในนั้นเกิดปริมาตรอิสระได้น้อยเนื่องจากเกิดการแทนที่ของเศษแผ่นฟิล์ม LDPE จึงทำให้ความแข็งแรงของยางนั้นเพิ่มขึ้น ประกอบกับเศษแผ่นฟิล์ม LDPE ยังมีความยืดหยุ่นสูงจึงเป็นการเพิ่มสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้นไปอีก ดังรูปที่ 4.5-4.9



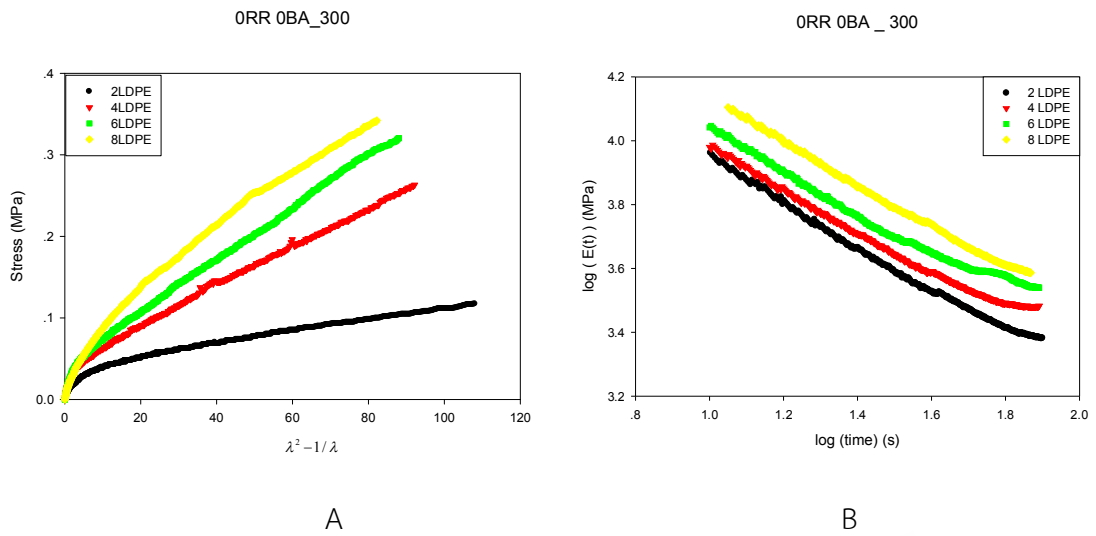
ภาพที่ 4.5 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที



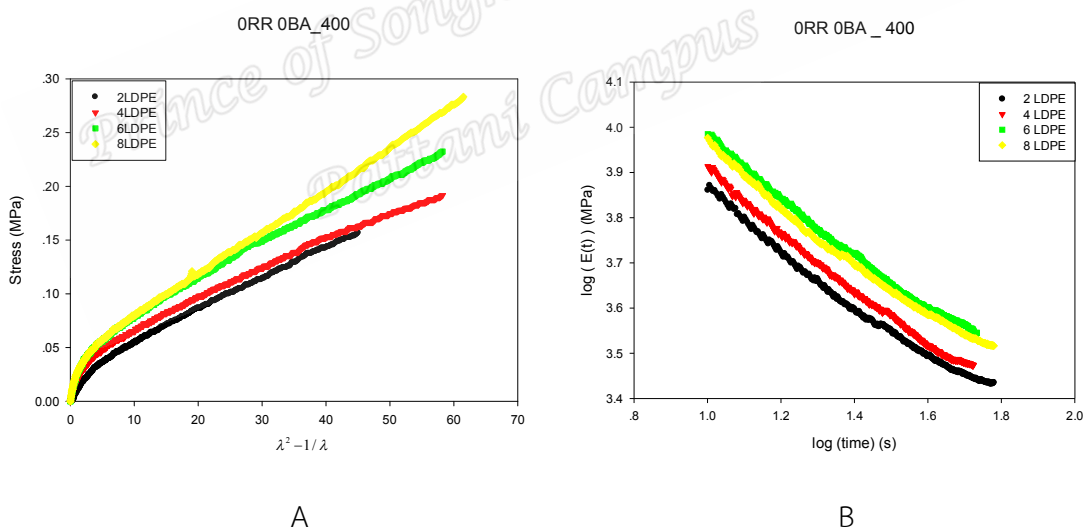
ภาพที่ 4.6 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที



ภาพที่ 4.7 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที



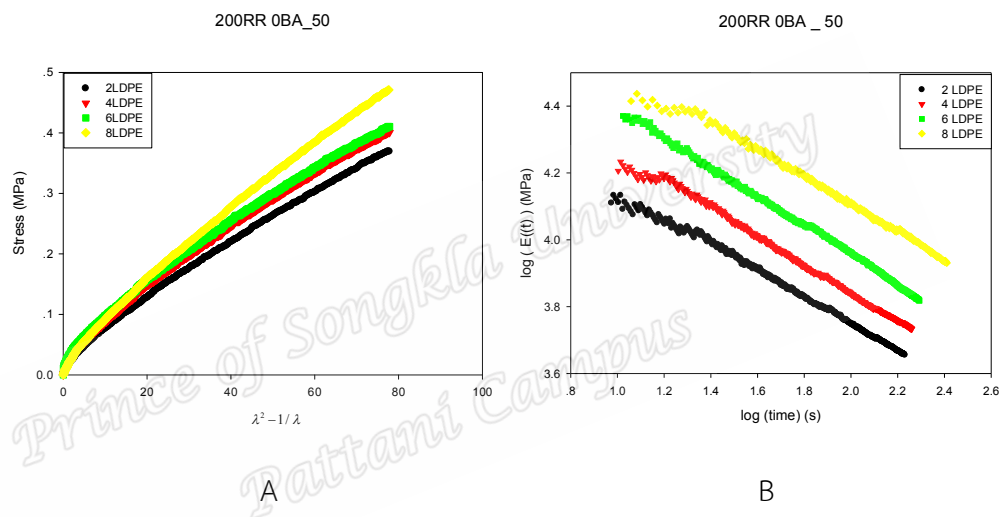
ภาพที่ 4.8 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 300 มม./นาที



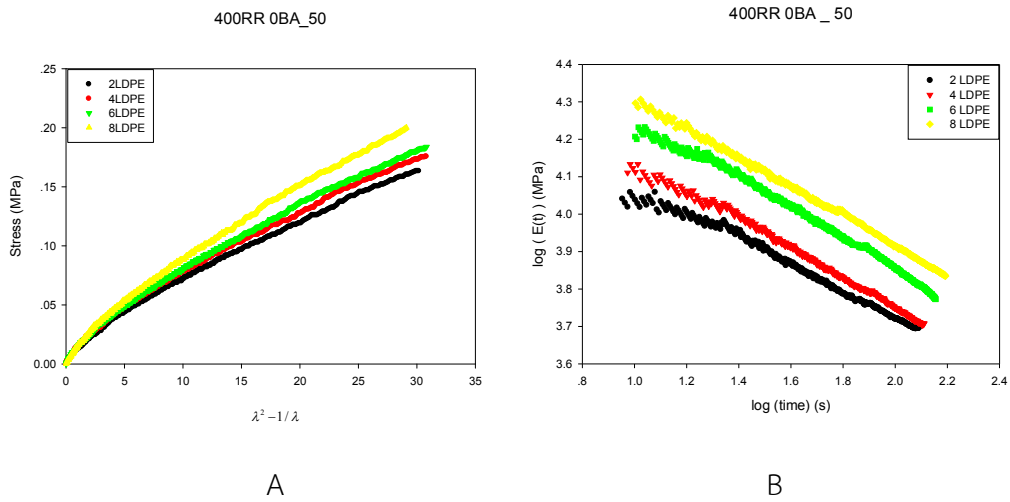
ภาพที่ 4.9 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที

4.2.1.2 ผลของ RR ต่อค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดุลัสที่ความเร็วต่างๆ

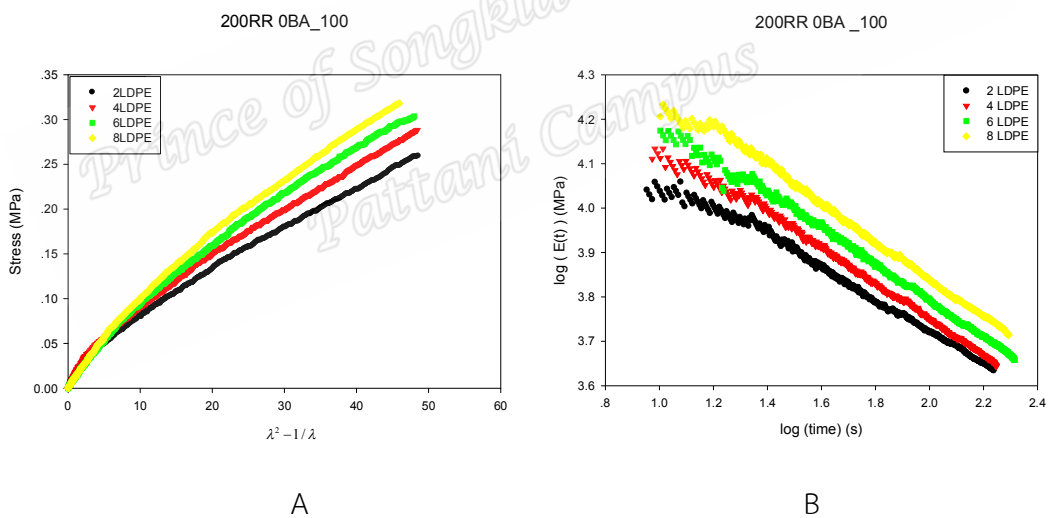
จากผลการทดลองเมื่อเพิ่ม RR ในอัตราส่วน 200 และ 400 phr จะเห็นได้ว่าค่าความทนต่อแรงดึงและร้อยละการยืดของตัวอย่างนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก RR มีส่วนประกอบของ Carbon black ซึ่งเป็นสารที่เพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งโครงสร้างของ RR นั้นมีส่วนประกอบของเขม่าดำหรือซิลิกา ซึ่งเป็นสารที่ทำให้ยางนั้นแข็งแรงอีกเช่นกัน เมื่อนำมาผสมกับ NR จะทำให้สมบัติเชิงกลของแผ่นยางนั้นเพิ่มขึ้นไปอีก โขยงมีการเกาะเกี่ยวและเรียงตัวกันได้ดีขึ้น และเมื่อเพิ่มเศษแผ่นฟิล์ม LDPE ที่มีสมบัติเด่นคือความเหนียวและความยืดหยุ่นยิ่งทำให้แผ่นยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ค่า Stress Strain และค่า Modulus ของยางจึงเพิ่มตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.10-4.19



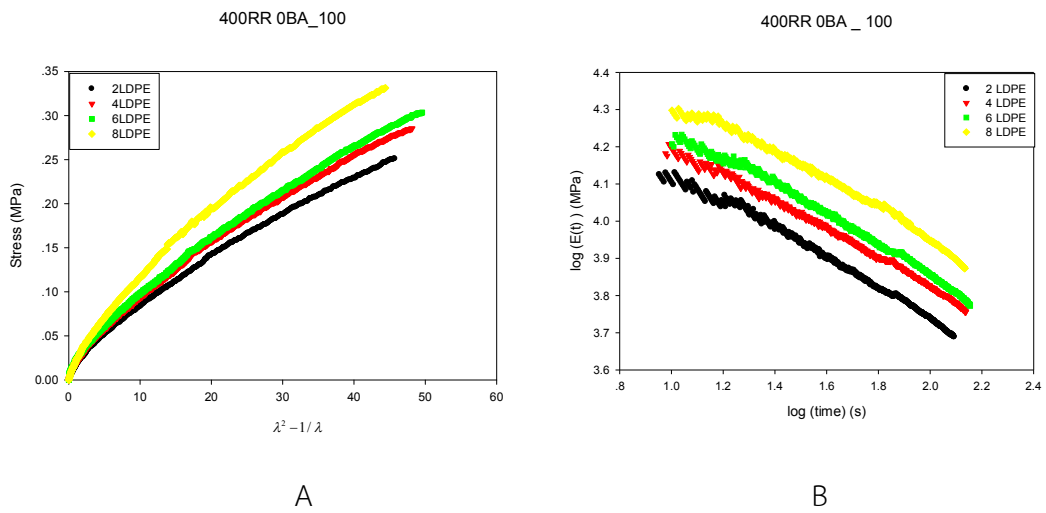
ภาพที่ 4.10 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดุลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที



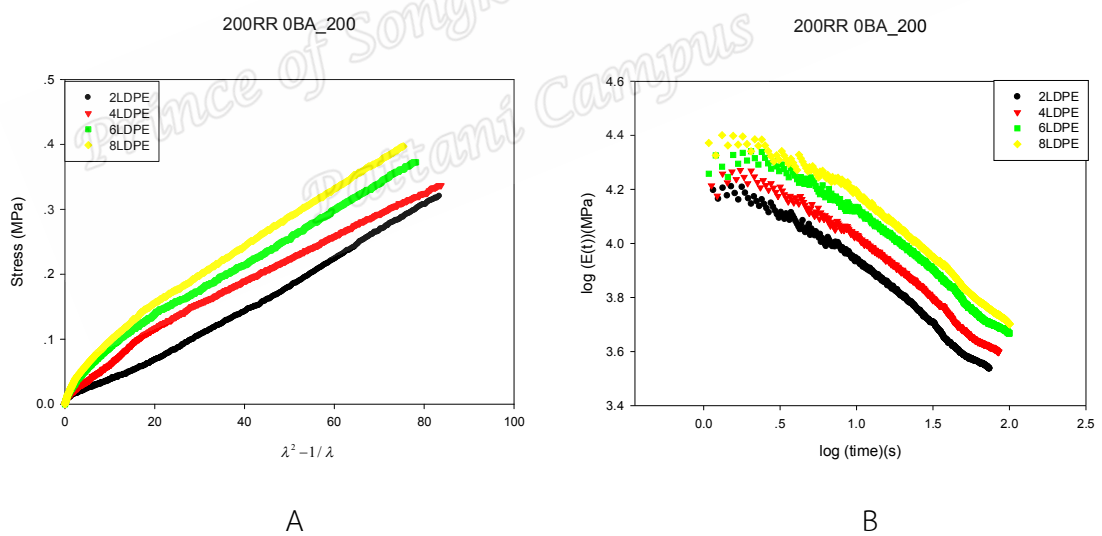
ภาพที่ 4.11 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที



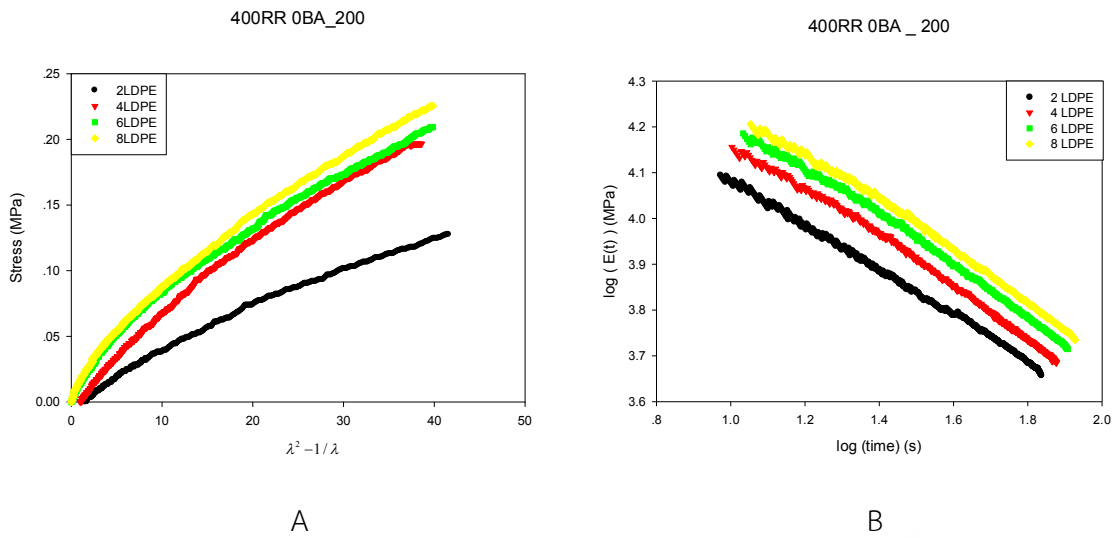
ภาพที่ 4.12 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที



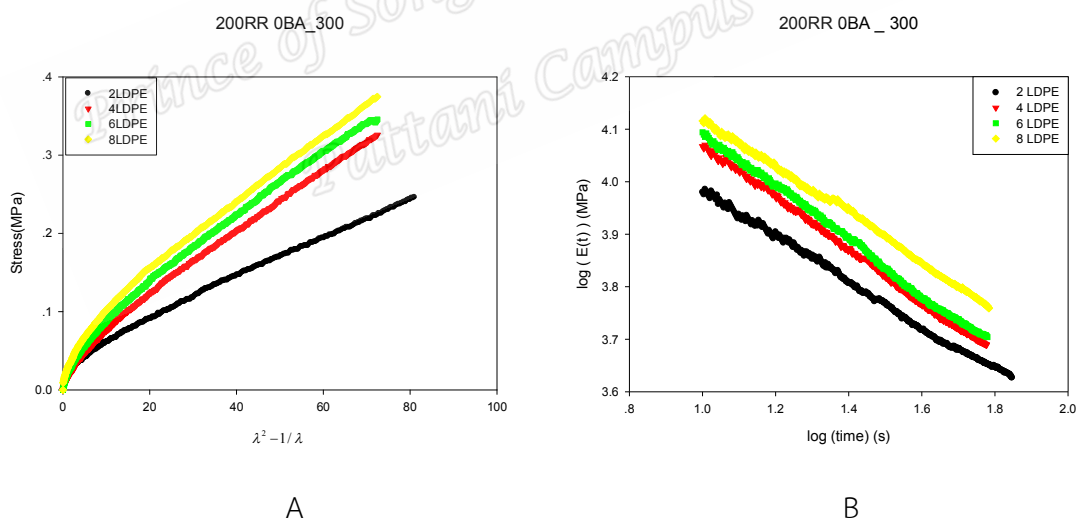
ภาพที่ 4.13 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที



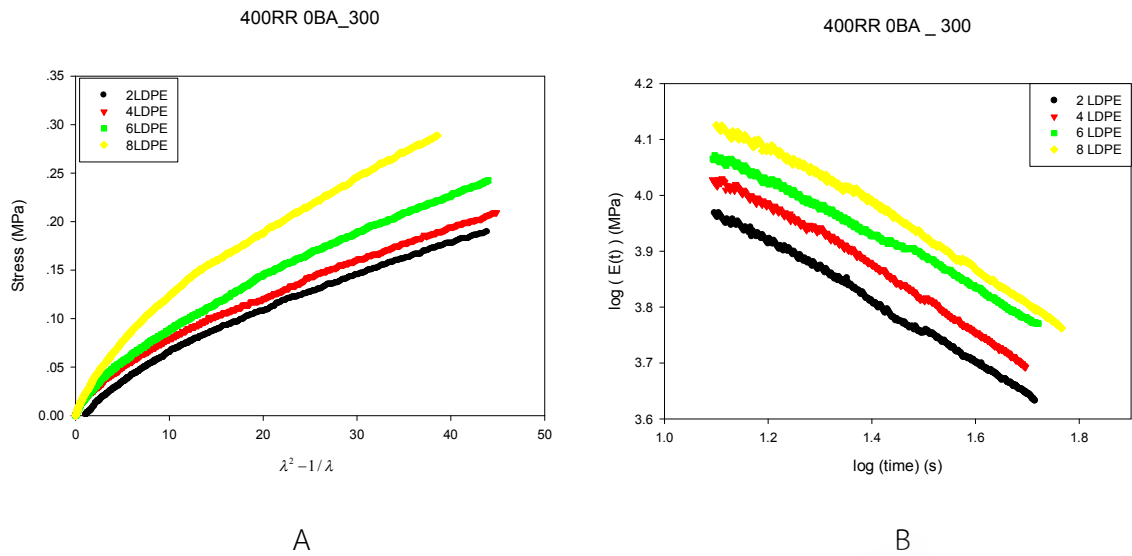
ภาพที่ 4.14 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที



