



อิทธิพลของโดสรังสีแกมมาต่อสมบัติทางเทคโนโลยีของน้ำยางธรรมชาติฉายรังสี

**Effect of Gamma-ray Dose on The Technological Properties of Irradiated
Natural Rubber Latex**

คมกฤษ ฤทธิรงค์

Komgrit Rittirong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Physics

Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ อธิธิพลของโคสร้างสี่แถมมาต่อสมบัติทางเทคโนโลยีของน้ำยางธรรมชาติฉายรังสี
ผู้เขียน นายคมกฤษ ฤทธิรงค์
สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวัช ชิตตระการ)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวัช ชิตตระการ)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไทรภพ ผ่องสุวรรณ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไทรภพ ผ่องสุวรรณ)

.....
(ดร.วิรัช ทวีปรีดา)

.....กรรมการ
(ดร.วิรัช ทวีปรีดา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ อธิธิพลของโคสรังสีแกมมาต่อสมบัติทางเทคโนโลยีของน้ำยางธรรมชาติฉายรังสี
ผู้เขียน นายคมกฤษ ฤทธิรงค์
สาขาวิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2552

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาปริมาณรังสีแกมมาและผลของสารเซนซิไทเซอร์ต่อการวัลคาไนซ์ในน้ำยางธรรมชาติ สารตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติที่ผสมด้วยสารเซนซิไทเซอร์ n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene (C_2Cl_4) และ trichloromethane ($CHCl_3$) ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดผสมกันถูกฉายด้วยรังสีแกมมาปริมาณ 14 ถึง 22 kGy สมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ ถูกวิเคราะห์ด้วยการคำนวณค่าสัดส่วนการขยายตัวของสารตัวอย่าง ความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย และสมบัติทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลง ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าน้ำยางธรรมชาติที่ผสมสารเซนซิไทเซอร์ทั้งสามชนิดของ n-BA, C_2Cl_4 และ $CHCl_3$ มีความหนาแน่นของ โครงร่างตาข่ายที่เพิ่มขึ้น และแปรผันตามสัดส่วนของปริมาณการฉายรังสีแกมมา

Thesis Title Effect of gamma-ray dose on the technological properties of irradiated natural rubber latex .

Author Komgrit Rittirong

Major Physics

Academic Year 2009

ABSTRACT

The vulcanization of natural rubber latex can be induced by gamma radiation, which enhances cross-linking within the rubber matrix. The purpose of this research is to investigate the effect of gamma radiation dose and sensitizers on the physical properties of irradiated natural rubber. Three sensitizers, namely, n-butyl acrylate (n-BA) , tetrachloroethylene (C_2Cl_4) and trichloromethane ($CHCl_3$) were mixed with natural rubber latex before irradiation with gamma ray dose varied from 14 to 22 kGy. Results showed that the mixture of three sensitizers with specific ratios effectively can induced the cross-linking of natural rubber latex. The cross-linking density and improved physical properties increased with increasing gamma dose. Therefore, the mixture of n-BA, C_2Cl_4 and $CHCl_3$ have shown to be a critical parameter in the vulcanization of natural rubber latex by gamma radiation.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับรังสี	8
2.1.1 แหล่งกำเนิดรังสีและชนิดของรังสี	8
2.1.1.1 รังสีเอ็กซ์	8
2.1.1.2 รังสีแกมมา	9
2.1.1.3 อิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง	10
2.1.1.4 นิวตรอน	11
2.1.1.5 แสงซินโครตรอน	11
2.1.2 โครงสร้างระบบลำเลียงแสง BL-6	13
2.1.2.1 ระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า	13
2.1.2.2 ระบบลำเลียงแสงใน โถงทดลอง	13
2.1.2.3 ระบบขับเคลื่อนชิ้นงาน	14
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับยางธรรมชาติ	20
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติ	20
2.2.2 ส่วนประกอบต่างๆ ในน้ำยาง	20
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3 ส่วนประกอบของน้ำยาง	21
2.2.3.1 ส่วนของเนื้อยาง	21
2.2.3.2 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง	22
2.2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับการผลิตน้ำยางข้น	23
2.2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับชนิดของน้ำยางข้น	25
2.2.5.1. น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ	26
2.2.5.2. น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง	26
2.2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับการแปรรูปน้ำยางธรรมชาติ	26
2.2.7 สารเคมีสำหรับยาง	27
2.2.7.1 สารทำให้ยางคงรูป	27
2.2.7.2 สารตัวเร่ง	31
2.2.7.3 สารกระตุ้น	32
2.2.7.4 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ	34
2.2.7.5 สารอื่นๆ ได้แก่ สารหน่วง	34
2.2.8 ทฤษฎีเกี่ยวกับการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ	34
2.2.8.1 การวัลคาไนซ์ของแผ่นฟิล์มที่ได้จากน้ำยาง	35
2.2.8.2 ผลทางโครงสร้างทางฟิสิกส์ในแผ่นฟิล์มน้ำยางพรีวัลคาไนซ์	35
2.2.9 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทำพรีวัลคาไนซ์	35
2.2.9.1 สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ หรือสารเซนซิไทเซอร์	36
2.2.10 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวัลคาไนซ์ยาง	36
2.2.11 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติของยางในลักษณะฟิล์มบาง	40
2.2.11.1 สมบัติการบวมพอง	41
2.2.11.2 การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง	42
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ	42
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสี	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	
3.1 สารเคมี	59
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย	59
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	60
3.3.1 การเตรียมน้ำยาธรรมชาติและสารเคมี ก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์	60
3.3.1.1 การเตรียมน้ำยาธรรมชาติสำหรับการวัลคาไนซ์	60
3.3.2 กระบวนการวัลคาไนซ์	62
3.3.2.1 กระบวนการวัลคาไนซ์	
ด้วยการเติมสารเซนต์ไพเตอร์และความร้อน	62
3.3.2.2 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา	63
3.3.2.3 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	65
3.3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง	69
3.3.3.1 การขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง	69
3.3.3.2 สมบัติการบวมพอง	70
3.3.3.3 การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง	71
3.3.2.4 การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา	72
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการเติมสารเซนต์ไพเตอร์และความร้อน	73
4.1.1 น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ	73
4.1.2 น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง	94
4.2 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา	115
4.2.1 น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ	115
4.2.2 น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง	127
4.3 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	139
4.3.1 น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ	139
4.3.2 น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง	143