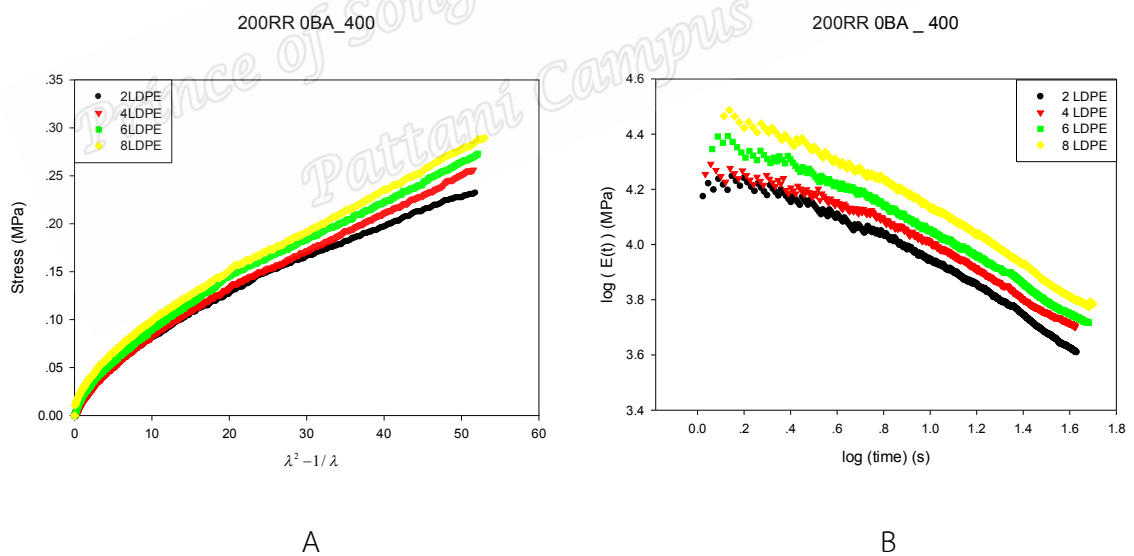
ภาพที่ 4.15 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที



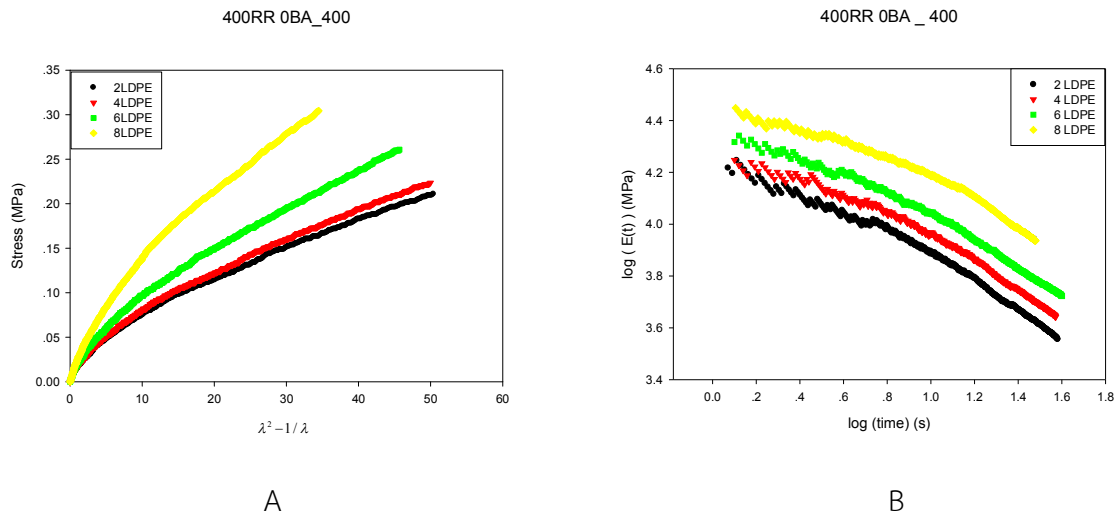
ภาพที่ 4.16 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 300 มม./นาที



ภาพที่ 4.17 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที



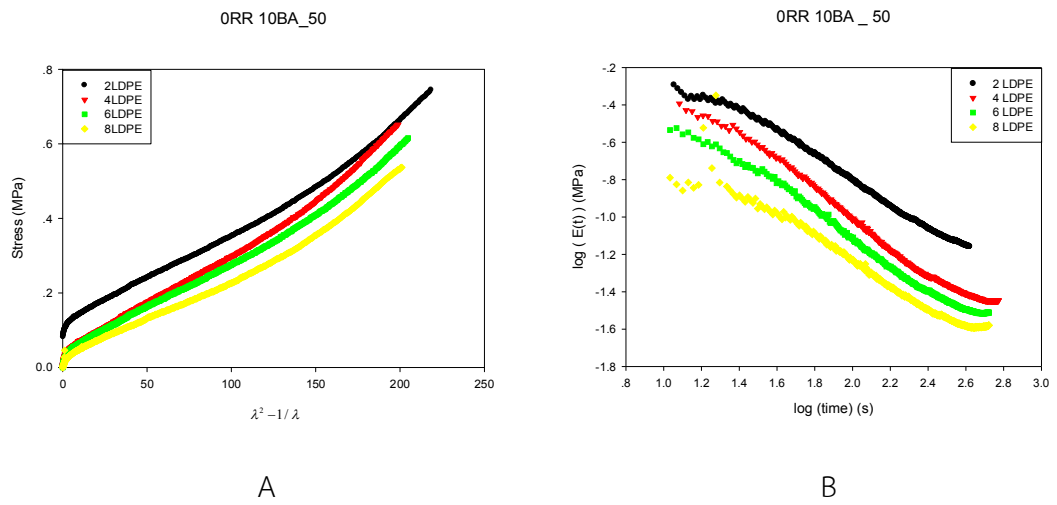
ภาพที่ 4.18 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที



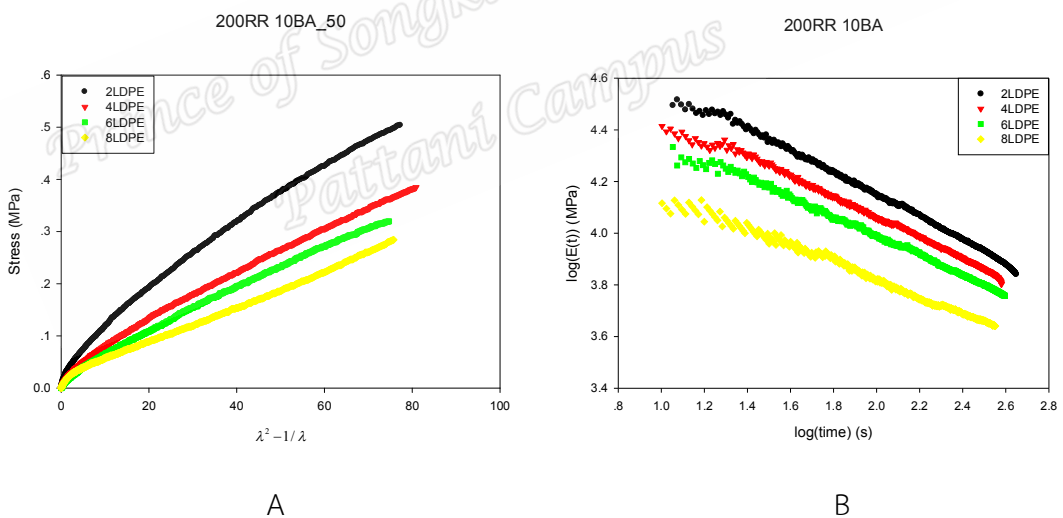
ภาพที่ 4.19 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที

4.2.1.3 ผลของ BA ต่อค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ความเร็วต่างๆ

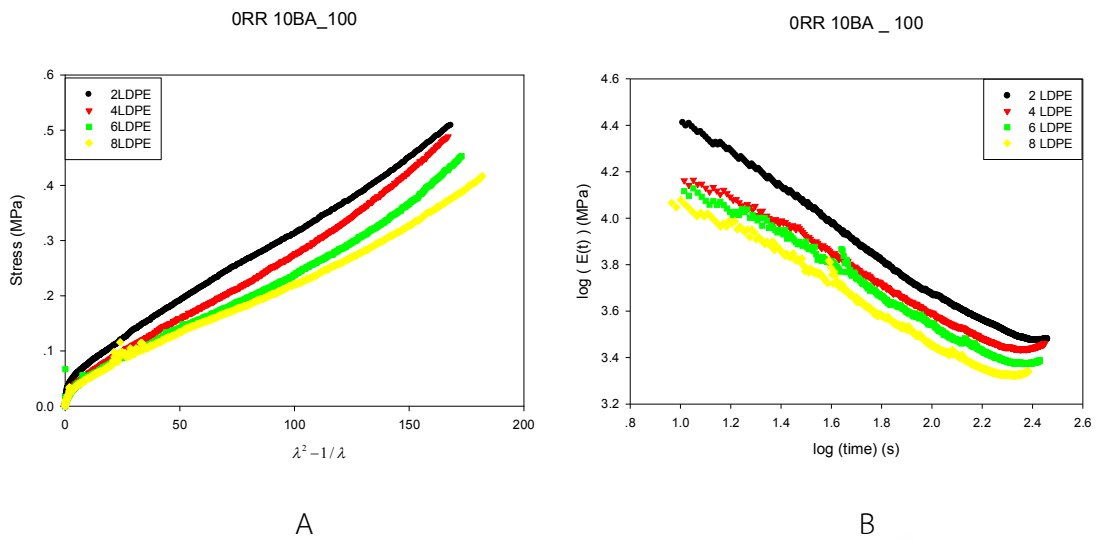
จากผลการทดลองค่าความทนของแรงดึงเมื่อเพิ่ม BA เข้าไปในปริมาณ 10 phr นำไปเขียนกราฟ Stress-Strain และ Modulus จะเห็นว่ากราฟที่ได้นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเศษแผ่นฟิล์ม LDPE และ RR เข้าไป เนื่องจาก BA เป็นสารก่อฟอง โครงสร้างภายในยางจึงมีรูพรุน ฟองอากาศขึ้น ทำให้ความแข็งแรง การเกาะเกี่ยวของโซ่ยางของยางนั้นด้อยลง เนื่องจากผสม BA จึงทำให้โครงสร้างภายในของแผ่นยางนั้นเป็นเซลล์แบบเปิด จึงง่ายต่อการฉีกขาด และได้มีการแทนที่เนื้อยางด้วยฟองอากาศจึงทำให้มีเนื้อยางในแผ่นยางน้อยลง สมบัติเชิงกลของแผ่นยางจึงลดลง ดังรูปที่ 4.20-4.29



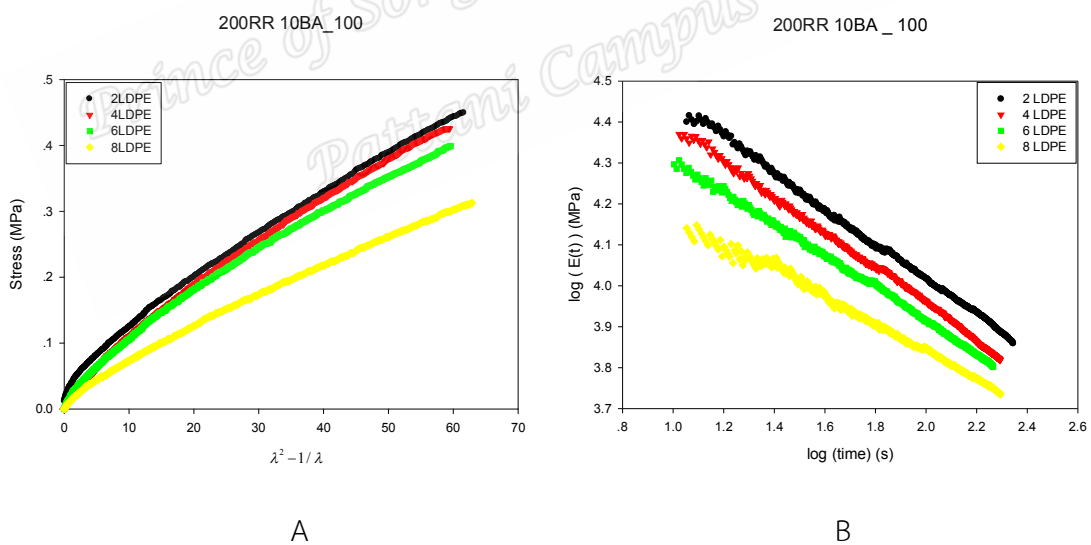
ภาพที่ 4.20 กราฟ A แสดงค่าความหนืดแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที



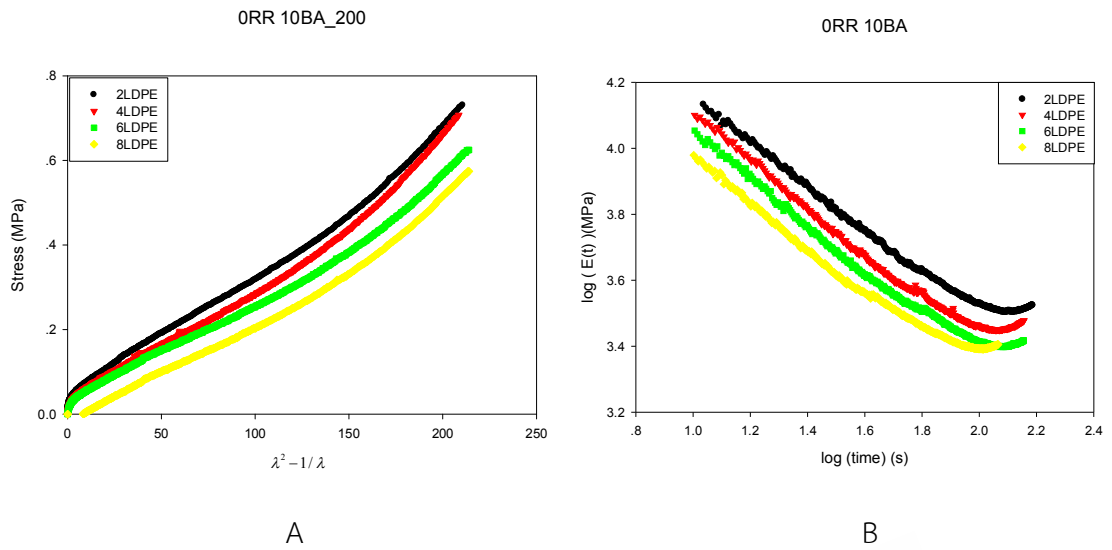
ภาพที่ 4.21 กราฟ A แสดงค่าความหนืดแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 50 มม./นาที



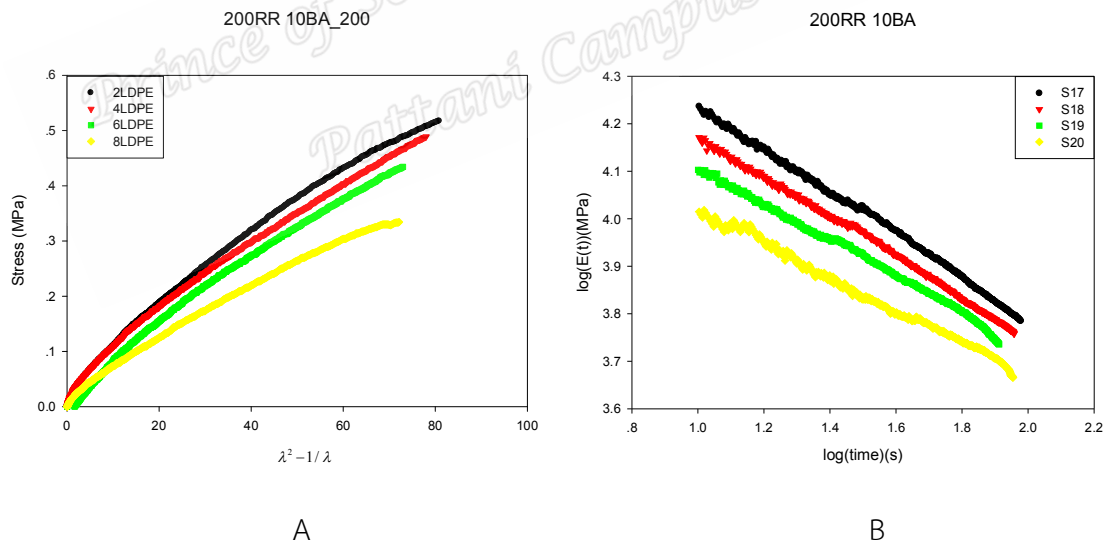
ภาพที่ 4.22 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที



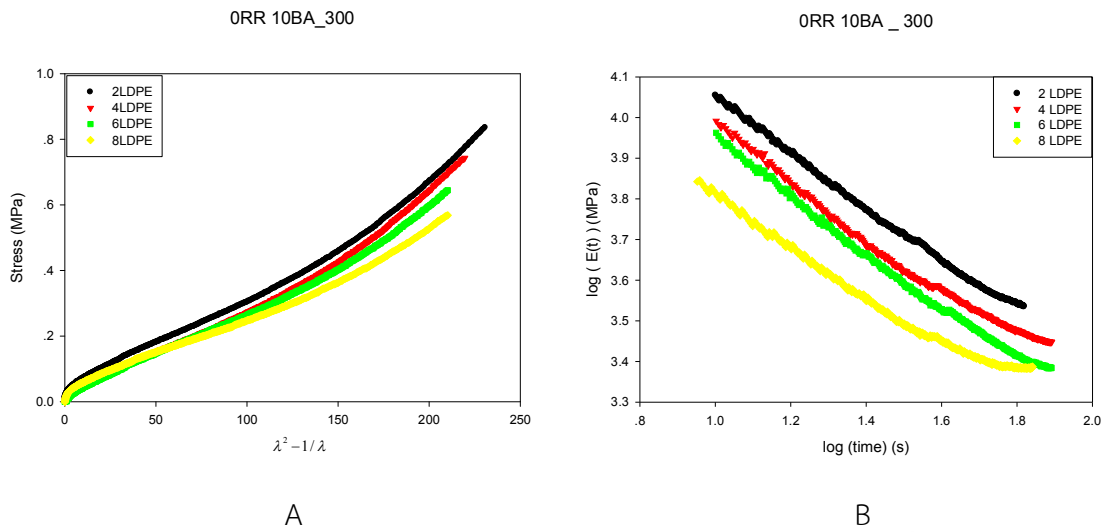
ภาพที่ 4.23 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 100 มม./นาที



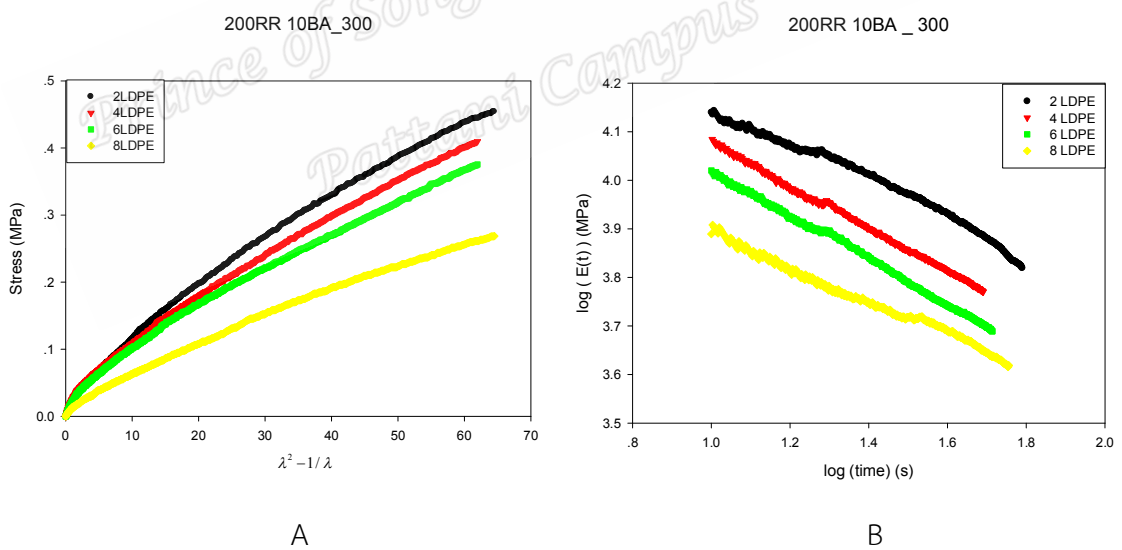
ภาพที่ 4.24 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที



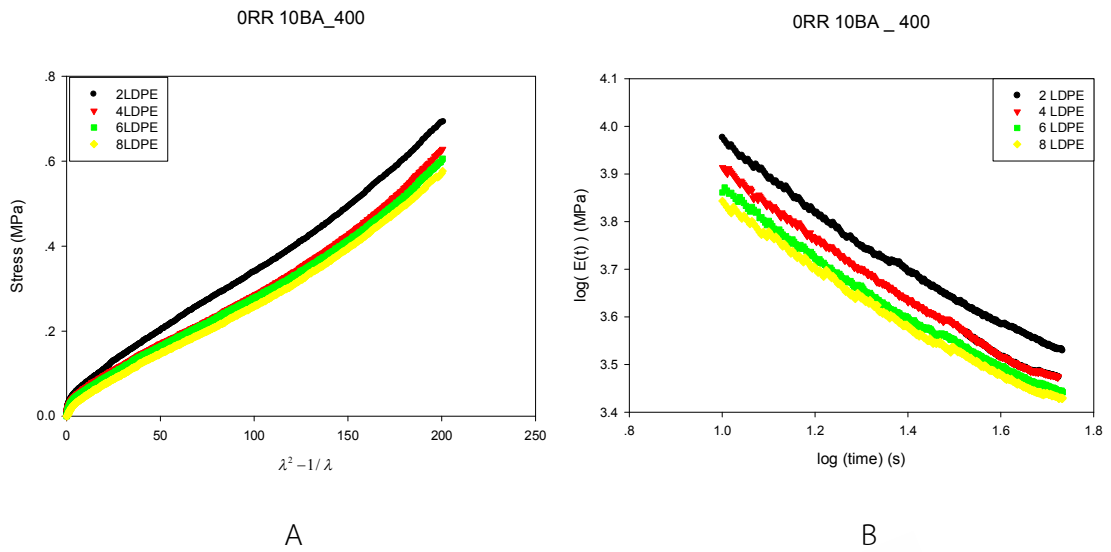
ภาพที่ 4.25 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 200 มม./นาที



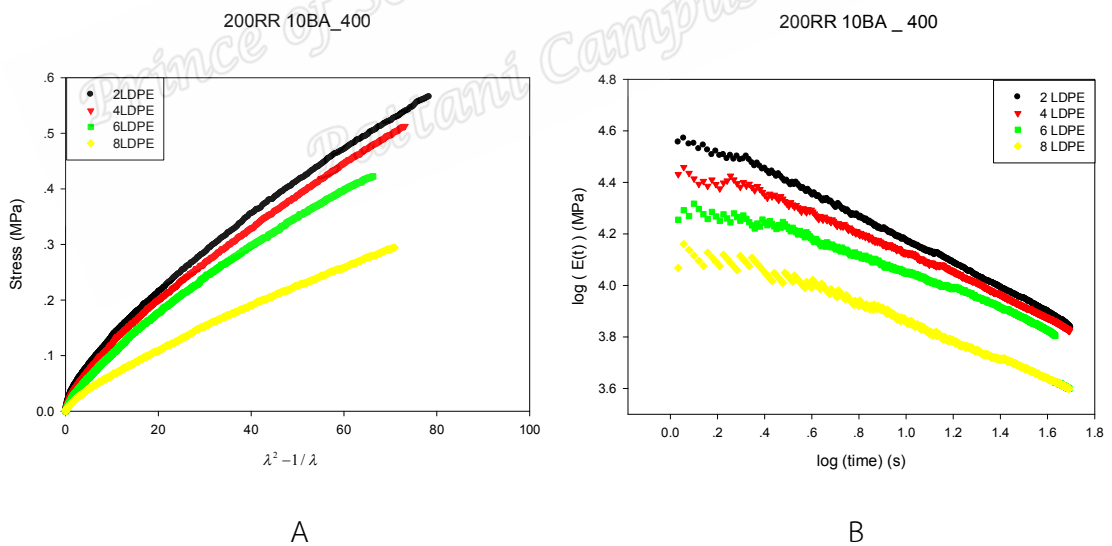
ภาพที่ 4.26 กราฟ A แสดงค่าความหนืดแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 300 มม./นาที



ภาพที่ 4.27 กราฟ A แสดงค่าความหนืดแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 300 มม./นาที



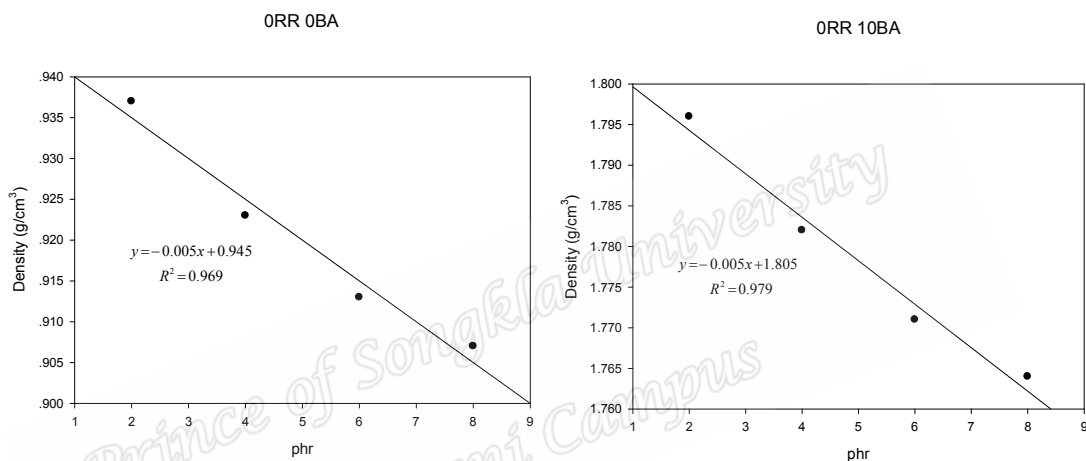
ภาพที่ 4.28 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที



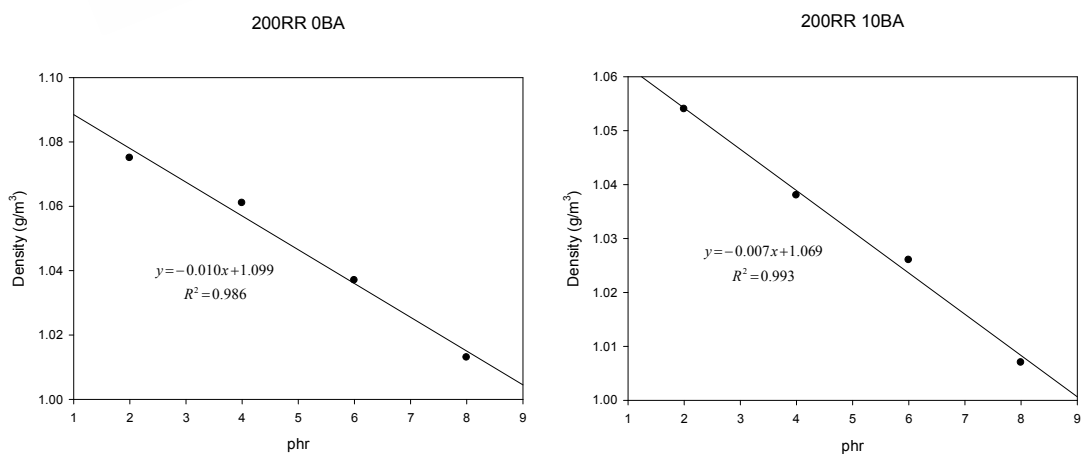
ภาพที่ 4.29 กราฟ A แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและ B แสดงค่ามอดูลัสของ NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่ความเร็ว 400 มม./นาที

4.3 ผลการศึกษาความหนาแน่น

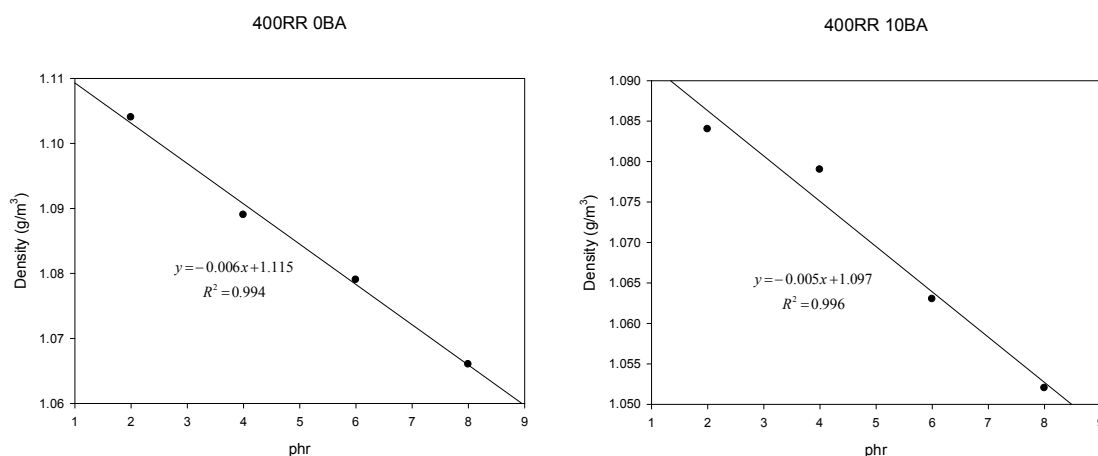
จากการทดลองความหนาแน่นโดยใช้เครื่อง Densimeter พบว่า ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อสารตัวเติมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมนั้นมีสมบัติการเป็นรูพรุนและเกิดการแทนที่กันของยางกับสารตัวเติมจึงทำให้เกิดปริมาตรอิสระมากขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับค่าการนำความร้อนที่วัดได้ของยางแต่ละสูตร ดังรูปที่ 4.30-4.32



ภาพที่ 4.30 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผสม RR 0 phr BA 0 และ 10 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.31 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผสม RR 200 phr BA 0 และ 10 phr ตามลำดับ



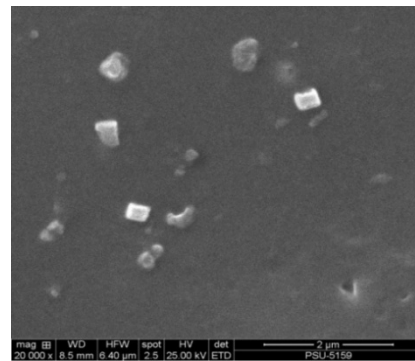
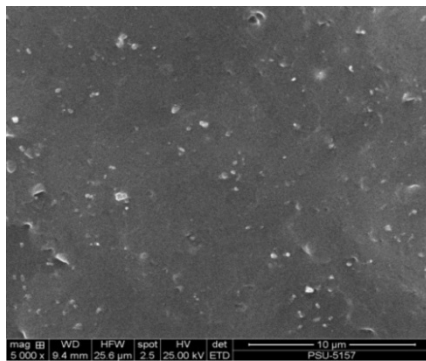
ภาพที่ 4.32 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่ผสม RR 400 phr BA 0 และ 10 phr ตามลำดับ

4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างภายในโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope, SEM

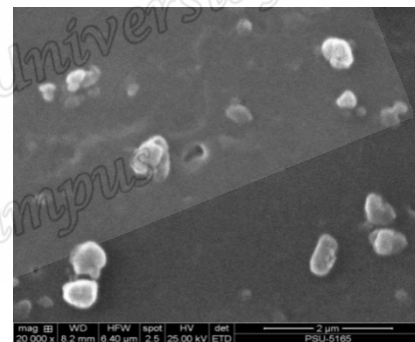
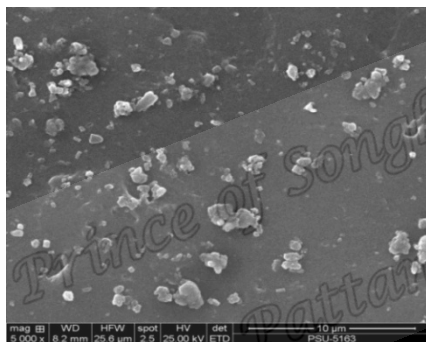
การศึกษาโครงสร้างภายในของตัวอย่างต่างๆนั้น ผู้วิจัยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ประเด็น ประเด็นแรก ศึกษาอิทธิพลของ LDPE โดยจะเลือกตัวอย่างที่ S1, S2, S3 และ S4 ประเด็นที่สอง ศึกษาอิทธิพลของ RR โดยจะเลือกตัวอย่างที่ S1, S5 และ S9 และประเด็นสุดท้าย ศึกษาอิทธิพลของ BA โดยจะเลือกตัวอย่างที่ S1 และ S13 เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

4.4.1 อิทธิพลของ LDPE ต่อโครงสร้างภายในของแผ่นตัวอย่าง

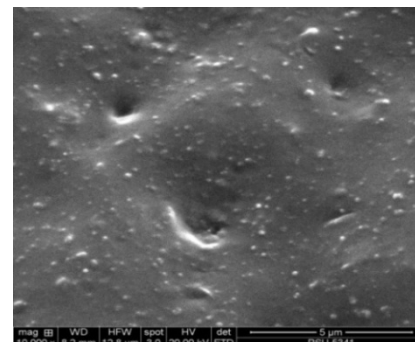
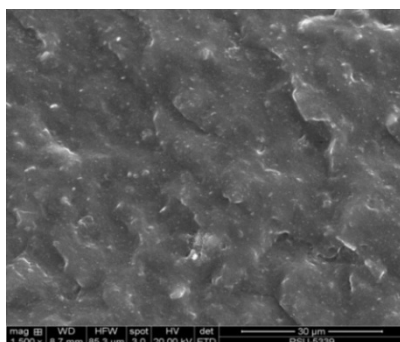
จากผลการศึกษาอิทธิพลของ LDPE จะเห็นว่าตัวอย่าง S1 ยังไม่เห็นถึงความเป็นรูพรุน แต่การกระจายตัวของเศษแผ่นฟิล์ม LDPE มีการกระจายตัวดี เมื่อมีการเพิ่ม LDPE เป็น 6 phr นอกจากการกระจายตัวดีของเศษแผ่นฟิล์ม LDPE แล้ว เศษแผ่นฟิล์ม LDPE ยังมีการคลี่ตัวออกมาเพื่อกันความร้อนได้ดีขึ้นเช่นตัวอย่าง S3 และตัวอย่างที่ S8 เป็นตัวอย่างที่เพิ่ม RR 10 phr, LDPE 8 phr สังเกตได้ว่าจะมีรูพรุนเพิ่มขึ้น จึงทำให้เพิ่มปริมาตรอิสระภายในตัวอย่างสมบัติเชิงกลที่ได้จึงลดลง ดังรูปที่ 4.33-4.35



ภาพที่ 4.33 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S1 กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า ตามลำดับ



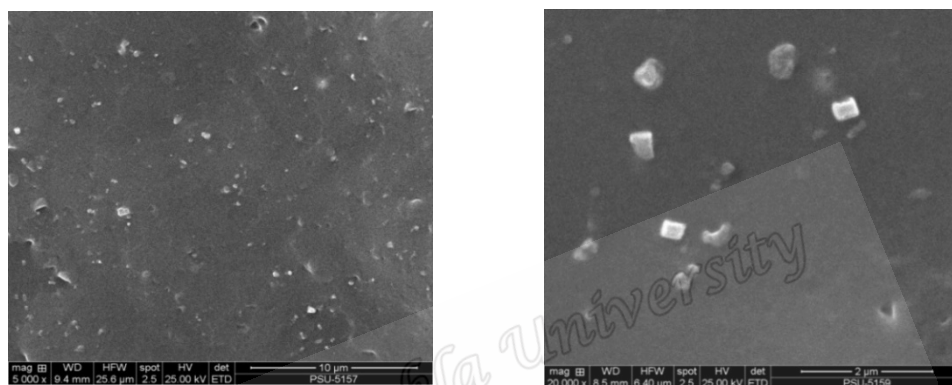
ภาพที่ 4.34 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S3 กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า ตามลำดับ



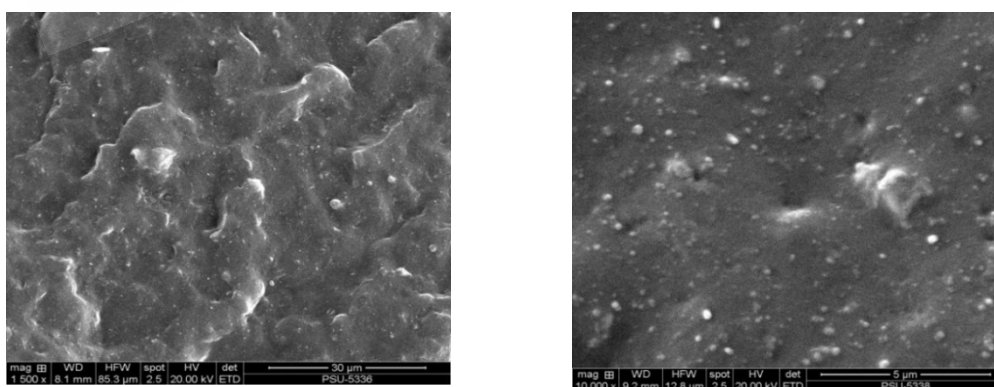
ภาพที่ 4.35 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S8 กำลังขยาย 1,500 และ 10,000 เท่า ตามลำดับ

4.4.2 อิทธิพลของ RR ต่อโครงสร้างภายในของแผ่นตัวอย่าง

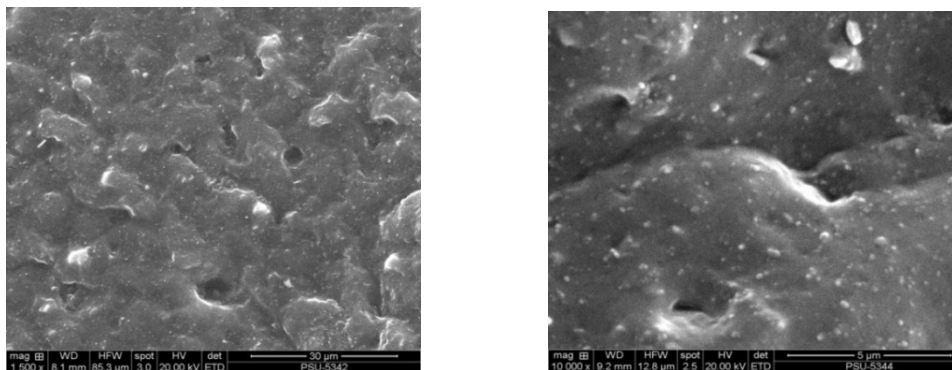
จากการศึกษาอิทธิพลของ RR ตัวอย่างที่นำมาศึกษาคือ S1, S5 และ S9 ตัวอย่าง S1 เป็นตัวอย่างที่ยังไม่มีการเพิ่ม RR ตัวอย่าง S5 และ S9 ได้มีการเพิ่ม RR 200 และ 400 phr ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าอนุภาคของ RR มีการกระจายตัวได้ดีทั้งตัวอย่าง S5 และ S9 และที่ผิวยังมีรูพรุนจุงทำให้สมบัติต่างไปจาก S1 ซึ่งไม่ผสมยาง RR เลย เมื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติจะทำให้เข้ากันได้ดี ปริมาตรอิสระจึงน้อยลง ดังรูปที่ 4.36-4.38



ภาพที่ 4.36 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S1 กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า ตามลำดับ