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	149
5.1.1 กระบวนการวัดค่าไนซ์ด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน	149
5.1.2 กระบวนการวัดค่าไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา	149
5.1.3 กระบวนการวัดค่าไนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	150
5.2 ข้อเสนอแนะ	150
บรรณานุกรม	151
ภาคผนวก	156
ภาคผนวก ก	157
ภาคผนวก ข	163
ประวัติผู้เขียน	177

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ในระบบลำเลียงแสง BL-6	15
2.2 สรุปข้อมูลทางเทคนิคของระบบลำเลียงแสง BL-6	18
2.3 ส่วนประกอบของน้ำยางสด	21
2.4 สมบัติของน้ำยางชั้นตามมาตรฐาน ASTM 2005 D1076	25
2.5 แสดงระบบการวัลคาไนซ์ ปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งที่ใช้	30
2.6 แสดงปริมาณพันธะการเชื่อมโยงแบบต่างๆของระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้กำมะถัน และสมบัติของยางธรรมชาติที่ได้	30
3.1 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี	61
3.2 ลำดับการผสมสารเคมี	61
3.3 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน	62
3.4 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน	62
3.5 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา	64
3.6 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา	64
3.7 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	66
3.8 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	66
4.1 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน	73
4.2 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn _{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง	74

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
4.3 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn ₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง	79
4.4 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn _{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง	84
4.5 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn ₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง	89
4.6 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน	94
4.7 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn _{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง	95
4.8 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn ₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง	100
4.9 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn _{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง	105
4.10 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn ₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง	110
4.11 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา	115

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
4.12 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร	116
4.13 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีสำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา	127
4.14 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร	128
4.15 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีสำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	139
4.16 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$	140
4.17 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีสำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	143
4.18 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5CH_5$	144

รายการภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
1.1 พื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศไทย ปี 2544-2549	2
2.1 แสดงฟังก์ชันการสลายตัวของสาร $^{60}\text{Co}^*$ แล้วให้รังสีบีตา และรังสีแกมมา	10
2.2 ระบบลำเลียงแสง BL-6 ส่วนหน้า (ภายในกำแพงกันรังสี)	14
2.3 ระบบลำเลียงแสง BL-6 ในโถงทดลอง	14
2.4 อุปกรณ์ภายในสถานีออบรังสี	15
2.5 สเปกตรัมของแสงซินโครตรอนจากระบบลำเลียงแสง BL-6 เปรียบเทียบกำลังแสงที่ผ่านชั้นฟิลเตอร์ชนิดต่างๆ	19
2.6 ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ	21
2.7 แสดงกระบวนการผลิตน้ำยางข้น	24
2.8 แผนผังการแปรรูปยางดิบของไทย	27
2.9 ปฏิกริยาการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยกำมะถัน	28
2.10 อิทธิพลของความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงต่อสมบัติยางวัลคาไนซ์	30
2.11 ลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ซึ่งมีสารตัวเร่งและสารกระตุ้นรวมอยู่ด้วย	33
2.12 โครงสร้างทางเคมีของสารตัวเร่งปฏิกริยา	38
2.13 โครงสร้างสารประกอบแต่ละประเภทของเอมีน	38
2.14 ปฏิกริยาระหว่างเอมีนชนิดต่างๆกับไนโตรเจนออกไซด์	39
2.15 โครงสร้างของยางธรรมชาติและ squalene	46
3.1 ชุดกวนน้ำยางผสมสารเคมี	61
3.2 กระปุกพลาสติกขนาดเล็ก สำหรับใส่น้ำยาง สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์ชันด้วยการเติมสารเซโนซิไทเซอร์และความร้อน	63
3.3 กระปุกพลาสติกขนาดเล็ก สำหรับใส่น้ำยาง สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์ชันด้วยการฉายรังสีแกมมา	64
3.4 เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่นGammacell 220 Excel ที่ศูนย์ฉายรังสีแกมมา สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.)	65

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	
รูปถ่ายพลาสติกขนาดเล็ก(หนาประมาณ 70 ไมโครเมตร) เพื่อใต้น้ำยงสำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	66
3.6	
การติดตั้งสารตัวอย่าง ก่อนทำการทดลอง สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	67
3.7	
การติดตั้งสารตัวอย่าง ภายในเครื่องฉายแสงซินโครตรอน สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน	67
3.8	
ลักษณะเครื่องฉายแสงซินโครตรอน ภายใต้สภาวะการทดลองของโครงสร้างระบบลำเลียงแสง BL-6 ในส่วนของ การอาบรังสีวัสดุ (material X-Ray exposure)	68
3.9	
ลักษณะห้องฉายแสงซินโครตรอน ภายใต้สภาวะการทดลองของโครงสร้างระบบลำเลียงแสง BL-6	68
3.10	
การปาดน้ำยงด้วย casting knife	69
3.11	
แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางที่ผ่านการอบ	70
3.12	
แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ที่ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ก่อนนำมาแช่ในสารละลายโทลูอีน	71
3.13	
แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ที่ถูกแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้สถานะปิด คือ ขวดแก้วขนาดเล็กพร้อมฝาปิด	71
4.1	
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยงธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn _{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	76
4.2	
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยงธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn _{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	78