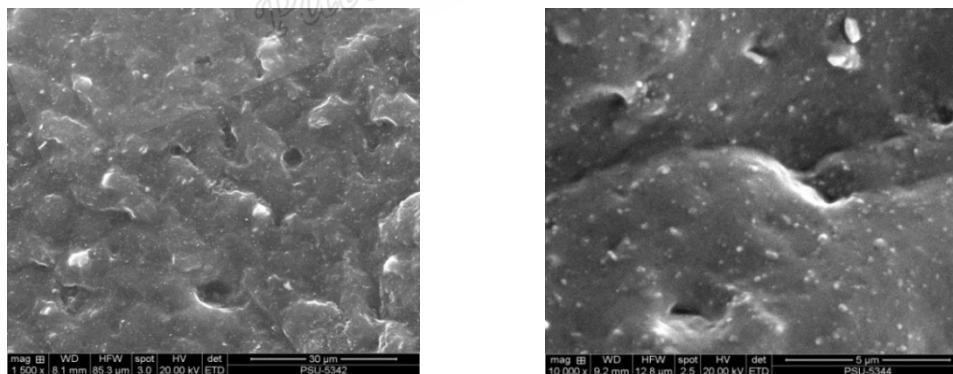
ภาพที่ 4.37 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S5 กำลังขยาย 1,500 และ 10,000 เท่า ตามลำดับ



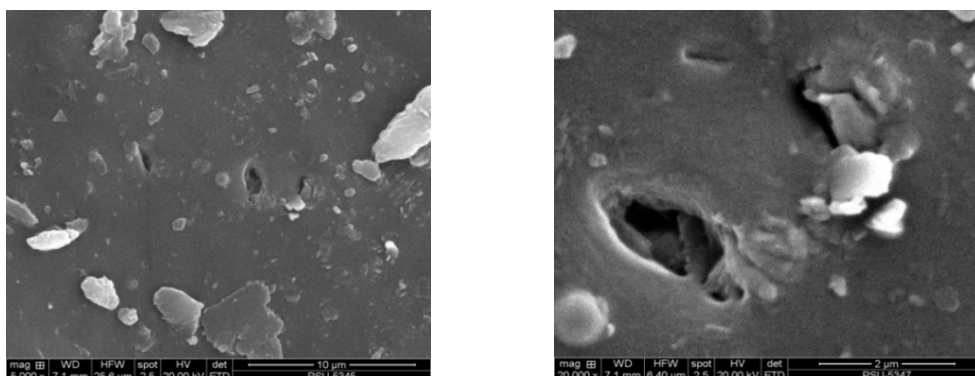
รูปที่ 4.38 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S9 กำลังขยาย 1,500 และ 10,000 เท่า

4.4.3 อิทธิพลของ BA ต่อโครงสร้างภายในของแผ่นตัวอย่าง

จากการศึกษาอิทธิพลของ BA โดยเลือกตัวอย่าง S1 และ S13 มาเปรียบเทียบ โครงสร้างภายใน ตัวอย่าง S1 เป็นตัวอย่างที่ไม่ผสม BA จากรูปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างภายในจะไม่มีรูพรุน ตัวอย่าง S13 ซึ่งได้มีการผสม BA 10 phr LDPE 2 phr จากรูปจะเห็นได้ว่ามีรูพรุนปรากฏอยู่ทั่วพื้นผิว ดังรูปที่ 4.39-4.40



ภาพที่ 4.39 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S9 กำลังขยาย 1,500 และ 10,000 เท่า ตามลำดับ



ภาพที่ 4.40 แสดงภาพจากเครื่อง SEM ของตัวอย่าง S13 กำลังขยาย 5,000 และ 20,000 เท่า ตามลำดับ

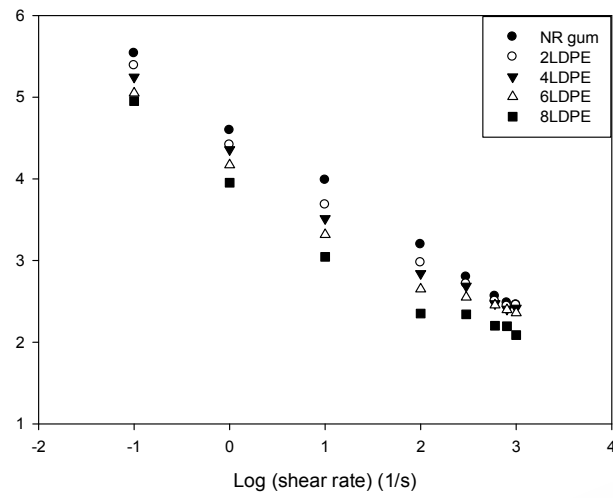
4.5 ผลการศึกษาสมบัติการไหลโดยใช้เครื่อง Capillary Rheometer

การศึกษาสมบัติการไหลจะศึกษาสองประเด็นคือ ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนืดและศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีผลต่อความหนืด โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาคือ 100°C , 115°C และ 130°C สารตัวเติม (LDPE) คือ 2, 4, 6 และ 8 phr และกำหนดอัตราการเฉือนคือ 0.1, 1, 10, 100, 300, 600, 800 และ $1,000\text{ s}^{-1}$

4.5.1 อิทธิพลของปริมาณเศษแผ่นฟิล์ม LDPE ที่มีผลต่อความหนืด

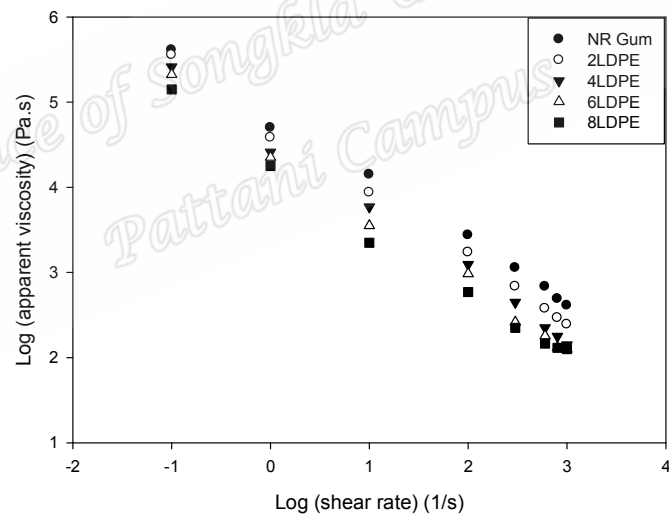
จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มอัตราการเฉือน ความหนืดที่ได้นั้นจะมีค่าลดลง เนื่องจากแผ่นฟิล์ม LDPE เป็นพลาสติกจึงเป็นการยากที่จะเกาะเกี่ยวกับผนังของไดน์ จึงเกิดการสั่นไถลได้ง่ายจึงทำให้กราฟความหนืดลดลงไปเมื่อเพิ่มปริมาณผสมของแผ่นฟิล์ม LDPE ดังรูปที่ 4.41 A, B และ C

Temp. 100°C

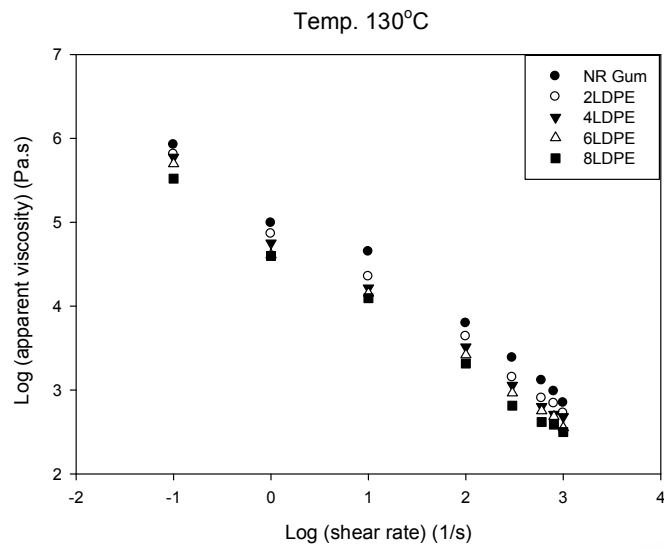


A

Temp. 115°C



B



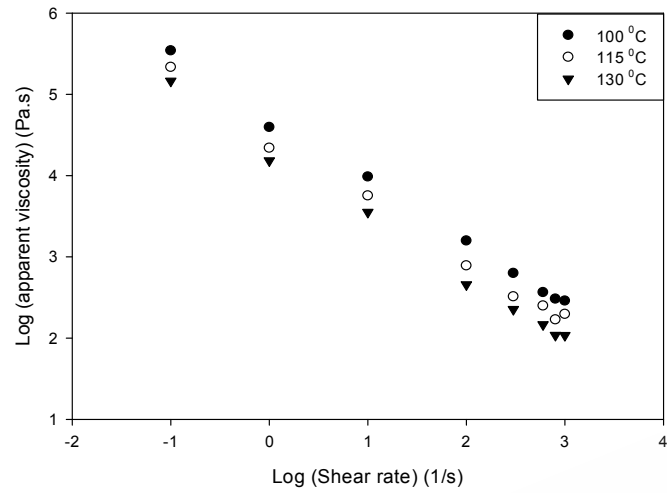
C

ภาพที่ 4.41 A, B และ C แสดงกราฟระหว่างอัตราเฉือนกับความหนืดของยางธรรมชาติและตัวอย่างที่ผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ที่อุณหภูมิ 100°C, 115°C และ 130°C ตามลำดับ

4.5.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนืด

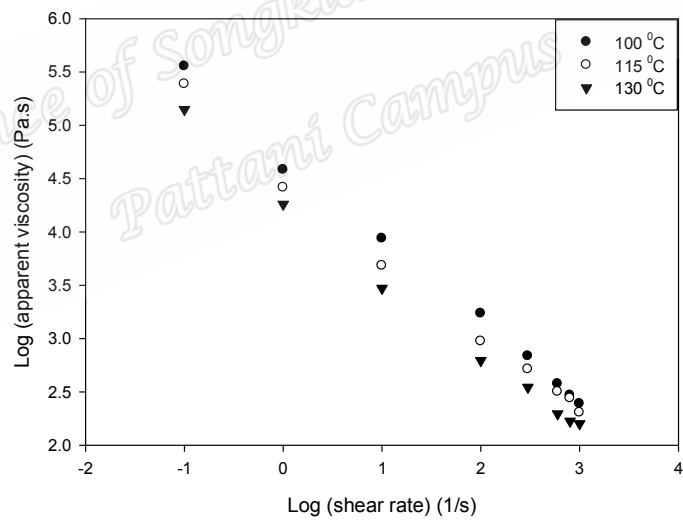
จากการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีผลต่อความหนืด พบว่า เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและอัตราเฉือนในแต่ละตัวอย่างความหนืดที่ได้นั้นมีค่าลดลงเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมินั้นส่งผลให้ปริมาตรอิสระระหว่างโซ่ยางมีมากขึ้น ทำให้โซ่ยางยับตัวและไหลได้ง่าย จึงทำให้ความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.42 A, B, C, D และ E

NR gum



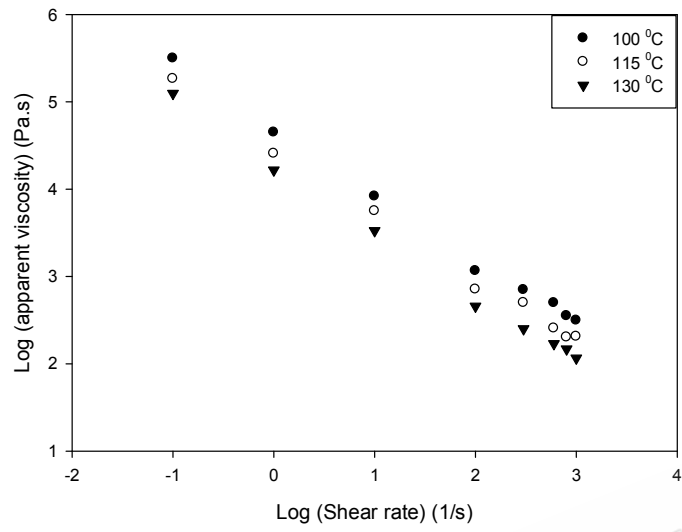
A

2LDPE



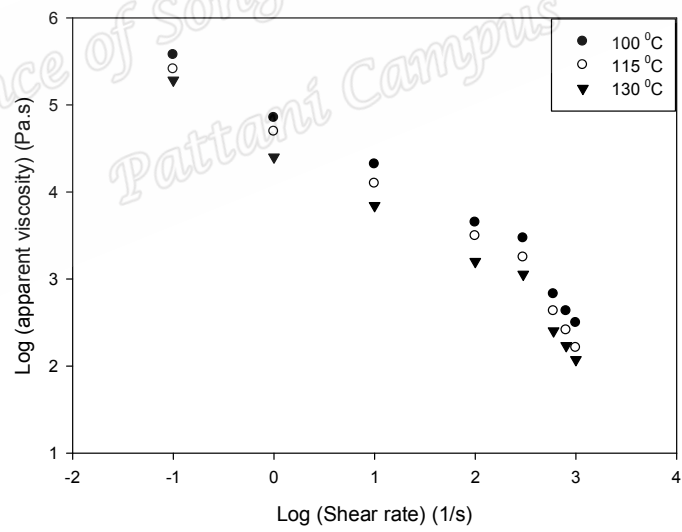
B

4LDPE

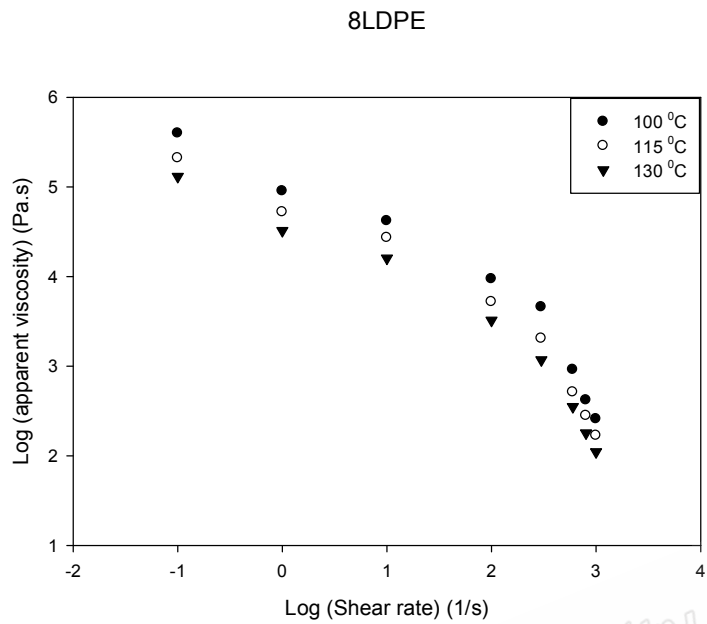


C

6LDPE



D



E

ภาพที่ 4.42 A, B, C, D และ E แสดงกราฟระหว่างอัตราเฉือนและความหนืด ที่อุณหภูมิ 100°C, 115°C และ 130°C ของยางธรรมชาติและตัวอย่างที่ผสม LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

ในปัจจุบันการแก้ปัญหาสภาวะโลกร้อนเป็นที่สนใจในหลายๆ ประเทศ ต่างคิดค้นแนวทางสร้างวัสดุต่างๆ เพื่อช่วยลดความร้อนที่มาจากภายนอก เช่น การคิดค้นคอนกรีตที่เป็นฉนวนความร้อน เพื่อลดความร้อนที่เข้ามาภายในอาคารลง ทั้งนี้ยังช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าเนื่องมาจากการใช้เครื่องปรับอากาศอีกด้วย ในปัจจุบันยางพาราเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในด้านการทนต่อแรงกด แรงดึง ยางพารายังเป็นฉนวนกันความร้อน ดูดซับเสียง และอื่นๆ อีกมากมาย

ในการทดลองผู้ทดลองได้ทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นตัวอย่างที่นำยางพารามาผสมกับยางรีไซเคิล เศษแผ่นฟิล์มและสารก่อฟอง เช่น สมบัติเชิงความร้อน สมบัติเชิงกล ความหนาแน่น สมบัติการไหล เพื่อยืนยันว่าแผ่นตัวอย่างที่ได้คิดค้นขึ้นนั้นจะสามารถนำไปใช้ในสถานการณ์จริงได้หรือไม่ จากการทดลองดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อน (ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน; k)

จากการทดลองสมบัติเชิงความร้อนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ทดลองผ่านเครื่องทดสอบการนำความร้อนที่เป็นตู้ 2 ตู้ ให้ความร้อนในตู้ที่ 1 วัดค่าส่งผ่านความร้อนแล้วนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน จะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มสารตัวเติม คือ เศษแผ่นฟิล์ม ยางรีไซเคิลและสารก่อฟอง เนื่องจากภายในของขึ้นทดสอบมีฟองอากาศเกิดขึ้น ความร้อนที่ผ่านเข้าไปทำให้ฟองอากาศเกิดการเคลื่อนที่ทำให้ความร้อนดังกล่าวเกิดการสลายตัวไป ยิ่งเมื่อเพิ่มสารก่อฟองจะยิ่งทำให้ฟองอากาศมากขึ้น ปริมาตรอิสระมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจึงลดลงตามไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์ที่น้อยที่สุดได้แก่ตัวอย่างที่มีการผสม NR 100 phr RR 400 phr BA 10 phr และ LDPE 8 phr คือ 4.1885×10^{-4} W/m.K

5.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการทดลองสมบัติเชิงกลโดยนำชิ้นทดสอบตัดเป็นรูปดัมเบล ไปดึงที่ความเร็วต่างๆ สามารถคำนวณหาค่าความเค้น ร้อยละการยืด และค่ามอดูลัสของยางโดยนำสมการโกซิมมาอธิบาย เนื่องจากการดึงที่ความเร็วมากๆ สมการทั่วไปไม่สามารถอธิบายความหมายได้ จากการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ค่าความเค้น ค่าร้อยละการยืดและค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเศษแผ่นฟิล์ม แต่จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มยางรีเคลมและสารก่อฟอง เนื่องจากเมื่อเพิ่มยางรีเคลมและสารก่อฟอง จะทำให้ภายในของชิ้นทดสอบมีฟองอากาศเพิ่มขึ้น ปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น จึงทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นทดสอบด้อยลง

5.3 ผลการศึกษาความหนาแน่น

จากการทดลองหาค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบโดยการแทนที่ของน้ำ พบว่า ความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเศษแผ่นฟิล์ม ยางรีเคลมและสารก่อฟอง เนื่องจากน้ำไม่สามารถซึมเข้าไปภายในของชิ้นทดสอบได้ จึงทำให้ความหนาแน่นมีค่าลดลง

5.4 ผลการศึกษาโครงสร้างภายในโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope, SEM

จากการทดลองการศึกษาโครงสร้างภายในของชิ้นทดสอบ เมื่อได้ผสมกับสารตัวเติม เช่น เศษแผ่นฟิล์มและสารก่อฟอง เพื่อยืนยันว่าภายในของชิ้นทดสอบได้เกิดฟองอากาศขึ้นจริง จากการทดลองดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า ภายในของชิ้นทดสอบมีฟองอากาศมากขึ้น เมื่อปริมาณของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น จึงเป็นข้อยืนยันว่าการเป็นฟองอากาศเหล่านั้น ทำให้สมบัติเชิงความร้อนดีขึ้น กล่าวคือ การเป็นฉนวนกันความร้อนขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น ต่างจากสมบัติเชิงกลของชิ้น

ทดสอบที่มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสารก่อฟอง เนื่องจากฟองอากาศเข้าไปแทนที่เนื้อที่ในแผ่นตัวอย่าง เนื้ออย่างลดลง สมบัติเชิงกลจึงลดลงตาม

5.5 ผลการศึกษาสมบัติการไหลโดยใช้เครื่อง Capillary Rheometer

จากการศึกษาสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary Rheometer โดยวัดค่าความหนืดของตัวอย่างเมื่อมีการเพิ่มสารตัวเติมคือ เศษแผ่นฟิล์มที่ปริมาณ 2, 4, 6 และ 8 phr และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ 100°C 115°C และ 130°C จากการทดสอบจะได้ว่า ค่าความหนืดมีค่าลดลงเมื่อสารตัวเติมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมเข้าไปแทนที่เนื้ออย่าง ปริมาตรอิสระภายในลดลง เช่นเดียวกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของตัวอย่างมีค่าลดลงเช่นกัน เนื่องจากโซ่ยาวมีการขยายตัวขึ้น ปริมาตรอิสระที่มีอยู่ในเนื้ออย่างลดลงจึงทำให้การไหลง่ายขึ้น