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn ₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	81
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn ₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	83
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn _{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	86
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn _{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	88
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn ₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	91
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn ₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	93
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn _{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	97
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn _{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลารวมทั้งหมด 120 ชั่วโมง	99

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	102
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลารวมทั้งหมด 120 ชั่วโมง	104
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{7.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	107
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{7.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	109
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	112
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง	114
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5$	117
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5$	118
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$	119

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$	120
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร	121
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5$	122
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5$	123
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$	124
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$	125
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร	126
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5$	129
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5$	130
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5CH_5$	131

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5CH_5$	132
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร	133
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5$	134
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5$	135
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5CH_5$	136
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5CH_5$	137
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร	138
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$	141
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$	142
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5CH_5$	145

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อม โยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$	146
4.41 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) กำลังขยายขนาด 500 เท่า	148
4.42 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) กำลังขยายขนาด 3,000 เท่า	148
4.43 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) กำลังขยายขนาด 10,000 เท่า	148

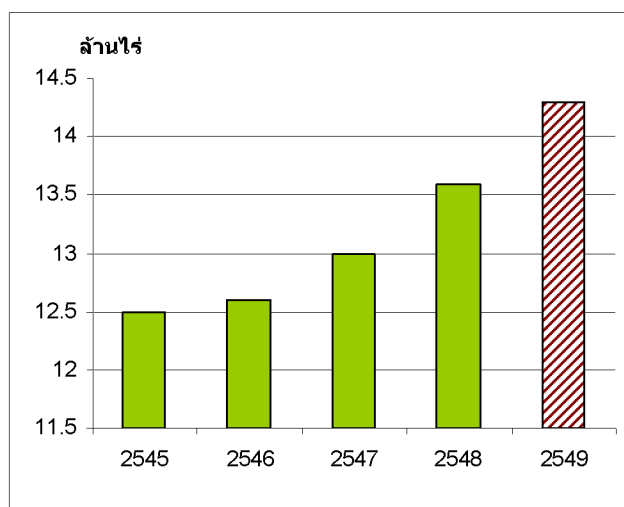
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในอดีตผลผลิตยางของประเทศไทยเพิ่มขึ้นจาก 1.20 ล้านตันในต้นปี พ.ศ. 2533 เป็น 1.34 ล้านตันในต้นปี พ.ศ. 2534 มูลค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3,000 ล้านบาท เป็น 26,000 ล้านบาท ทำให้ประเทศไทยกลายเป็นผู้ผลิตอันดับหนึ่งของโลกเป็นปีแรก โดยผลผลิตยางแผ่นรมควันมากที่สุดประมาณ 75.7% รองลงมาคือ ยางแท่งที่ทืออาร์ น้ำยางข้น ยางเครพ ยางแผ่นฟุ้งแห้งและอื่น ๆ ตามลำดับ จากการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมยางทำให้โรงงานอุตสาหกรรมยางชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้นจาก 132 โรงงานในปี พ.ศ. 2530 เป็น 167 โรงงานในปี พ.ศ. 2531 หรือประมาณ 27% ในช่วงระยะเวลา 4 ปี ที่ผ่านมามีการผลิตน้ำยางข้นที่ผลิตได้ 14,334 เมตริกตัน (1 เมตริกตัน เท่ากับ 1,000 กิโลกรัม) เป็น 21,743 เมตริกตันในปี พ.ศ. 2534 ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางข้นโดยเฉพาะถุงมือยางเพิ่มขึ้นจาก 11,825 เมตริกตัน ในปี พ.ศ. 2532 เป็น 15,342 เมตริกตัน ในปี พ.ศ. 2534 หรือเพิ่มประมาณ 29.74% (สถิติยางประเทศไทย, 1993 : 17-45)

ปัจจุบันประเทศไทยผลิตยางพารามากที่สุดอันดับหนึ่งของโลก คือประมาณปีละ 2.5 ล้านตัน คิดเป็น 1 ใน 3 ของผลผลิตทั่วโลก เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศมาเลเซีย ประเทศไทยมีผลผลิตยางมากกว่ามาเลเซียถึง 4 เท่า แต่กลับมีรายได้เข้าประเทศจากยางพาราน้อยกว่ามาเลเซียถึงปีละประมาณ 2,000 ล้านบาท (สถิติปี 2544) ตัวเลขของประเทศไทยเมื่อปี 2544 ประเทศไทยส่งออกยางดิบแปรรูปเบื้องต้นถึง 90% ของผลผลิต สร้างรายได้ 46,700 ล้านบาท [ที่มา วารสาร ประชาคมวิจัย ฉบับที่ 54 เดือน มี.ค.-เม.ย. 2547] จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น เห็นได้ว่ายางพารานับเป็นสินค้าเศรษฐกิจของประเทศ โดยแนวทางสำคัญที่จะเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางพาราได้แก่การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางในรูปแบบการใช้งานที่หลากหลายหรืออาจกล่าวได้ว่าผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (dipping) ประมาณ 70% ของน้ำยางข้นใช้ผลิตถุงมือผ่าตัด (surgical glove) ถุงมือบ้านและถุงมือชนิดอื่น ที่เหลือใช้ผลิตยางอนามัย ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทางการแพทย์สายยาง (catheter) และผลิตภัณฑ์ปลอดเชื้อต่าง ๆ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสทางปาก เช่น ลูกโป่ง จุกนมเด็ก เป็นต้น และคาดว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางข้อมีแนวโน้มในการผลิตสูงขึ้น



รูปที่ 1.1 พื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศไทย ปี 2544-2549
(สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร)