5.6 ข้อเสนอแนะ

1. เลือกใช้สารตัวเติมที่หลากหลายมากกว่านี้
2. การทดสอบสมบัติการไหล ควรเลือกใช้อุณหภูมิที่มากกว่านี้เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของทางด้านอื่นๆ

บรรณานุกรม

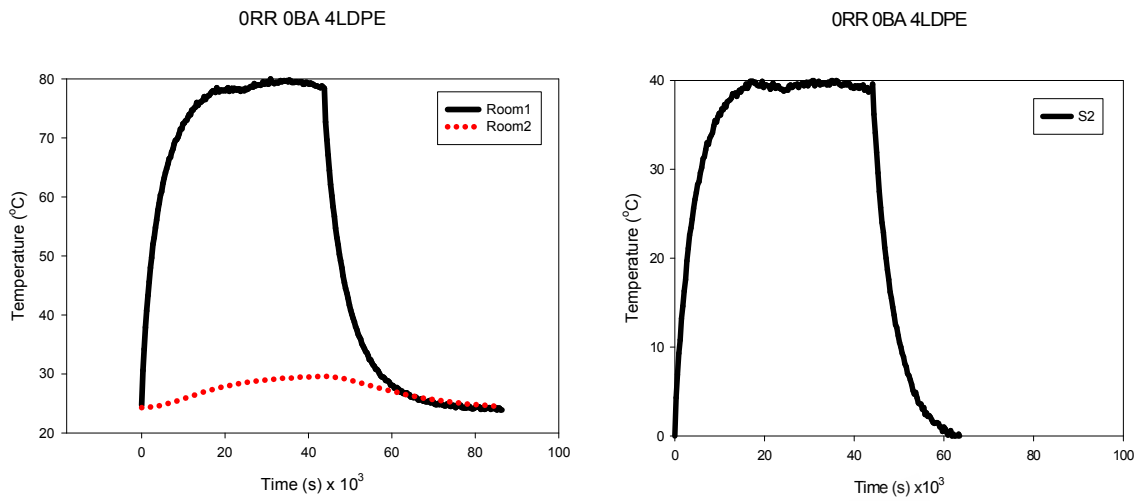
- นพดล ผลไชย. 2551. ผลของไทม์แลกและดีกรีเมนต์เฟคเตอร์ต่อสมบัติเชิงความร้อนของผนังยาง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. หน้า 11
- บุญธรรม นิธิอุทัย และปรีชา ป้องภัย. 2534. **คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง I.** คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2527. **สารเคมีสำหรับยาง.** คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- สมบัติ พุทธจักร. 2547. สมบัติเชิงฟิสิกส์ เจริโอโพลีและวิศวกรรมของยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- สมบัติ พุทธจักร. 2549. คู่มือปฏิบัติการ Properties of Matter and Rheology .คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. หน้า 27-63
- สมบัติ พุทธจักร. 2551. โครงสร้างและสมบัติเชิงฟิสิกส์ของพอลิเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. หน้า 203-225
- สมบัติ พุทธจักร ธรณิศ นาวารัตน์ และนิวัฒน์ เอียดชะตา. 2552. สมบัติการกดของยางธรรมชาติ ผสมกับยางมะตอย. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา. 2(1), 17-33
- สายัณห์ สุขพงษ์พันธ์ และวิรัตน์ ปฐมชัยอัมพร. 2549. ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล. สารานุกรม ๕ เดือนกันยายน 2549 โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม
- Abdel, M.M., Kader, Abdel Wehab, S.M., Helal, M.A., and Hasan, H.H. 2011. Evaluation of thermal insulation and mechanical properties of waste rubber/natural rubber composites. HBRC Journal. 8(2012), 69-74

บรรณานุกรม (ต่อ)

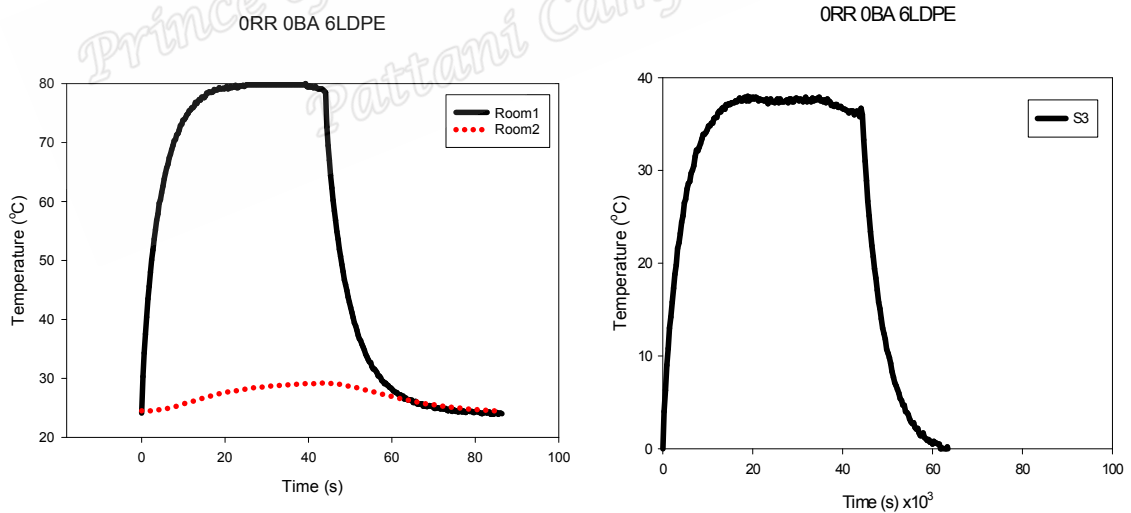
- Benkreira, H., Khan, A., and Horoshenkov, K.V. 2011. Sustainable acoustic and thermal insulation material from elastomeric waste residues. *Chemical Engineering Science*. 66(2011), 4157-4171
- Bulent Yesilata, Yusuf Isiker, and Paki Turgut. 2009. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials*. 23(2009), 1878-1882
- Majid Hameed Nada. 2015. Scanning Electron Microscope. *BAOJ Microbio*. 1:005
- Paki Turgut, Bulent Yesilata. 2007. Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber –added bricks. *Energy and Building*. 40(2008), 679-688
- Piti Sukontasukkul. 2008. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-caste concrete panel. *Construction and Building Material*. 23(2009), 1084-1092
- Zdenek Hrdlicka, Antonin Kuta, and Jiri Hajek. 2010. Thermoplastic elastomer blends based on waste rubber and low-density polyethylene. *Polymer*. 55(2010), 11-12

ภาคผนวก ก

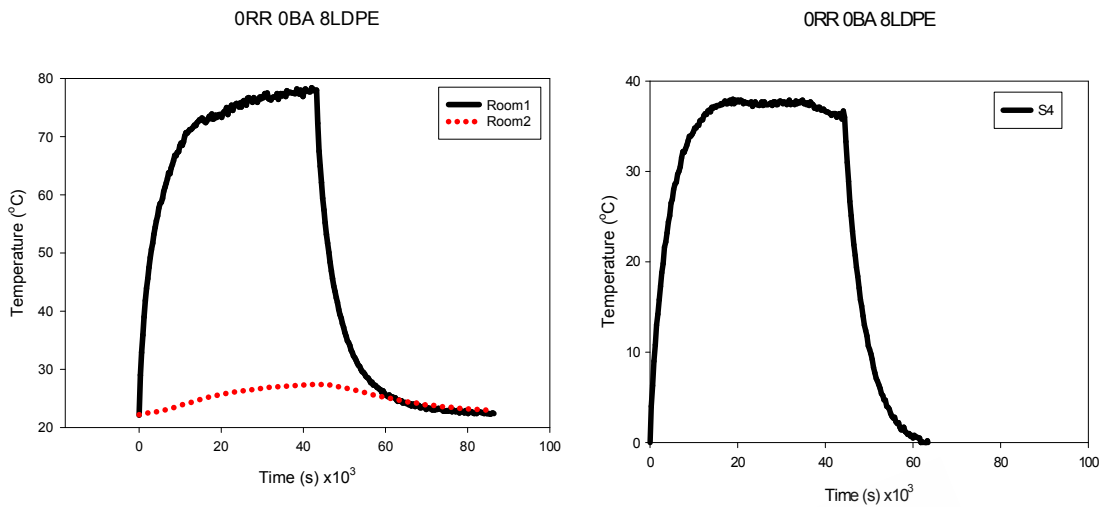
- กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมผัสตัวอย่างกับเวลาของสูตร
ต่าง ๆ



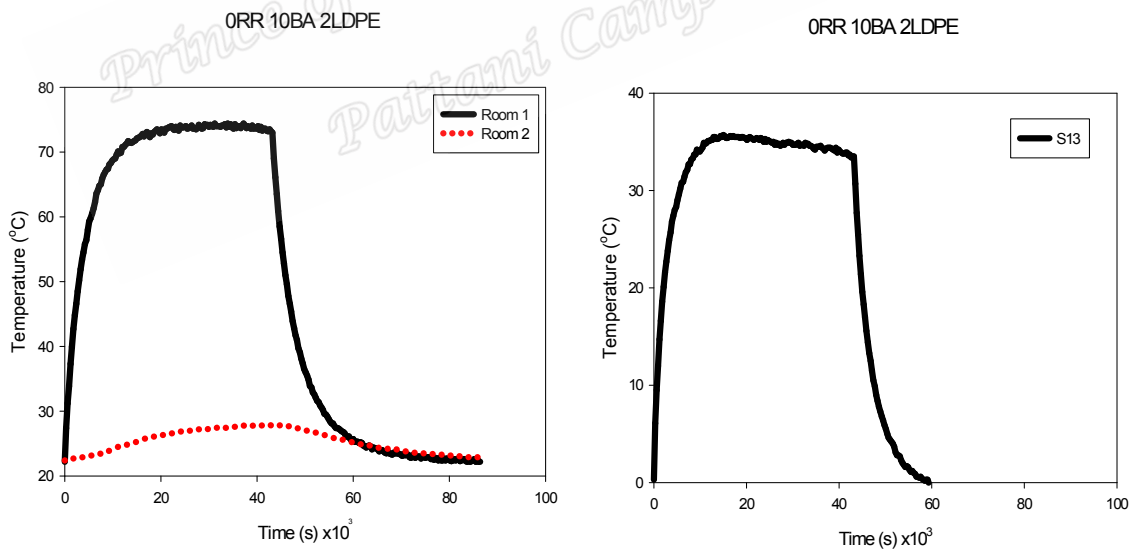
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 4 phr



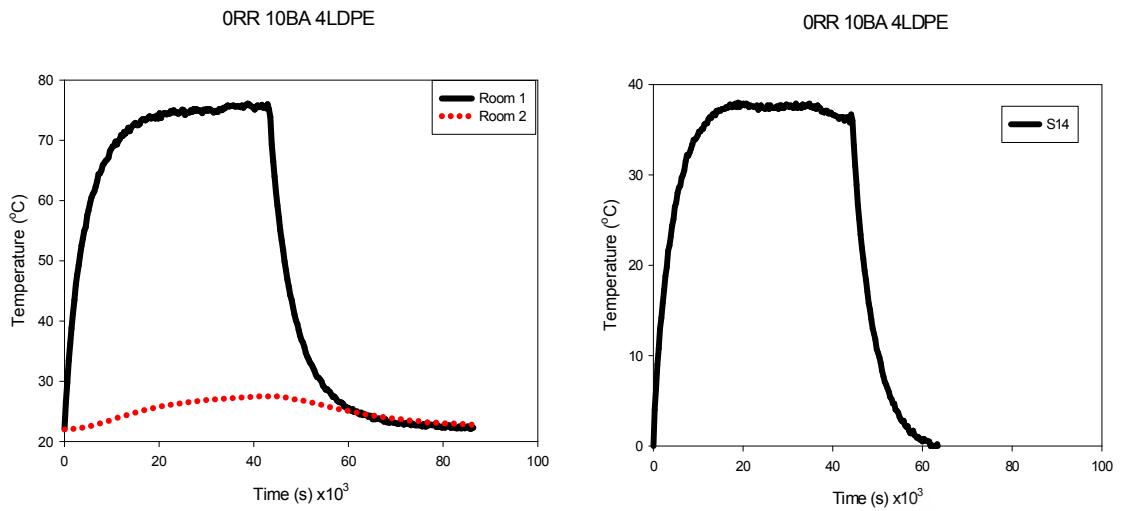
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 6 phr



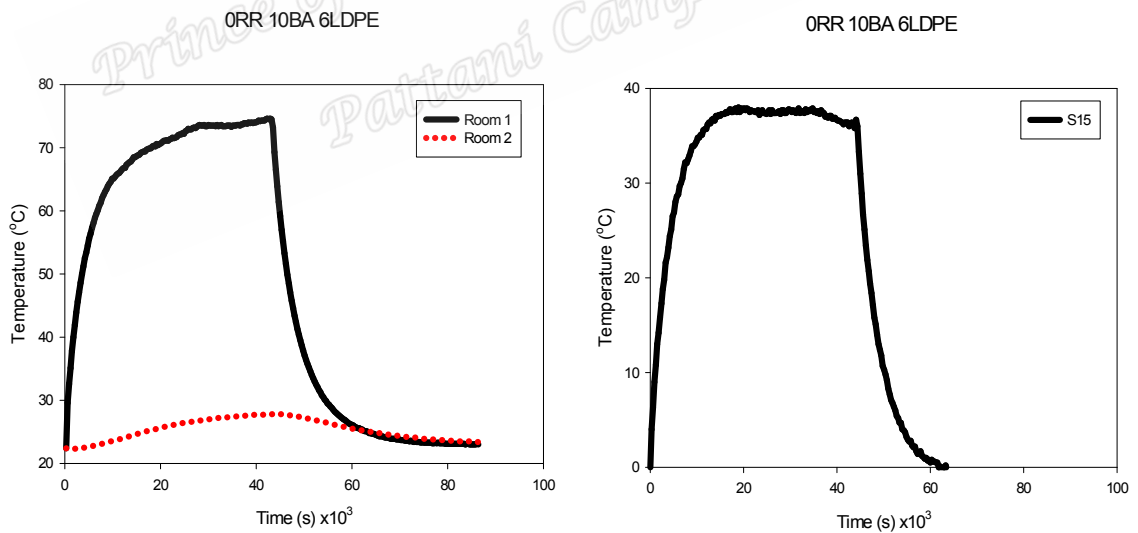
กราฟอุณหภูมิที่ 1 และที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพันธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 8 phr



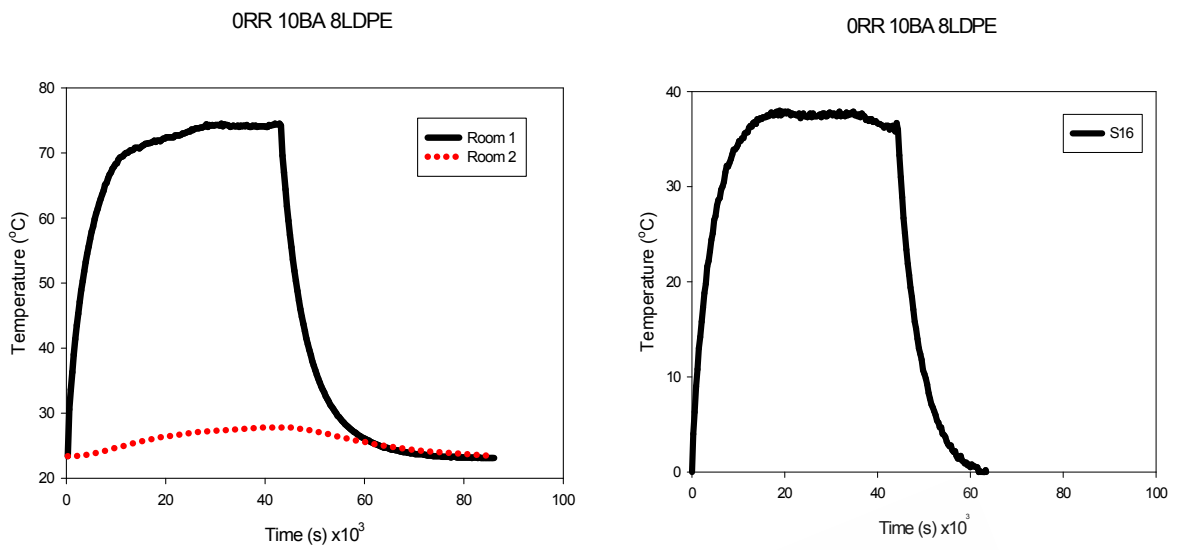
กราฟอุณหภูมิที่ 1 และที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพันธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 2 phr



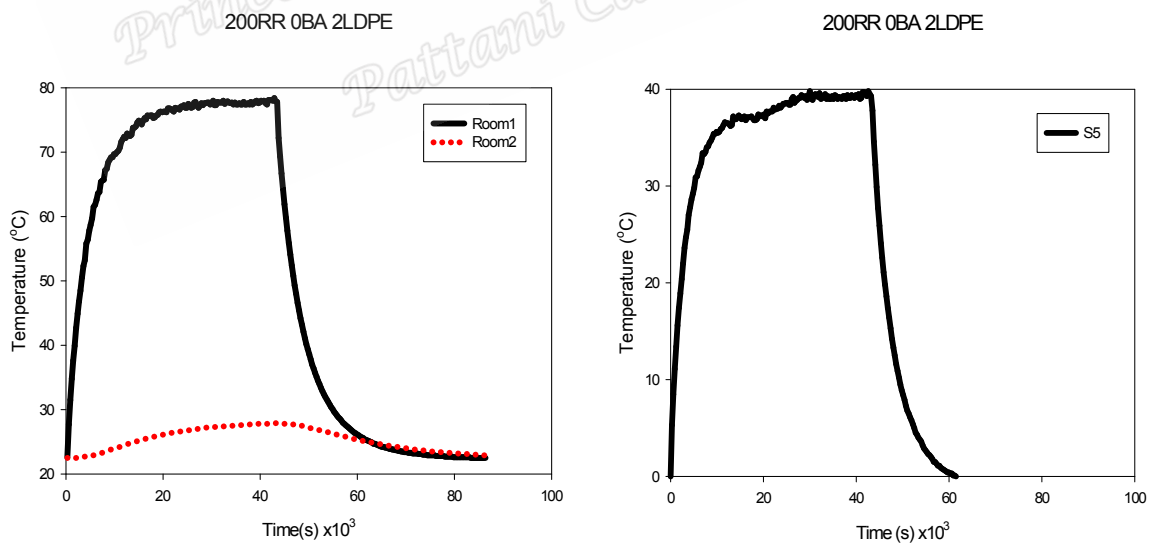
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 4 phr



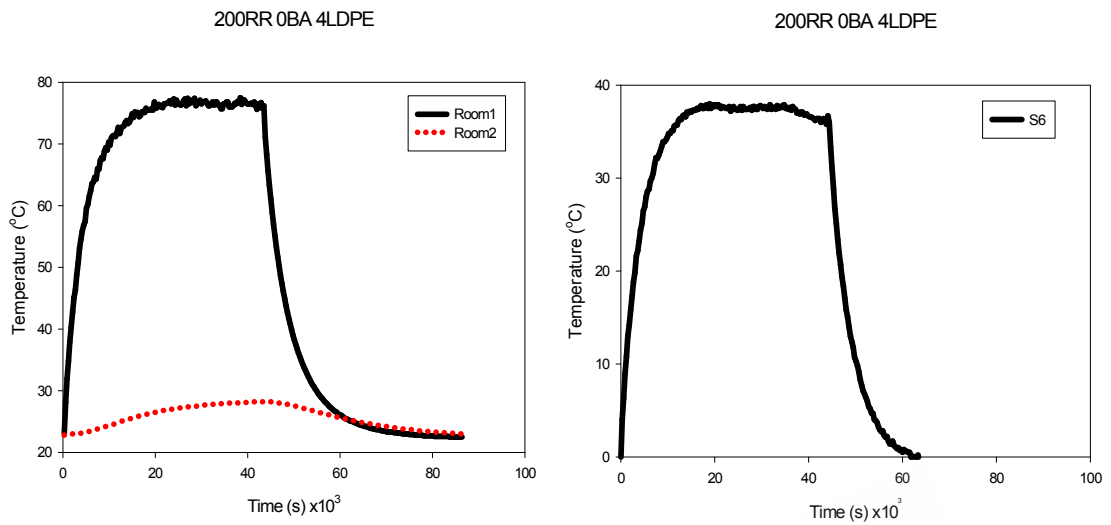
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 6 phr



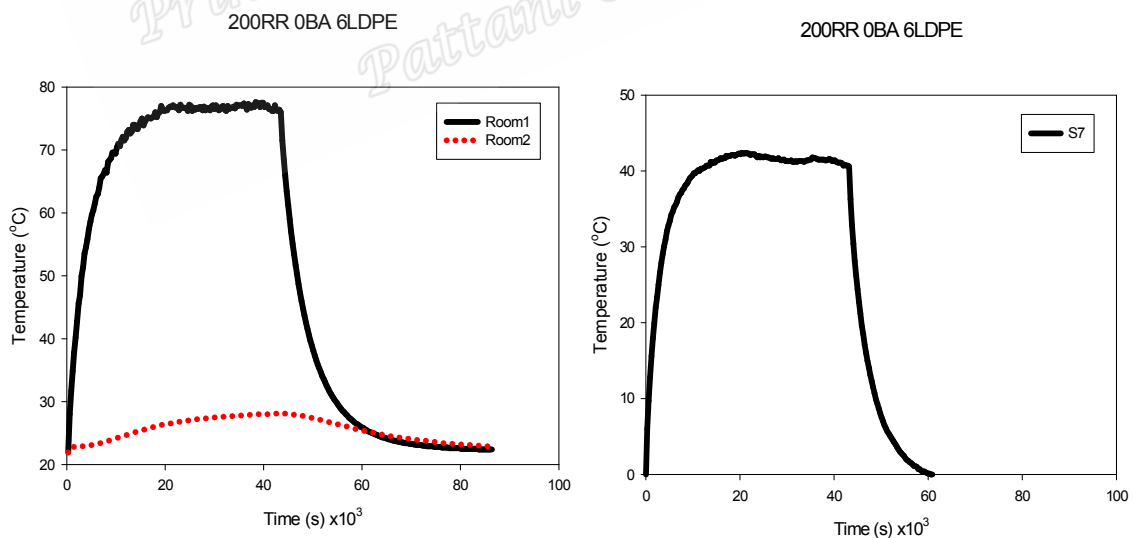
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 0 phr โดยผสม LDPE 8 phr



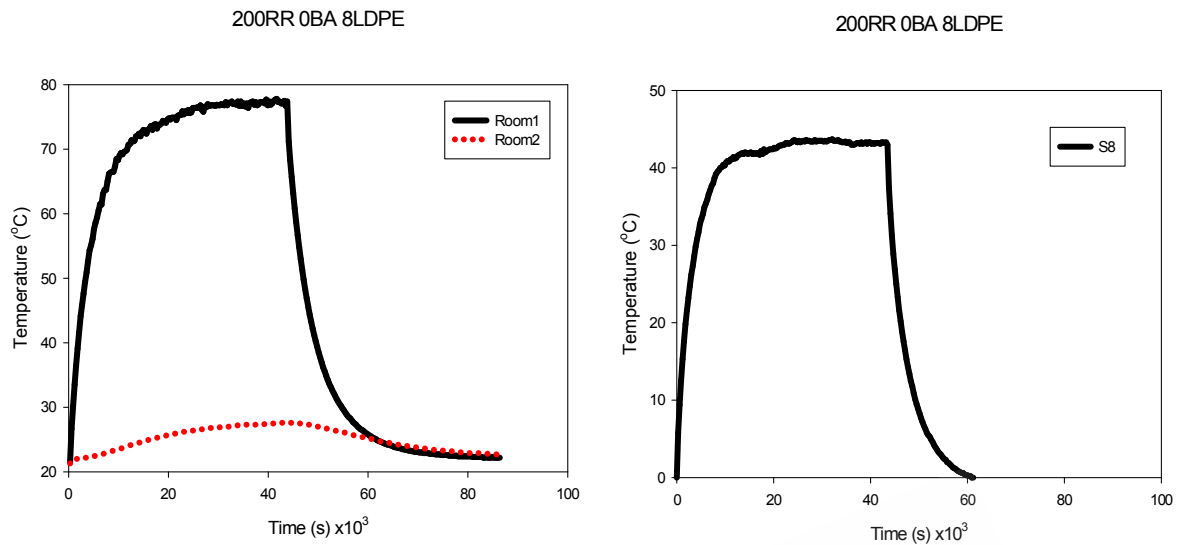
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2 phr



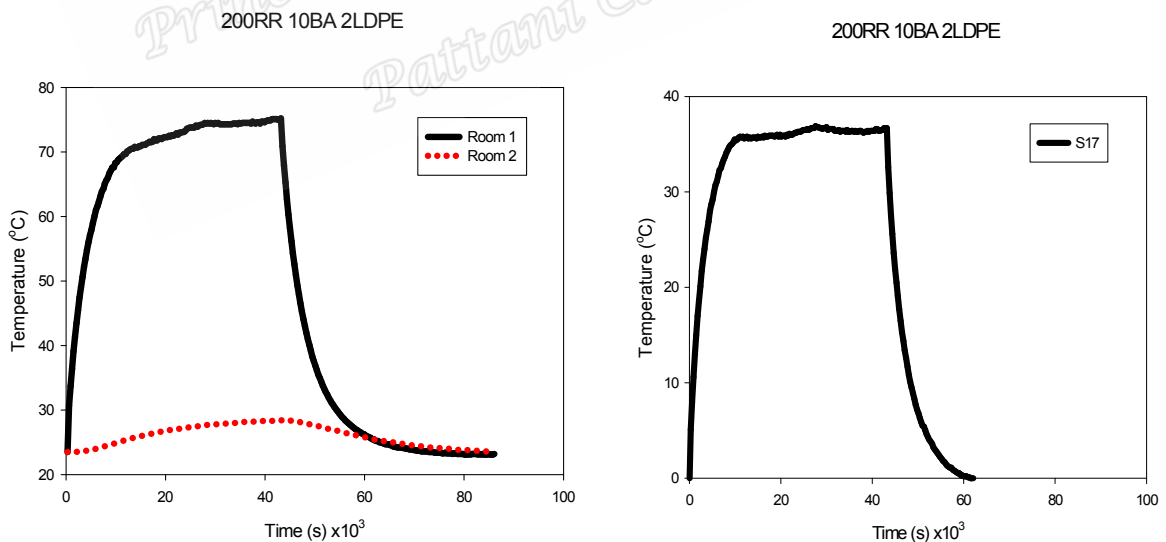
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 4 phr



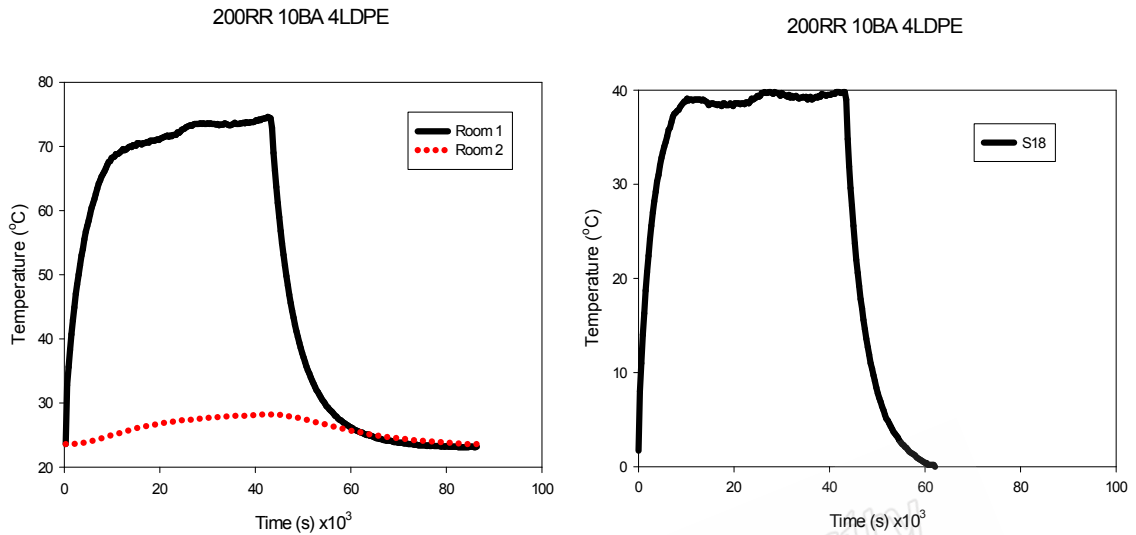
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 6 phr



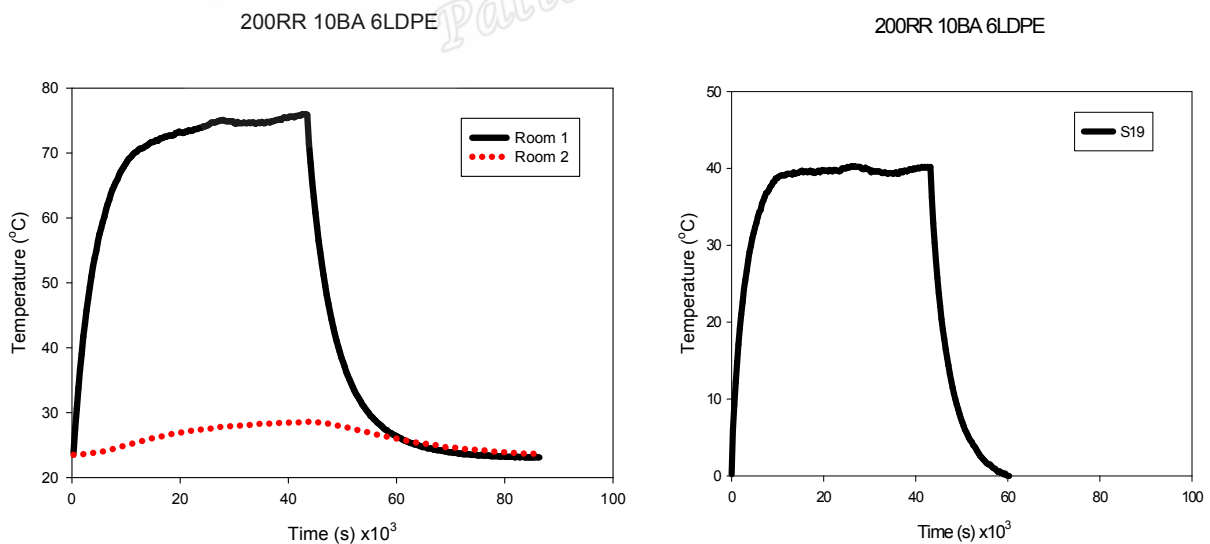
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 8 phr



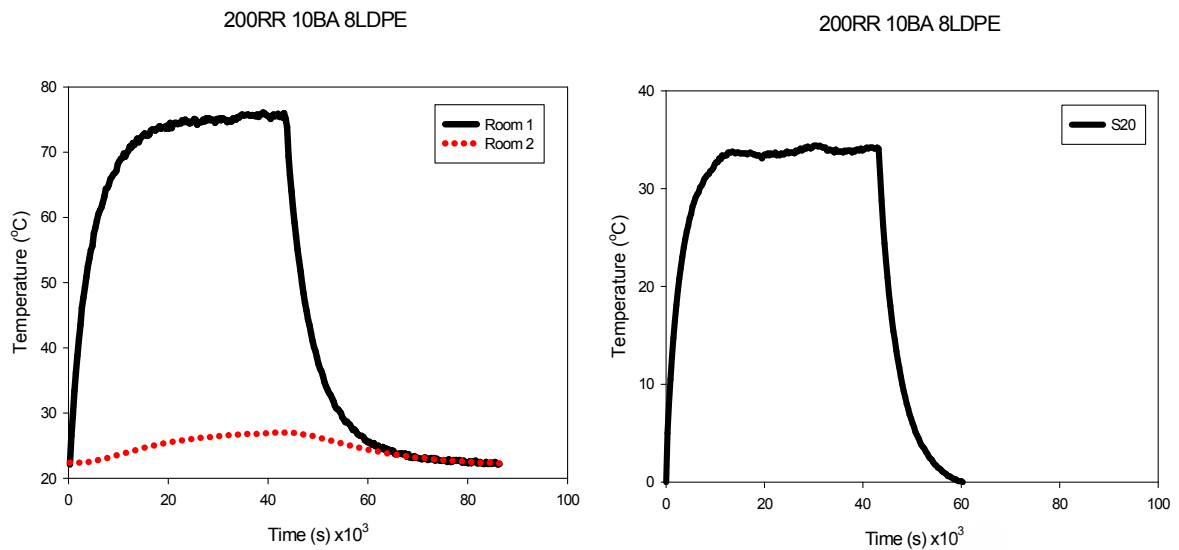
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 2 phr



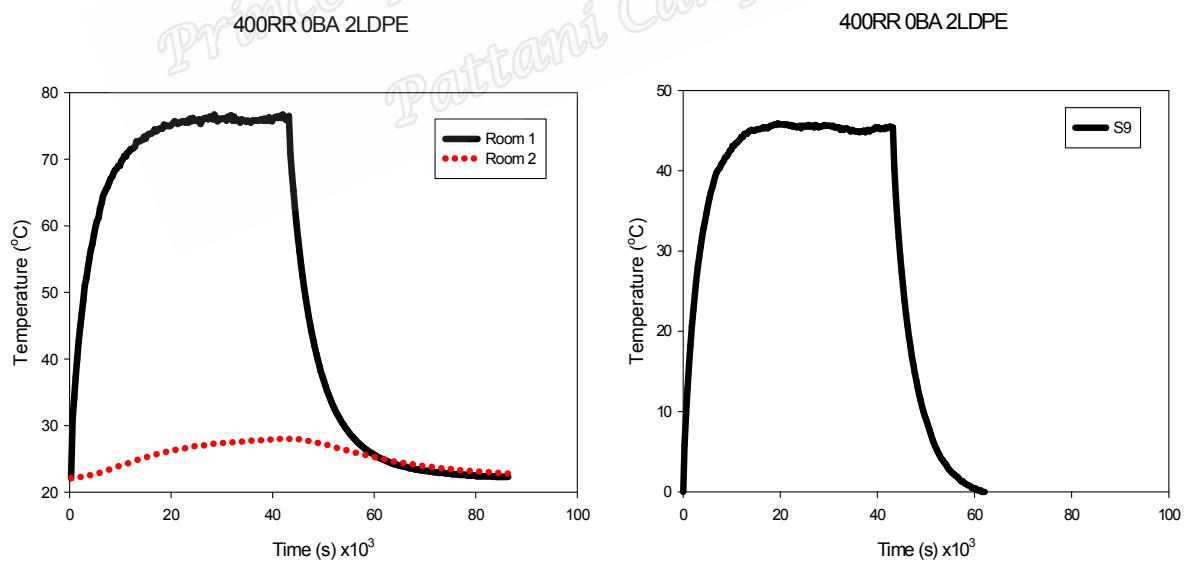
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 4 phr



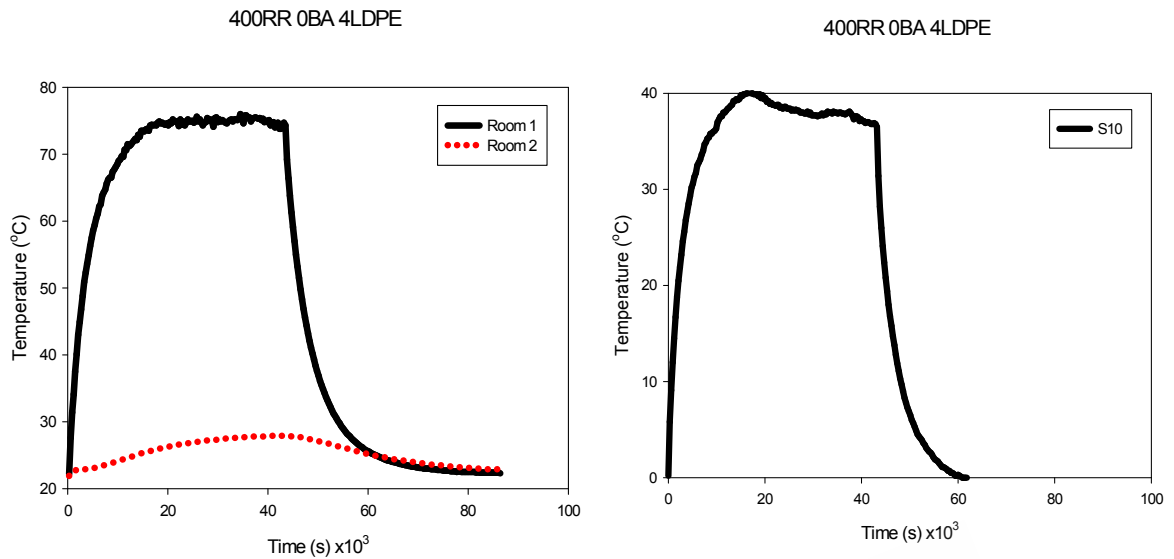
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 6 phr



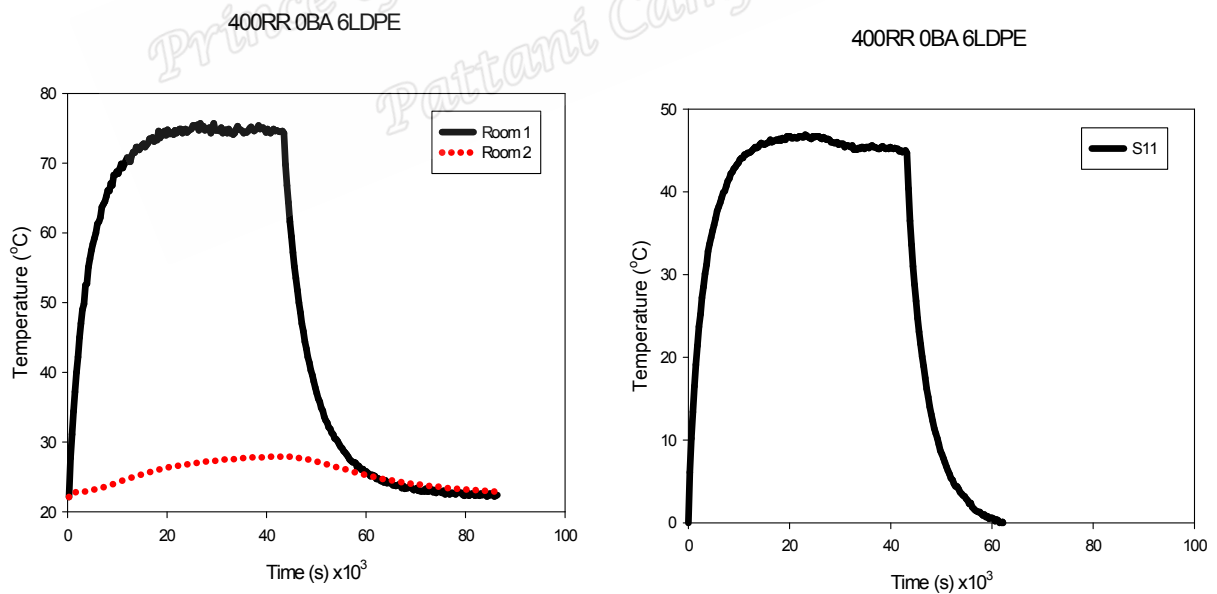
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 200 phr โดยผสม LDPE 8 phr