ในการแปรรูปยางดิบเป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้น จำเป็นจะต้องมีการนำยางมาผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน อันเป็นกระบวนการที่จะเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางจากเส้นตรง (linear) ไปเป็นพันธะเชื่อมโยง (cross-link) เพื่อให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการวัลคาไนเซชันนั้น โมเลกุลของยางจะต้องมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเชื่อมโยง (vulcanizing agent) โดยจะต้องมีการใช้ความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยา และในกระบวนการวัลคาไนเซชันนี้เอง เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาและพลังงานมากในขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งถ้ามีการพัฒนากระบวนการวัลคาไนเซชันให้มีระยะเวลาที่สั้นลง น่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการผลิตผลิตภัณฑ์จากยาง ตลอดจนลดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต อันจะส่งผลให้มีส่วนในการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีส่วนในการเพิ่มศักยภาพของอุตสาหกรรมในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทยในการแข่งขันกับนานาประเทศมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้เป็นที่ทราบกันดีว่า สมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนเซชันนั้นขึ้นกับ สภาพของกระบวนการวัลคาไนซ์เป็นอย่างมาก ทั้งในเรื่องของเวลา อุณหภูมิ สูตรของสารเคมีที่ใช้ อัตราเร็วในการเกิดการวัลคาไนซ์ และระบบของการวัลคาไนซ์ที่เลือกใช้ มีงานวิจัยที่พบว่า อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการวัลคาไนซ์ส่งผลต่อ ชนิดของพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของยาง อันมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของยางที่

ผ่านการวัลคาไนซ์ ด้วยปัญหาเรื่องของเวลาและพลังงานนี้ จึงเห็นถึงประโยชน์ของการเพิ่มอัตราเร็วและลดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต

จากเดิมยางธรรมชาติก่อนที่จะสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางจะต้องผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปของยางดิบให้เป็นอย่างที่รักษารูปทรงได้ มีความยืดหยุ่น (elasticity) หรือความแข็งตึง (stiffness) โดยให้มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยางด้วยกำมะถันหรือสารวัลคาไนซ์อื่น ๆ แม้ว่าการวัลคาไนซ์โดยกำมะถันสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้ความร้อนและความดัน แต่ต้องใช้เวลาการวัลคาไนซ์นาน การเติมสารตัวเร่งในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะทำให้กระบวนการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น ปริมาณของสารตัวเร่งและกำมะถันจะเป็นตัวกำหนดปริมาณและชนิดของพันธะเชื่อมโยง (cross-link) ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (cross-link density) จะขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ระบบการวัลคาไนซ์ ชนิดของสารตัวเร่ง เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ และอัตราส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่ง แต่ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากนี้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมทั่วไป ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ซึ่งมีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา (accelerator) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เพื่อทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น สารที่ตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งอาจเป็นสารก่อมะเร็งจำพวกสารประกอบไนโตรซามีน (nitrosamine) และก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง บางรายอาจก่อให้เกิดการแพ้ได้ (Nakamaru, A et al., 1989 : 1)

แต่เนื่องจากการวิจัยอย่างกว้างขวางในช่วงปลายปี 1970 พบว่าผลิตภัณฑ์ยาง เช่น จุกนมเด็ก และหัวคู มีส่วนประกอบของไนโตรซามีนมากถึง 300 ส่วนต่อพันล้าน (ppb) ซึ่งเป็นนำไปสู่ความพยายามอย่างหนักในอุตสาหกรรมยางที่จะขจัดเอาไนโตรซามีนนี้ออกไป ปกติแล้วไนโตรซามีนเป็นสารเคมีที่เกิดขึ้นได้ในสิ่งแวดล้อม ในอาหารพวกหมักดอง กะปิ ปลาร้า กุนเชียง เป็นต้น โดยไนโตรซามีนเกิดจากสารประกอบพวกอะมิโน (amino compound) เช่น ไนไตรท์ (เกิดในสารกันบูด) ไนเตรท (เกิดจากการหมัก) หรือไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (เกิดจากการสปาร์คของประจุของแสง)

สำหรับที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ไนโตรซามีนที่ระเหยได้เกิดขึ้นในระหว่างการวัลคาไนซ์ของยางที่ใช้ซัลเฟอร์และสารตัวเร่งพวกซัลฟิनाไมด์, ไดโซโอคาร์บาเมต, ไทยูเรม ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในเทคโนโลยีนี้ยางธรรมชาติเนื่องจากให้สมบัติทางกายภาพดี ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่ใช้มากที่สุดและเทคโนโลยีนี้ยาง จากการตรวจไม่พบไนโตรซามีน แต่มีไนโตรเซทเทเบิลไดเอทิลลามีน (nitrosatable diethylamine) มากถึง 400 ppb เนื่องจากสารตัวเร่งพวกนี้จะสลายตัวในเอมีนทุติยภูมิ (secondary amine)

เยอรมันเป็นประเทศแรกที่กำหนดระดับของไนโตรซามีนในผลิตภัณฑ์น้ำยาง มีผลในวันที่ 1 มกราคม 1982 โดยกำหนดขอบเขตระดับของไนโตรซามีนและ ไนโตรเซทเทเบิลในจุกนมเด็กและ หัวคูด 10 ppb และ 200 ppb ตามลำดับซึ่งเป็นมาตรฐานโลก (Gorton,1986)

การพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติโดยการให้ความร้อนแก่น้ำยางที่มีส่วนผสมของออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์ (organic peroxide) ได้มีการศึกษามาเป็นเวลาหลายปีแล้ว อย่างไรก็ตามมีการตีพิมพ์เกี่ยวกับเรื่องนี้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการผลิตส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัลคาไนซ์น้ำยางด้วยระบบซัลเฟอร์ปกติ(Conventional Sulphur-Vulcanised)ที่มีปัญหาเรื่องการเกิดไนโตรซามีนซึ่งจะมีผลโดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์จุกนมเด็ก อย่างไรก็ตามระบบนี้โดยทั่วไปจะให้ผลในการสุก(Curing) ช้ากว่า ระบบซัลเฟอร์-ไดไซโอคาร์บาเมต