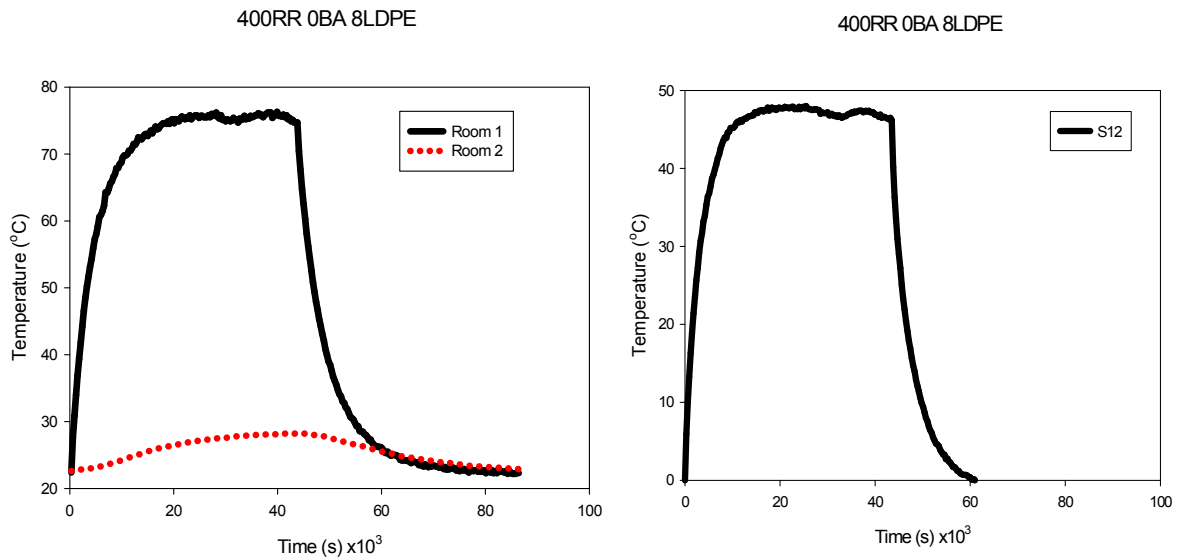
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2 phr



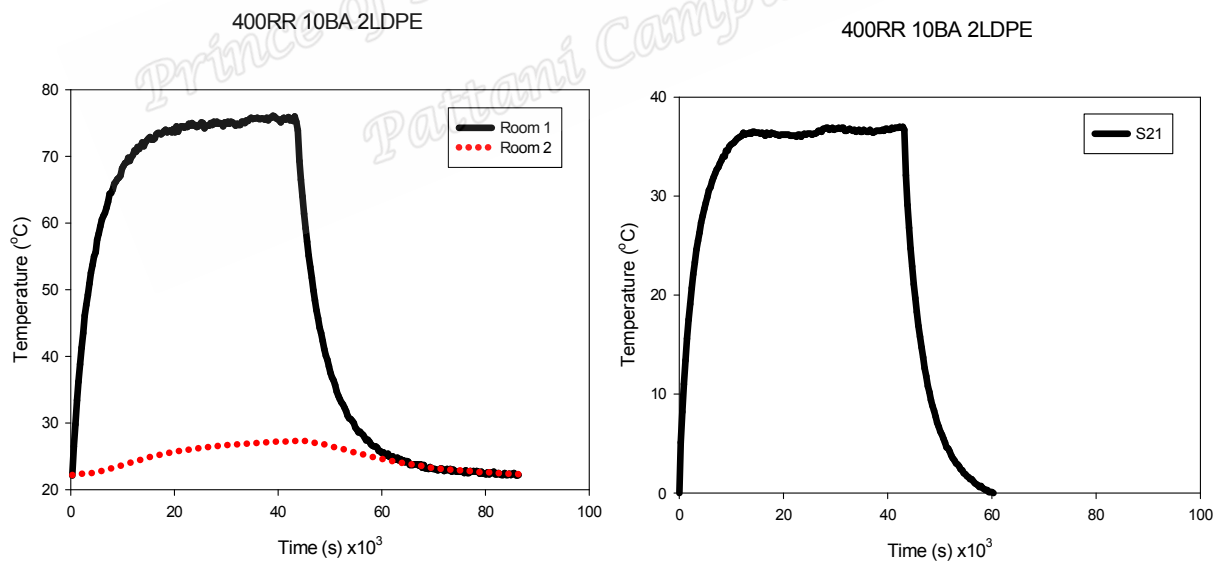
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 4 phr



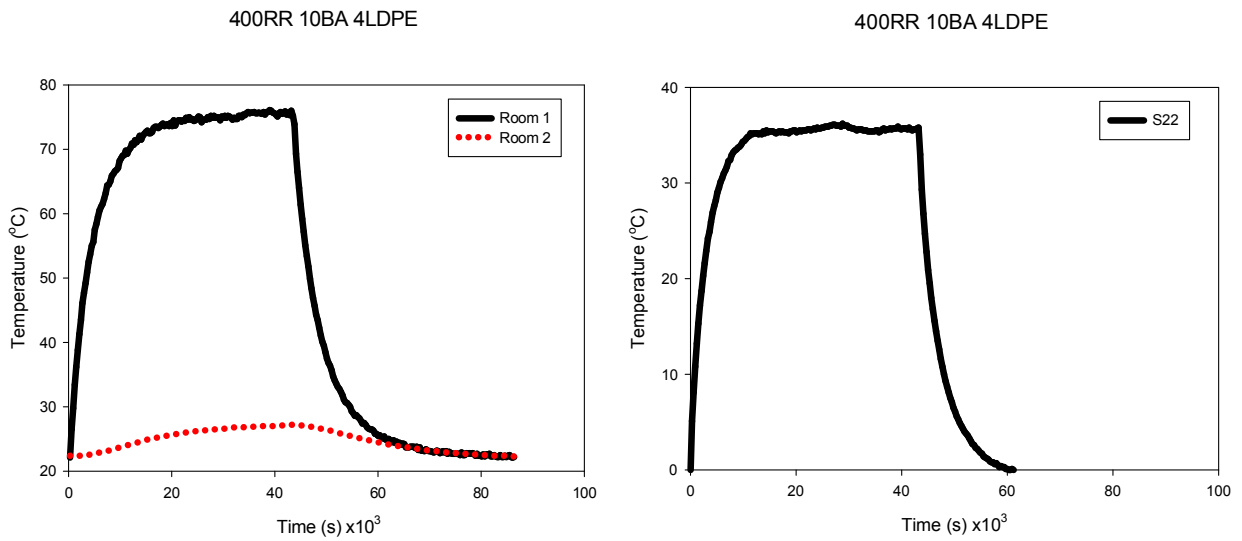
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 6 phr



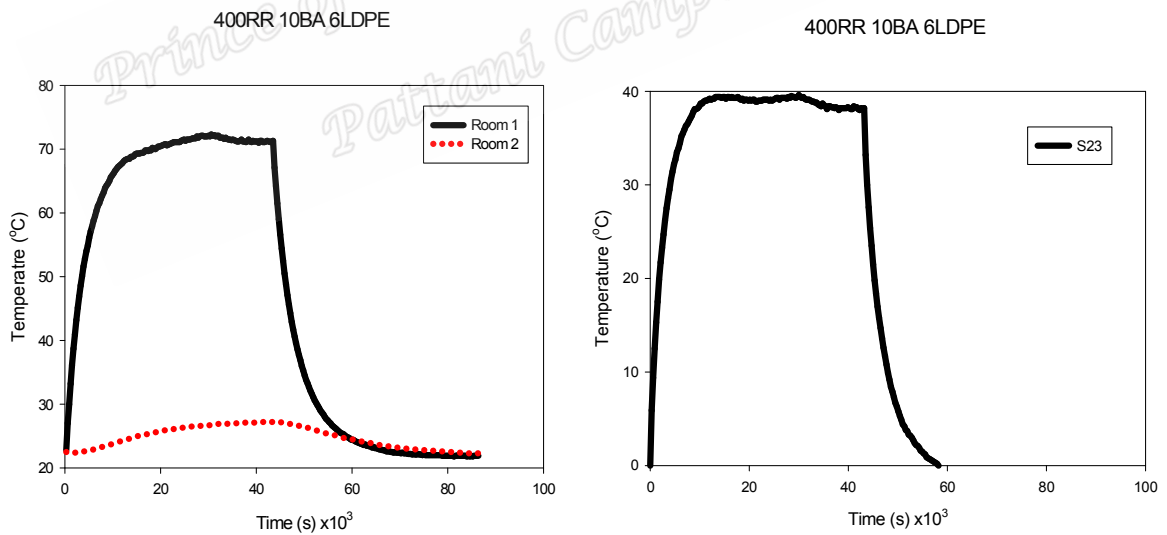
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 0 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 8 phr



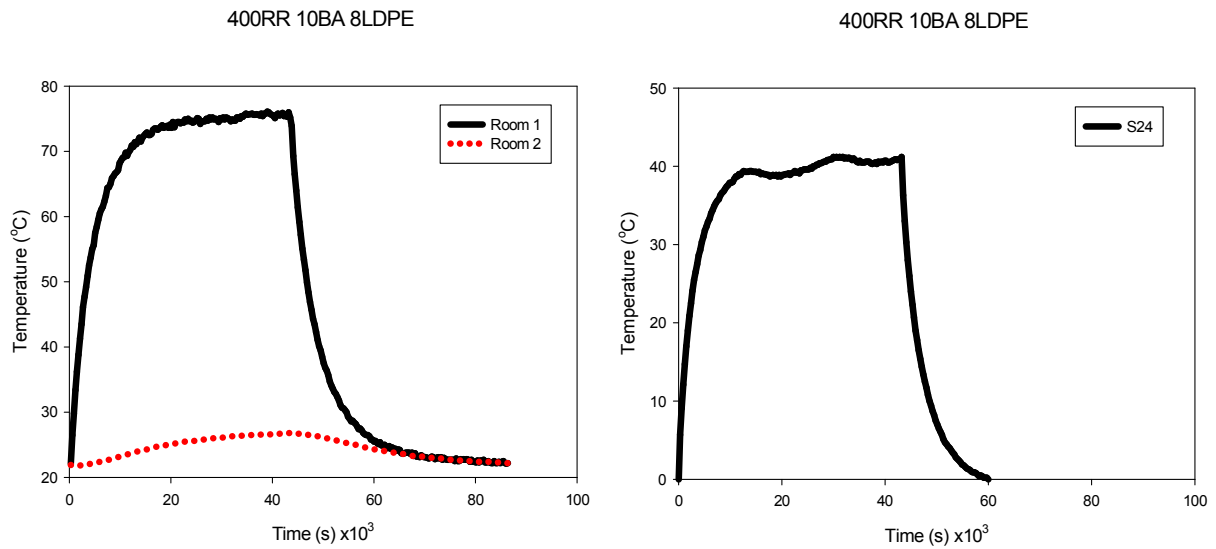
กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 2 phr



กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 4 phr



กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมพัทธ์ตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 6 phr



กราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิสัมผัสตัวอย่างกับเวลา ตามลำดับ
ของสูตรยาง NR 100 phr BA 10 phr RR 400 phr โดยผสม LDPE 8 phr

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก ข

- ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าความเค้น ค่าร้อยละการยืด และค่าความหนาแน่นของแผ่นตัวอย่างสูตรต่าง ๆ

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ผ.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนของฉนวนกันความร้อนที่ปริมาณสารตัวเติมต่างๆ

สารก่อฟอง (phr)	ยางรีเคลม (phr)	เศษแผ่นฟิล์ม LDPE (phr)	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m-K)
0	0	2	5.1282×10^{-3}
0	0	4	5.0388×10^{-3}
0	0	6	3.8398×10^{-3}
0	0	8	3.8149×10^{-3}
0	200	2	5.2672×10^{-3}
0	200	4	4.6798×10^{-3}
0	200	6	3.7900×10^{-3}
0	200	8	2.9099×10^{-3}
0	400	2	3.5342×10^{-3}
0	400	4	3.2599×10^{-3}
0	400	6	2.5376×10^{-3}
0	400	8	2.2067×10^{-3}
10	0	2	5.1906×10^{-3}
10	0	4	4.7015×10^{-3}
10	0	6	2.9099×10^{-3}
10	0	8	1.8342×10^{-3}
10	200	2	5.1320×10^{-3}
10	200	4	4.6883×10^{-3}
10	200	6	2.9330×10^{-3}
10	200	8	1.8434×10^{-3}
10	400	2	3.6240×10^{-3}
10	400	4	2.8868×10^{-3}
10	400	6	2.2067×10^{-3}
10	400	8	4.1885×10^{-4}

ตารางที่ ผ.2 แสดงค่าความเค้นและร้อยละการยืดของตัวอย่างที่ความเร็ว 50, 100 และ 200 มม./นาทึ

ตัวอย่าง/ ความเร็ว	50 มม./นาทึ		100 มม./นาทึ		200 มม./นาทึ	
	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%
S1	0.194	749	0.236	554	0.092	218
S2	0.239	708	0.239	663	0.098	220
S3	0.263	721	0.258	707	0.104	226
S4	0.281	719	0.263	936	0.109	228
S5	0.471	776	0.369	777	0.320	834
S6	0.411	778	0.401	778	0.337	832
S7	0.401	767	0.410	779	0.373	782
S8	0.370	754	0.471	780	0.397	734
S9	0.163	301	0.163	308	0.127	415
S10	0.175	308	0.175	307	0.196	385
S11	0.184	307	0.183	301	0.209	397
S12	0.200	291	0.200	291	0.225	398
S13	0.745	218	0.745	218	0.547	214
S14	0.652	204	0.652	198	0.625	213
S15	0.612	204	0.615	204	0.707	208
S16	0.537	198	0.536	201	0.730	205
S17	0.504	809	0.504	809	0.517	808
S18	0.385	773	0.385	773	0.489	780
S19	0.320	757	0.319	754	0.434	729
S20	0.284	747	0.284	747	0.334	721
S21	0.283	408	0.282	408	0.321	480
S22	0.276	404	0.276	407	0.285	434
S23	0.253	400	0.254	404	0.257	433
S24	0.215	381	0.215	384	0.225	401

ตารางที่ ผ.3 แสดงค่าความเค้นและร้อยละการยืดของตัวอย่างที่ความเร็ว 300 และ 400 มม./นาที

ตัวอย่าง/ ความเร็ว	300 มม./นาที		400 มม./นาที	
	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%	Tensile strength (MPa)	Elongation at break%
S1	0.117	1081	0.157	451
S2	0.263	921	0.192	582
S3	0.321	880	0.232	579
S4	0.342	822	0.283	615
S5	0.246	810	0.232	530
S6	0.326	725	0.256	521
S7	0.345	721	0.273	518
S8	0.374	713	0.289	515
S9	0.190	461	0.211	504
S10	0.209	448	0.224	499
S11	0.243	440	0.261	456
S12	0.289	386	0.304	345
S13	0.835	2307	0.692	2010
S14	0.743	2195	0.628	2005
S15	0.645	2102	0.575	1936
S16	0.568	2101	0.550	1921
S17	0.454	645	0.565	783
S18	0.410	620	0.513	731
S19	0.375	616	0.422	663
S20	0.268	611	0.294	709
S21	0.305	399	0.318	440
S22	0.260	395	0.283	434
S23	0.215	392	0.265	415
S24	0.202	374	0.189	389

ตารางที่ ผ.4 แสดงค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบ

ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น (Kg/m ³)	ตัวอย่างที่	ความหนาแน่น (Kg/m ³)
S1	0.937	S13	1.796
S2	0.923	S14	1.782
S3	0.913	S15	1.771
S4	0.907	S16	1.764
S5	1.075	S17	1.054
S6	1.061	S18	1.038
S7	1.037	S19	1.026
S8	1.013	S20	1.007
S9	1.105	S21	1.084
S10	1.089	S22	1.078
S11	1.079	S23	1.063
S12	1.066	S24	1.052

ภาคผนวก ค

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

- บทความ (Proceeding) จากการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ในงานประชุมวิชาการ และการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1 ระหว่างวันที่ 17-18 สิงหาคม 2560

Prince of Songkhla University
Pattani Campus

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

การใช้ยางพาราผสมยางรีเคลม เศษแผ่นฟิล์ม LDPE และสารก่อกองสำหรับแผ่นยางฉนวนกันความร้อน
Use of Natural Rubber mixed with Reclaimed Rubber LDPE film and Blowing Agent for Thermal insulation

สิยามา บินมะยะโกะ และ สมบัติ พุทธจักร

L. Binmayakok and S. Puttajukr

Science and Technology Faculty Prince of Songkla University, Pattani Campus, Rusamilae, Muang, Pattani 94000

*Corresponding author, E-mail: sombat.p@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) เบลนด์กับยางรีเคลม (Reclaimed Rubber, RR) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) และผสมสารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing Agent, BA) วัตถุประสงค์เพื่อหาวัสดุฉนวนกันความร้อนประสิทธิภาพสูงและราคาถูกจากยางธรรมชาติ โดยปริมาณของ NR 100 phr ปริมาณของ RR 0, 200 และ 400 phr ปริมาณของ LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr และปริมาณของ BA 0 และ 10 phr ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ที่อุณหภูมิ 79 °C และความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง พบว่าสมบัติทั้งสองมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ RR BA และ LDPE ที่ผสมเข้าไป และสูตรยางที่ดีที่สุด คือ สูตรยาง NR 100 phr RR 400 phr BA 10 phr ที่ผสม LDPE 8 phr ค่า k เท่ากับ 0.0004 W/m.K

คำสำคัญ: สมบัติการนำความร้อน ยางธรรมชาติ ฉนวนกันความร้อน

Abstract

This research was to study thermal properties of Natural rubber (NR) blended with reclaimed rubber (RR), Low density polyethylene (LDPE) and blowing agent (BA). It is aimed to find high performance NR insulator and low cost having fixed amount of NR was 100 phr, RR were 0, 200 and 400 phr, LDPE were 2, 4, 6 and 8 phr and BA were 0 and 10 phr. Thermal conductivity (k) was tested at 79 °C and density at room temperature. It was found that both of the properties mentioned were decreased when the amount of RR, BA and LDPE increased. The best formula of the NR thermal insulator is NR 100 phr RR 400 phr BA 10 phr and LDPE 8 phr. It has k value 0.0004 W/m.K.

Keywords: Thermal conductivity, Natural rubber, insulator

บทนำ

ในปัจจุบันผลกระทบที่เกิดจากภาวะโลกร้อนและปรากฏการณ์เรือนกระจก ที่เกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรมและการใช้รถยนต์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการใช้ฉนวนกันความร้อนประสิทธิภาพสูงและราคาถูกผลิตจากวัสดุธรรมชาติจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการก่อสร้างส่วนประกอบของอาคารที่อยู่อาศัย (Kader et al., 2011) จากปูนซีเมนต์หรืออิฐบล็อกที่นำมาทำก่อสร้างอาคารนั้นมีสมบัติฉนวนกันความร้อนยังไม่ดีพอกับความร้อนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวัสดุใหม่ที่มีหลายกลไกในการดูดซับความร้อน โดยใช้ยางธรรมชาติเบลนด์กับยางรีเคลม พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และสารก่อกองอากาศ โดยใช้ยางมีการยัดตัวได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นภายใต้หลักการรีโอโลยี (สมบัติ พุทธจักร, 2554) อนุภาคของยางรีเคลมที่ทำจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้วจะเป็นโครงสร้างรูพรุนทำให้เพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนได้อีก (Benkreira et al., 2011.) (Bulent Yesilata et al., 2009.) ส่วนแผ่นฟิล์ม LDPE มีความยืดหยุ่นทำให้ชิ้นงานนิ่มและสามารถเพิ่มการเป็นฉนวนความร้อนได้อีก

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

กลไก นอกจากนี้เมื่อผสม Sodium Bicarbonate เป็นสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ยิ่งเพิ่มกลไกในการดูดซับความร้อนจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอากาศ ดังนั้นชิ้นงานที่ได้จากยางธรรมชาติเบลดยางรีเคลม พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและสารที่ทำให้เกิดฟองอากาศ ควรจะมีสมบัติการนำความร้อนน้อยลง นั่นคือสมบัติเป็นฉนวนความร้อนมากขึ้น

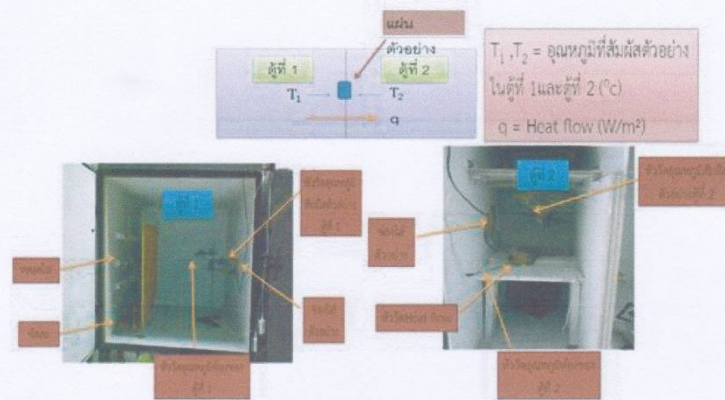
ตารางที่ 1 ค่าการนำความร้อนของวัสดุบางชนิด (Bailly, M., 1994.)