การพรีวัลคาไนซ์ด้วยระบบไฮโดรเปอร์ออกไซด์มีข้อได้เปรียบกว่าระบบพรีวัลคาไนซ์ด้วยระบบซัลเฟอร์ คือ ไม่เกี่ยวกับการใช้สารตัวเร่งซึ่งเป็นตัวที่ก่อให้เกิดสารที่ทำให้เกิดมะเร็งพวกไนโตรซามีน(Carcinogenic nitrosamines) ซึ่งสารตัวเร่งสามารถทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวได้ (allergic skin reaction) นอกจากนี้การผลิตน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ด้วยระบบซัลเฟอร์ในทางการค้าซึ่งเตรียมโดยการปฏิกิริยาน้ำยางกับส่วนผสมที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์และสารตัวเร่งตัวเดียว หรือมากกว่า 1 ตัว โดยปกติจะใช้ซิงค์ไดเอทิลไดไซโอคาร์บาเมต(Zincdiethyldithiocarbamate,ZDEC) เป็นตัวเร่งและซิงค์ออกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ในการใช้ซัลเฟอร์เป็นตัววัลคาไนซ์ จะทำให้เกิดซัลเฟอร์อิสระ (free sulphur) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ไม่ใสและเกิดปรากฏการณ์ที่ซัลเฟอร์ซึมออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์(bloom) นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์(ZnO) ที่ใส่เข้าไปในโพแทสเซียมที่ละลายน้ำหรือเกลือโซเดียมจะไม่กระจายแทนที่ซิงค์ที่ละลายน้ำได้ และซิงค์ออกไซด์จะทำให้ความใสของแผ่นฟิล์มและความเสถียรของน้ำยางลดลง ถ้าใช้ที่ 0.2 phr หรือมากกว่านั้นซึ่งความใสของแผ่นฟิล์มมีความสำคัญในการประยุกต์น้ำยางวัลคาไนซ์ไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์จุกนม และถุงยางอนามัย เป็นต้น

นอกจากนี้ในระบบซัลเฟอร์ยังมีปัญหาเรื่องการกระจายตัวของสารเคมีที่ละลายไม่ได้ในส่วนผสมน้ำยาง อาจทำให้น้ำยางเกิดเป็นก้อนขึ้นและจะจับตัวจนหมด ดังนั้นสารเคมีที่จะใส่ลงในน้ำยางจะต้องมีการเตรียมให้ผิวของสารเคมีห่อหุ้มด้วยน้ำเสียก่อน และจะต้องบดในเครื่องบดเพื่อให้มีอนุภาคเล็กจะได้อัตโนมัติก่อน การทำเช่นนี้ต้องทำกับสารเคมีทุกตัวที่มีลักษณะเป็นผงแห้งๆ ในระบบซัลเฟอร์ รวมทั้งสารที่ใช้ในวัลคาไนซ์ คือ ซัลเฟอร์เองด้วย ซึ่งปกติสามารถทำให้เข้ากันได้กับน้ำยางโดยใช้เทคนิคการบดหรือตัดให้มีขนาดเล็กและต้องให้ได้ขนาดเล็กลงที่สุด 5 ไมโครเมตร จึงต้องใช้เวลาและพลังงานมากในอุตสาหกรรมน้ำยางที่จะลดขนาดซัลเฟอร์ให้มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตรได้

นอกจากการใช้สารเคมีแล้ว การฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา ก็สามารถทำให้ยางคงรูปได้เช่นกัน ถือเป็นกระบวนการวัลคาไนเซชันอีกหนึ่งวิธี โดยเมื่อถูกรังสีโมเลกุลของยางจะแตกตัวให้เรดิคัล และจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอนทำให้ยางที่ได้มีความเสถียรต่อความร้อน มีความบริสุทธิ์สูงเพราะไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน จึงเหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนทางการแพทย์ ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่ควรจะมีสารเคมีเจือปนน้อยที่สุด โดยในเวลาต่อมาได้มีผู้ทำการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากน้ำยางวัลคาไนซ์ด้วยรังสี (Chapiro, A., 1987 : 65) เพื่อให้โมเลกุลยางเกิดการพันธะเชื่อมโยง (cross-link) แทนการใช้กำมะถัน โดยมีเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ชนิดต่างๆ เป็นตัวลดปริมาณรังสีให้ต่ำลง ผลิตภัณฑ์ยางจากน้ำยางที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสีจะมีสมบัติบางประการที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากน้ำยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เช่น ปลอดภัยจากสารก่อมะเร็งไม่ระคายเคืองต่อผิวหนัง โปรงใสกว่า และมีโมดูลัส (modulus) ต่ำกว่า เป็นต้น

รวมถึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของยางในด้านต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น เช่น สมบัติเชิงกล ความต้านแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต้านการฉีกขาด (tear resistance) ความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) และความยืดหยุ่น (elasticity) แต่การใช้รังสีจะมีผลต่อสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ยางด้วย เช่น สมบัติความทนต่อแรงดึงหลังบ่มเร่งลดลง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาปริมาณรังสีแกมมาและแสงซินโครตรอน กับผลของสารเซนซิไทเซอร์ต่อการวัลคาไนซ์ในน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด สารตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติที่ผสมด้วยสารเซนซิไทเซอร์ n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene (C_2Cl_4), trichloromethane ($CHCl_3$) ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดผสมกันถูกฉายด้วยรังสีแกมมาปริมาณ 10 ถึง 24 kGy และแสงซินโครตรอนปริมาณ 0.5 ถึง 13 kGy คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ถูกวิเคราะห์ด้วยการคำนวณค่าสัดส่วนการขยายตัวของสารตัวอย่าง (Swelling ratio) ความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยง (Cross-link density) และสมบัติทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลง ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษานอกจากจะทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งผ่านการวัลคาไนซ์ ด้วยรังสีแกมมาและแสงซินโครตรอนดีขึ้นแล้ว ยังเป็นการช่วยลดต้นทุนการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสีแกมมาและแสงซินโครตรอนด้วย เนื่องจากจะทำให้ทราบถึงสารเซนซิไทเซอร์ที่เหมาะสมกับน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด จากผลของการใช้สารเซนซิไทเซอร์ต่อการวัลคาไนซ์ในน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด รวมถึงยังเป็นการพัฒนากระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมาและแสงซินโครตรอนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ เช่น สัดส่วนการขยายตัว (Swelling ratio) และความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยง

(Cross-link density) เป็นต้น จากน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียที่แตกต่างกัน โดยการผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา ในปริมาณรังสีที่แตกต่างกันด้วย คือ 0, 10, 12, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ

2. ศึกษาความเป็นไปได้และสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ เช่น สัดส่วนการขยายตัว (Swelling ratio) และความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยง (Cross-link density) เป็นต้น จากน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียที่แตกต่างกัน โดยการผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน ในปริมาณรังสีที่แตกต่างกันด้วย คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ

3. เปรียบเทียบผลของสารเซนซิไทเซอร์ต่อการวัลคาไนซ์ในน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด สารตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติที่ผสมด้วยสารเซนซิไทเซอร์ n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene (C_2Cl_4), trichloromethane ($CHCl_3$) ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดผสมกันถูกฉายด้วยรังสีแกมมา ปริมาณ 10 ถึง 22 kGy และแสงซินโครตรอนปริมาณ 0.5 ถึง 13 kGy

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติของน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด ทั้งชนิดแอมโมเนียต่ำ(LA) และแอมโมเนียสูง(HA)

2. ทดสอบน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดกับสารเซนซิไทเซอร์ที่เหมาะสม(sensitizer) คือ n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene (C_2Cl_4), trichloromethane ($CHCl_3$) ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดผสมกัน ก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์

3. นำน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด ทั้งชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) และแอมโมเนียสูง(HA) เข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาและแสงซินโครตรอน

4. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ เช่น สัดส่วนการขยายตัว (Swelling ratio) และความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยง (Cross-link density) เป็นต้น จากน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียที่แตกต่างกัน โดยการผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา ในปริมาณรังสีที่แตกต่างกันด้วย คือ 0, 10, 12, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ

5. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ เช่น สัดส่วนการขยายตัว (Swelling ratio) และความหนาแน่นของการเกิดพันธะเชื่อมโยง (Cross-link density) เป็นต้น จากน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียที่แตกต่างกัน โดยการ

ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน ในปริมาณรังสีที่แตกต่างกันด้วย คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ

6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด ซึ่งผ่านการวัลคาไนซ์ ด้วยรังสีแกมมาและแสงซินโครตรอนมีคุณภาพที่ดีขึ้น
2. ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ ในการใช้แสงซินโครตรอน เพื่อกระบวนการวัลคาไนเซชันของน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด
3. ทำให้ทราบถึงสารเซนซิไทเซอร์ที่เหมาะสมกับน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับรังสี

2.1.1 แหล่งกำเนิดรังสีและชนิดของรังสี

รังสี (Radiation) หมายถึง อนุภาคหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยจากไอโซโทปกัมมันตรังสีหรือมาจากแหล่งกำเนิดอื่น ๆ รังสีที่ใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมจะเป็นรังสีพลังงานสูง หรือรังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ ซึ่งอาจเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วโดยมีพลังงานเพียงพอที่ทำให้อะตอมแตกตัวเป็นไอออนได้ โดยทั่วไปแล้วรังสีพลังงานสูงที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้แก่ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง และนิวตรอน

2.1.1.1 รังสีเอกซ์ (X-ray) รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงที่มองเห็นได้ รังสีเอกซ์อาจเกิดจาก

2.1.1.1.1 ไอโซโทปกัมมันตรังสี เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุใดธาตุหนึ่งและมีการสลายตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ในการสลายตัวนี้อาจมีหลายขั้นตอนและมีบางขั้นตอนที่คายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีความถี่สูงรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถนำไปกระตุ้นสารตัวอย่างได้ ตัวอย่างเช่น ^{55}Fe ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีจะสลายตัวเป็น ^{55}Mn โดยผ่านการสลายตัวที่เรียกว่า การจับอิเล็กตรอน (electron capture, EC) และมีการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงาน 5.9 keV

ส่วนกรณีที่นิวเคลียสคายพลังงานออกมาในย่านรังสีแกมมา รังสีแกมมาอาจไม่ผ่านออกมาภายนอกอะตอมได้ โดยจะเกิดปรากฏการณ์ใหม่อีกลักษณะหนึ่ง คือ รังสีแกมมาที่ถูกปล่อยออกมาจากนิวเคลียสนั้นไปชนหรือกระตุ้นอิเล็กตรอนแทน และถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนนั้นก็จะมีพลังงานสูงขึ้นทันที จนสามารถหลุดออกเป็นอิสระออกจากอะตอมพร้อมกับมีพลังงานจลน์ติดไปด้วยจำนวนหนึ่ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การสลายตัวแบบการเปลี่ยนแปลงภายใน (Internal conversion, IC)