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (k) (W/m.K)
โลหะบริสุทธิ์	35 - 430
โลหะผสม	20 - 200
โลหะเหลว	9 - 90
ของเหลว (อโลหะ)	0.2 - 2.0
ของแข็ง (อโลหะ)	0.02 - 20
ฉนวน	0.02 - 0.40
อะลูมิเนียม	237
คอนกรีต	1.82
ทองแดง	401
เพชร	2300
น้ำแข็ง	2.2
กระดาษ	0.05
ไม้	0.1 - 0.35
เงิน	429

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเกรด STR 5L ยางรีเคลมที่ทำจากรถยนต์ที่ใช้แล้วนำมาบดให้เป็นอนุภาคขนาดเล็ก แผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นถุงพลาสติกที่ใช้บรรจุผักและผลไม้ ผลิตโดยบริษัท ทานตะวันอุตสาหกรรม จ.นครปฐม สารเคมีที่ใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ชนิด White seal เป็นสารเคมีที่ใช้ในการเริ่มต้นปฏิกิริยา กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารเคมีสีขาวที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา Tetramethyl Thiuram Disulphide (TMTD) เป็นสารเคมีที่ใช้ร่วมกับ ZnO และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม N-phenyl-N-1, 3-dimethylbutyl-phenylenediamine (6PPD) สารแอนติออกซิแดนต์ เป็นสารเคมีที่ช่วยไม่ให้ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ Sodium Bicarbonate เป็นสารที่ทำให้เกิดฟอง กำมะถัน (Sulphur) เป็นสารตัวสุดท้ายที่ใช้ในการผสมยาง เป็นตัวที่ทำให้พันธะโควาเลนต์ระหว่างโซ่ยาง เครื่องชั่งไฟฟ้า ความละเอียด 0.0001 g เครื่องบดและผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) เครื่องหาเวลาสุกของยาง แบบ Oscillating Disc Rheometer เครื่องขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัด (Compression Moulding) ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อน หัววัดอุณหภูมิ (Smart Temperature Sensor) และหัววัดความร้อนที่ส่งผ่าน (Smart Q Heat flow Sensor) ชุดเก็บข้อมูล (Data Logger) รุ่น EASY SENSE Advanced ผลิตโดยบริษัท DATA HARVEST (นพดล ผลไชย, 2551) นำมาประกอบและสร้างตู้หุ้มฉนวนความร้อน 3 ชั้นพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลอง

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 1 ชุดทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

ตู้ที่ 1 จะมีหลอดไฟเพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อน พัดลมเป็นตัวช่วยกระจายความร้อนให้สม่ำเสมอทั่วตู้ ระหว่างตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 มีช่องว่างแล้ววางแผ่นยางไว้ให้ความร้อนไหลผ่านจากตู้ที่ 1 ไปตู้ที่ 2 มีหัววัดพลังความร้อน ($q, W/m^2$) ที่ส่งผ่านติดกับแผ่นยางในตู้ที่ 2 มีหัววัดอุณหภูมิภายในตู้ทั้งสอง และหัววัดอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสแผ่นยาง (ΔT) และวัดความหนาเฉลี่ยของแผ่นยาง (ΔX) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามสมการ $q = k \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$ (นพดล ผลไชย, 2551) เครื่องทดสอบความหนาแน่นระบบไฟฟ้า (Electric Densitymeter) รุ่น MD - 300S ผลิตโดยบริษัท Alfa Mirage และใช้หลักการอาร์คมิตีสในการคำนวณหาความหนาแน่น ซึ่งมวลในอากาศ ซึ่งมีมวลในน้ำ หาปริมาตรโดยการแทนที่น้ำ เครื่องทำงานโดยระบบอิเล็กทรอนิกส์และวัดละเอียดได้ $0.001 g/cm^3$ โดยการนำชิ้นทดสอบมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ $4 \times 4 cm^2$ แล้วหาความหนาแน่น



ภาพที่ 2 เครื่องทดสอบความหนาแน่นระบบไฟฟ้า

1. ออกแบบสูตรยางผสมแล้ว ทำการผสมยางธรรมชาติกับยางรีเคลมและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำโดยนำยางธรรมชาติปริมาณ 100 phr มาผสมกับยางรีเคลมในปริมาณ 0, 200, 400 phr และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในปริมาณ 2, 4, 6, 8 phr ตามลำดับ ผสมสารที่ทำให้เกิดฟองปริมาณ 0 และ 10 phr การผสมยางในแต่ละสูตรด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยสูตรที่ไม่ใช้ยางรีเคลมใช้เวลา 20 นาที และสูตรที่ใช้ยางรีเคลมใช้เวลาในการผสม 15 นาที (ความหนืดลดลง) ดังตารางที่ 2 -3 (s1 -s24) หลังจากผสมแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปหาเวลาสุกของยางด้วยเครื่อง รีโอมิเตอร์แบบแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer, ODR) แล้วจึงนำยางดังกล่าว

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

ไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิและใช้เวลาดำที่ได้จากเครื่อง ODR ได้แผ่นยางผสมขึ้นรูปแล้วที่มีความหนา 1 mm.

ตารางที่ 2 สูตรการผสมยางสูตร BA 0 phr

Chemical	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12
NR*	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
RR**	0	0	0	0	200	200	200	200	400	400	400	400
ZnO	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TMTD	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6PPD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LDPE***	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
BA****	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

ตารางที่ 3 สูตรการผสมยางสูตร BA 10 phr

Chemical	s13	s14	s15	s16	s17	s18	s19	s20	s21	s22	s23	s24
NR*	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
RR**	0	0	0	0	200	200	200	200	400	400	400	400
ZnO	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TMTD	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6PPD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LDPE***	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
BA****	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

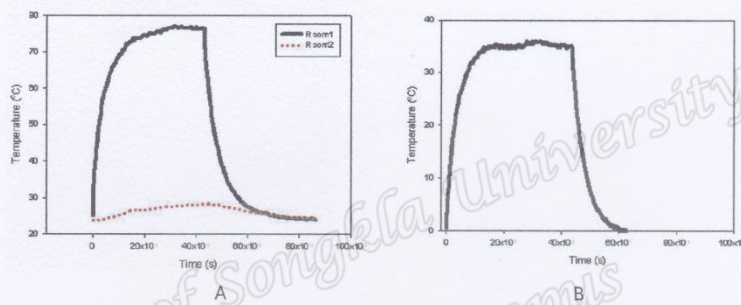
* Natural Rubber, ** Reclaimed Rubber, *** Low Density Polyethylene, **** Blowing Agent

2. การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน เป็นการทดลองบนพื้นฐานของสมการฟิลิกส์ ใช้ตุ้มถ่วง 3 ชิ้น เพื่อไม่ให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมภายนอก และกำหนดอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 80 °C ให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางวันกลางแจ้ง ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยนำชิ้นตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมที่ได้จากการเตรียมนั้นมาติดกันระหว่างตุ้ทั้งสอง เพิ่มอุณหภูมิตุ้ที่ 1 จาก 25 องศาเซลเซียส ถึง 79 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 12 ชั่วโมง อุณหภูมิตุ้ที่ 2 จะเพิ่มตามเล็กน้อย แล้วหยุดให้ความร้อน การวัดค่าต่างๆ ดำเนินไปอีก 12

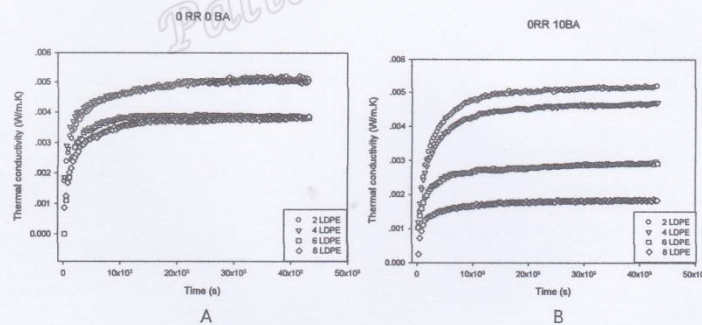
ชั่วโมง กระทั่งอุณหภูมิทั้งสองเท่ากันเหมือนที่จุดเริ่มต้น จากค่าต่างๆ ที่บันทึกได้แล้วคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เครื่องมือชุดนี้ควบคุมการทำงานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ มีความไวในการวัดข้อมูลทุกวินาทีและวัดละเอียดได้ทศนิยม 4 ตำแหน่ง การออกแบบสูตรต่างๆ เพื่อเพิ่มกลไกหลากหลายในการดูดซับความร้อน เช่น การดูดซับโดยการขยับตัวของโซียง การดูดซับโดยการขยับตัวเล็กน้อยของอนุภาคยางรีไซเคิล การดูดซับจากโมเลกุลของอากาศในพองอากาศที่เกิดจากสารก่อพองและยังถูกกันด้วยเศษแผ่นฟิล์ม LDPE จึงส่งผลให้เห็นได้ว่า อุณหภูมิของตู้ที่ 2 เมื่อกันด้วยแผ่นฉนวนเหล่านี้ทำให้อุณหภูมิของตู้ที่ 2 เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 4°C เท่านั้น ในขณะที่ตู้ที่ 1 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 79°C ซึ่งการวัดฉนวนความร้อนแบบดั้งเดิมนั้นเป็นการดูดซับความร้อนเพียง 1 กลไกเท่านั้น

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

1. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ของแต่ละสูตร นำข้อมูลผลการทดลองมาเขียนกราฟอุณหภูมิตู้ที่ 1 และตู้ที่ 2 กับเวลา และกราฟผลต่างอุณหภูมิ สัมผัส กับเวลา ดังรูปที่ 3 กราฟค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับเวลา ดังรูปที่ 4- รูปที่ 6

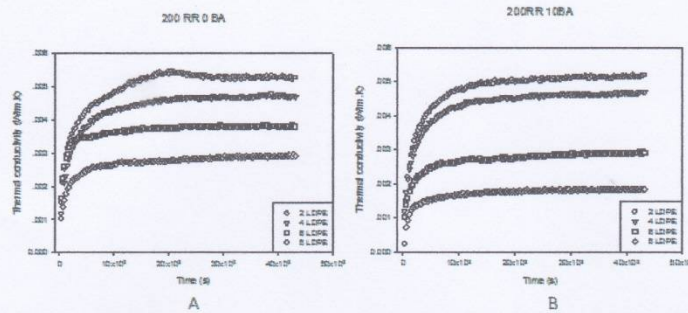


ภาพที่ 3 A กราฟอุณหภูมิของตู้ทดสอบการนำความร้อน ตู้ที่ 1 และ ตู้ที่ 2 B กราฟผลต่างอุณหภูมิต่างระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นยาง $\Delta T = T_1 - T_2$

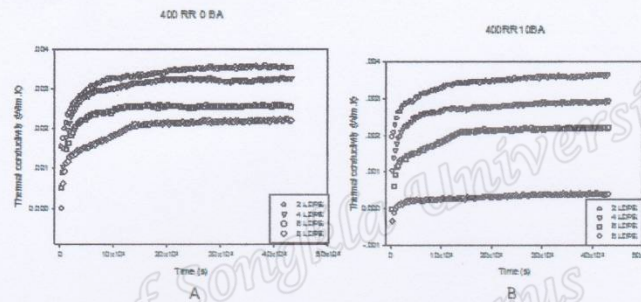


ภาพที่ 4 A สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 0 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 0 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
 1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
 วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

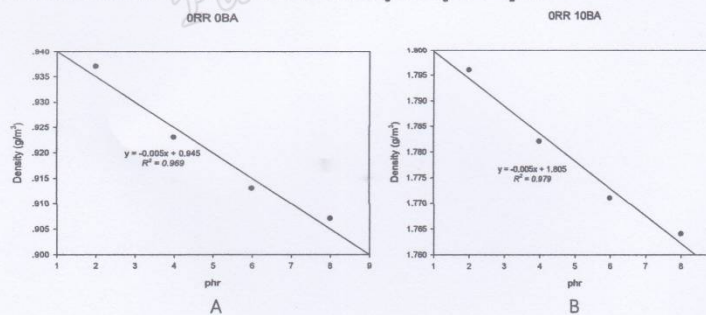


ภาพที่ 5 A สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 200 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 200 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ

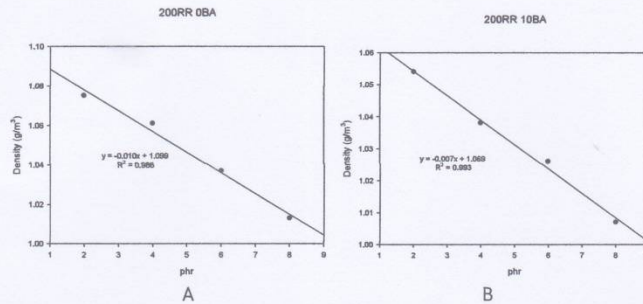


ภาพที่ 6 A สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 400 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 400 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ

2. ค่าความหนาแน่น (Density) ของยางผสมแต่ละสูตร ดังรูปที่ 7- รูปที่ 8



ภาพที่ 7 A ความหนาแน่นยางผสมสูตร NR 100 phr RR 0 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B ความหนาแน่นของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 0 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 8 A ความหนาแน่นการนำความร้อนของยางผสมสูตร NR 100 phr RR 200 phr BA 0 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ B ค่าความหนาแน่นการนำความร้อนของสูตรยาง NR 100 phr RR 200 phr BA 10 phr โดยผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ

ผลการทดลองภาพที่ 3 A กราฟอุณหภูมิของตู้ทดสอบการนำความร้อน ตู้ที่ 1 และ ตู้ที่ 2 นั้นที่เวลาเริ่มต้น อุณหภูมิตู้ทั้งสองเท่ากันอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน เนื่องจากระหว่างตู้ทั้งสอง มีช่องว่างที่อากาศถ่ายเทระหว่างกันได้ หัววัดอุณหภูมิอ่านได้ค่าเดียว 25 องศาเซลเซียส ซึ่งยืนยันความแม่นยำของหัววัดอุณหภูมิ เมื่อนำแผ่นยางมาปิดกัน อุณหภูมิตู้ที่ 1 จาก 25 องศาเซลเซียส ถึง 79 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 12 ชั่วโมง แต่อุณหภูมิตู้ที่ 2 เพิ่มขึ้นประมาณ 28 องศาเซลเซียส (ขึ้นกับยางสูตรผสม) นั่นคือแสดงให้เห็นประสิทธิภาพการเป็นฉนวนความร้อนเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดของห้องที่ 2 จะช้ากว่าเวลาที่อุณหภูมิสูงสุดของห้องที่ 1 อันเป็นผลมาจากการหน่วงที่เกิดจากการยับตัวของโมเลกุลยาง (นพดล ผลไชย, 2551) (สมบัติ พุทธิจักร, 2554) ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางรีโอโลยี แรงเสียดทานระหว่างโซ่โมเลกุลยางเป็นกลไกหนึ่งที่สลายความร้อน (สมบัติ พุทธิจักร, 2555) นอกจากนี้ภายในโครงสร้างอนุภาคยางรีโอโลยีที่มีอากาศอยู่ และเมื่อผสมสารก่อกองอากาศเข้าไปความเป็นฉนวนความร้อนยิ่งมากตาม อันเป็นผลจากการเคลื่อนที่โมเลกุลอากาศที่ซึ่งอยู่ภายในแผ่นยางเป็นอีกกลไกหนึ่งที่สลายความร้อนที่ส่งผ่านเข้าไปในแผ่นยาง

สรุปผลการทดลอง

สมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติ เบลนด์ยางรีโอโลยี พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และผสมสารที่ทำให้เกิดฟอง ทำให้ได้วัสดุฉนวนความร้อนประสิทธิภาพสูง ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ที่อุณหภูมิ 75 °C พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางรีโอโลยี สารที่ทำให้เกิดฟองและ LDPE ที่ผสมเข้าไป คือสูตรยาง NR 100 phr, RR 0 phr, BA 0 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ตามลำดับ ค่า k ลดลงจาก 0.0052 – 0.0038 W/m.K สูตรยาง NR 100 phr, RR 0 phr, BA 10 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0050 – 0.0019 W/m.K สูตรยาง NR 100 phr, RR 200 phr, BA 0 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0051 – 0.0019 W/m.K สูตรยาง NR 100 phr RR 200 phr BA 10 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0037 – 0.0021 W/m.K สูตรยาง NR 100 phr, RR 400 phr, BA 0 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0052 – 0.0029 W/m.K สูตร NR 100 phr, RR 400 phr, BA 10 phr ที่ผสม LDPE 2, 4, 6, และ 8 phr ค่า k ลดลงจาก 0.0038 – 0.0004 W/m.K ส่วนความหนาแน่นของยางผสมแต่ละสูตรก็มีแนวโน้มลดลงอย่างมี

การประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1
1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560 โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

นัยสำคัญกับการนำความร้อน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า k ของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมซึ่งมีค่า 0.0080 W/m.K (สมบัติ พุทธจักร และคณะ, 2559)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้ คือ ผู้บริหารคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ แผนกวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี และบัณฑิต วิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย 30,000 บาท

เอกสารอ้างอิง

- Abdel, M.M., Kader, Abdel Wehab, S.M., Helal, M.A., and Hasan, H.H. (2011). Evaluation of thermal insulation and mechanical properties of waste rubber/natural rubber composites. HBRC Journal. 8(2012), 69-74
- Benkreira, H., Khan, A., and Horoshenkov, K.V. (2011). Sustainable acoustic and thermal insulation material from elastomeric waste residues. Chemical Engineering Science. 66(2011), 4157-4171
- Bulent Yesilata, Yusuf Isiker, and Paki Turgut. (2009). Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. Construction and Building Materials. 23(2009), 1878-1882
- นพดล ผลไชย. 2551. ผลของไหม้แลกและดีกรีเมนต์เพคเตอร์ต่อสมบัติเชิงความร้อนของผนังยาง. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- สมบัติ พุทธจักร. 2547. สมบัติเชิงฟิสิกส์ เชิงรีโอโลยีและวิศวกรรมของยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- สมบัติ พุทธจักร. 2554. รีโอโลยีขั้นสูงและการประยุกต์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- สมบัติ พุทธจักร. 2555. เทอร์โมไดนามิกส์และการประยุกต์สำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- สมบัติ พุทธจักร, ธรมิศ นาวรัตน์ และเนรุญชรา ศรีคะรัน. (2559). การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกแทรกแผ่นยางธรรมชาติ ผสมหยวกกล้วย. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 19(1), 75-83

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวลียานา บินมะยะโกะ

รหัสนักศึกษา 5620320801

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิทยาศาสตร์บัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา

1. ทุนยกเว้นค่าธรรมเนียมการศึกษา จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
3. ทุนเพื่อการศึกษา สมาคมราชกรีฑาสโมสร

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ลียานา บินมะยะโกะ และสมบัติ พุทธจักร. 2560. การใช้ยางพาราผสมยางรีเคลม เศษแผ่นฟิล์ม LDPE และสารก่อกองสำหรับแผ่นยางฉนวนกันความร้อน. การประชุมวิชาการและการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1. ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเพรส โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่, เชียงใหม่, 17-18 สิงหาคม 2560, 456-463.