2.1.1.1.2 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์ที่เกิดจากหลอดกำเนิดนี้ได้จากการเร่งอิเล็กตรอน (จากขั้วคาโทด) ที่มีความเร็วสูงมากวิ่งเข้าชนเป้า (หรือขั้วแอโนด) ทำให้เกิดปรากฏการณ์ 2 ชนิด คือ

ก. อิเล็กตรอนสูญเสียความเร็วขณะที่ชนเป้า เนื่องจากมีปฏิกริยาในเชิงผลกกันระหว่างอิเล็กตรอนที่กำลังเคลื่อนที่กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้า จึงมีการสูญเสียพลังงานออกไปในช่วงรังสีเอ็กซ์ แต่การสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นไปแบบสุ่ม(random) พลังงานของรังสีเอ็กซ์จึงมีพลังงานต่อเนื่อง โดยมีพลังงานสูงสุดเท่ากับพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

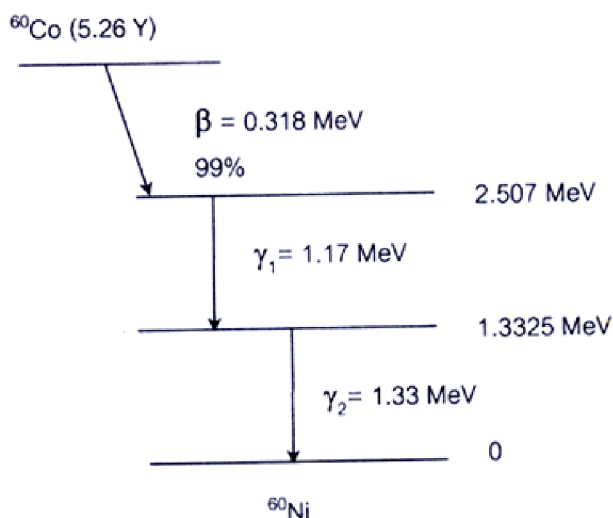
ข. เมื่ออิเล็กตรอนชนเข้าไอออนจะไปชนอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้าด้วยถ้าอิเล็กตรอนที่ชนมีพลังงานมากพอและหลุดออกไปจากอะตอมทำให้เกิดที่ว่างซึ่งอิเล็กตรอนในออร์บิทัลอื่น ๆ (ของอะตอมเดียวกัน) จะลงมาแทนที่โดยมีการคายพลังงานออกมาด้วยเป็นรังสีเอ็กซ์ ที่มีพลังงานเฉพาะตัวค่าใดค่าหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่นำมาใช้ทำเป้า

2.1.1.2 รังสีแกมมา (Gamma Ray) ใช้สัญลักษณ์ γ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก ปกติจะมีในธรรมชาติเหมือนรังสีเอ็กซ์ ใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านพอลิเมอร์ ทางการแพทย์รังสีอาหารและกระบวนการผลิตเครื่องมือแพทย์ปลอดเชื้อ เป็นต้น รังสีแกมมาเกิดจากการแผ่รังสีออกจากนิวเคลียสของไอโซโทปรังสีที่มีในธรรมชาติ หรือไอโซโทปที่สังเคราะห์ขึ้นก็ได้โดยมีอำนาจทำให้เกิดการแตกตัวน้อย แต่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง

การสลายตัวโดยการคายรังสีแกมมา นิวไคลด์บางชนิดอาจมีจำนวนโปรตรอนและนิวตรอนพอเหมาะแล้ว แต่นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้น ซึ่งต้องปรับตัวลงมาสู่สภาวะพื้นโดยการคายพลังงานส่วนเกินออกมาจากนิวเคลียส พลังงานที่คายออกมานี้จะมีค่าสูงมากอยู่ในย่านรังสีแกมมา การสลายตัวโดยวิธีนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนโปรตรอนนิวตรอนหรืออิเล็กตรอนแต่อย่างใด

การคายรังสีแกมมานี้อาจเป็นช่วงเดียวหรือหลายช่วงก็ได้ ถ้าเป็นแบบหลายช่วงแสดงว่าจะต้องผ่านสภาวะกระตุ้นอื่นๆ อีกหลายสภาวะ ถ้าสภาวะกระตุ้นเหล่านี้มีช่วงชีวิตยาวพอที่จะวัดได้การคายรังสีแกมมาระหว่างช่วงย่อยเหล่านี้เรียกว่า ไอโซเมอร์ก ทรานซิชัน (isomeric transition)

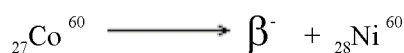
ปกติไอโซโทปรังสีจะสลายตัวให้รังสีแกมมาที่มีพลังงานเฉพาะตัวที่แน่นอน ซึ่งขึ้นกับชนิดของไอโซโทปนั้นๆ เช่น ^{60}Co มีครึ่งชีวิต 5.3 ปี จะให้พลังงานออกมา 2 ค่า คือ 1.17 และ 1.33 MeV เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แสดงผังการสลายตัวของสาร ${}_{27}\text{Co}^{60}$ แล้วสลายตัวให้รังสีบีตา พลังงาน 0.318 MeV และรังสีแกมมา พลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV

(http://www.oaep.go.th/thai-atom/atom/data12_01.html)

โดยสมการการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีที่ให้รังสีแกมมา เป็นดังนี้



(<http://www2.egat.co.th/ned>)

2.1.1.3 อิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง อิเล็กตรอนพลังงานสูงจากเครื่องเร่งลำอิเล็กตรอน ให้มีพลังงานสูงตั้งแต่ 0.5 – 10 MeV หรือมากกว่า นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมและทางการแพทย์

เครื่องเร่งลำอิเล็กตรอนมีหลายแบบ แต่แบบที่นิยมใช้ทางอุตสาหกรรมมีเพียง 2 แบบ คือ แบบกระแสตรง (DC-accelerator) และแบบแนวตรง (linear electron accelerator, LINAC)

2.1.1.3.1 แบบกระแสตรงให้พลังงานต่ำระหว่าง 0.1 – 0.5 MeV เหมาะสำหรับใช้งานที่ผิววัสดุ เนื่องจากมีอำนาจทะลุทะลวงต่ำมากเพียงไม่เกิน 3 mm. เท่านั้น ตัวอย่างเช่น การอบสารเคลือบผิววัสดุและการพิมพ์ เป็นต้น กรณีที่ให้พลังงานปานกลางระหว่าง 0.5 – 5 MeV ตัวเครื่องจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เหมาะสำหรับปรับปรุงคุณภาพวัสดุ เช่น การตรวจสอบสีของพลาสติก ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า การวัดคาบครึ่งน้ำยาง เป็นต้น

2.1.1.3.2 แบบแนวตรง ให้พลังงานอิเล็กตรอนพลังงานสูงในระดับ 5 – 10 MeV สามารถใช้ได้กับงานผลิตเวชภัณฑ์ปลอดเชื้อที่ต้องใช้อำนาจทะลุทะลวงสูง และงานวิจัยทางนิวเคลียร์ฟิสิกส์ เช่น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของอัญมณี เป็นต้น แต่ไม่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมเพราะค่าใช้จ่ายสูง

2.1.1.4 นิวตรอน อนุภาคนิวตรอนเป็นส่วนประกอบที่อยู่ในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุต่าง ๆ จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากอนุภาคนิวตรอนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น การผลิตไอโซโทปรังสีเพื่อใช้ในโรงพยาบาล หรือโรงงานอุตสาหกรรม

ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

2.1.1.4.1 spontaneous fission : ไอโซโทปที่มีการแตกตัวของนิวเคลียสตามธรรมชาติพร้อมกับการให้นิวตรอนออกมา เช่น ^{252}Cf ให้นิวตรอนออกมาโดยเฉลี่ย 3.76 ตัวต่อการแตกตัวของนิวเคลียส 1 ครั้ง มีอัตราการส่งออกนิวตรอนเป็นจำนวน 2.34×10^{12} นิวตรอน/วินาที/กรัม พลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนที่ออกมาเป็น 2.14 MeV

2.1.1.4.2 $[\gamma, n]$: ไอโซโทปที่สลายตัวให้รังสีแกมมา มีเพียงชนิดเดียวคือ ^{124}Sb ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1.691 MeV และ 2.091 MeV รังสีแกมมาดังกล่าวทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ $[\gamma, n]$ กับนิวเคลียสของธาตุเบอริลเลียม (Be) จะให้นิวตรอนออกมาด้วยพลังงาน 24 MeV

2.1.1.4.3 $[\alpha, n]$: ไอโซโทปที่สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา ให้นิวตรอนออกมาเมื่อทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ $[\alpha, n]$ โดยมากใช้นิวเคลียสของธาตุเบอริลเลียม เป็นเป้าหมายเนื่องจากให้ปริมาณนิวตรอนออกมาสูงที่สุดถึง 80 นิวตรอนต่อจำนวนที่วิ่งเข้าไป 1 ล้านตัว

2.1.1.5 แสงซินโครตรอน เมื่ออนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจะมีการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา เช่น อนุภาคอิเล็กตรอนหรืออนุภาคโพสิตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าแสงซินโครตรอน ซึ่งเป็นแสงที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง ทำให้กลายเป็นอุปกรณ์สำคัญที่สามารถนำไปใช้ในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งมีคุณสมบัติดังกล่าวคือ

2.1.1.5.1 มีสเปกตรัมที่ต่อเนื่อง (continuous spectrum) : แสงซินโครตรอนถูกปลดปล่อยออกมาในย่านพลังงานต่อเนื่องตั้งแต่ย่าน infrared จนถึง X-ray และโดยการให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์พิเศษที่เรียกว่า undulator สเปกตรัมของแสงซินโครตรอนที่

ได้จะมีลักษณะที่ประกอบด้วยชุดของแถบแสงที่มีย่านพลังงานแคบๆ ซึ่งเมื่อเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กพลังงานของแถบแสงซินโครตรอนจะเปลี่ยนอย่างต่อเนื่อง

2.1.1.5.2. มีความเข้มสูง (high intensity) : แสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีความเข้มสูง โดยเฉพาะแสงจาก undulator ซึ่งมีความเข้มสูงกว่าแสงจาก bending magnet ถึงระดับหมื่นหรือแสนเท่า

2.1.1.5.3. มีความคมสูงมาก (highly collimated) : แสงซินโครตรอนถูกปลดปล่อยออกมาเป็นลำกรวยเล็กๆ ในแนวสัมผัสกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยการมีขนาดลำแสงเล็กประกอบกับการมีความเข้มสูงทำให้แสงซินโครตรอนมี brilliance สูงมาก ในกรณีของ undulator นั้น แนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคถูกจำกัดอยู่ในบริเวณแคบๆ บริเวณแกนของ undulator ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดของแสงซินโครตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาในแต่ละจุดซึ่งทำให้ brilliance ยิ่งทวีค่าสูงขึ้น

2.1.1.5.4. มีลักษณะเป็นพัลส์ (pulse) : แสงซินโครตรอนถูกปลดปล่อยออกมาในลักษณะเป็นพัลส์สั้นๆ น้อยกว่าหนึ่งในล้านล้านของวินาที ดังนั้นเมื่อแสงซินโครตรอนถูกใช้ในการทดลองที่ระบบการตรวจวัดมีความละเอียดในการวัดช่วงต่ำ (low time resolution) ความเข้มแสงซินโครตรอนจึงมีลักษณะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

2.1.1.5.5. เป็นแสงที่รู้คุณสมบัติเชิงปริมาณ (brilliance) : ของสเปกตรัมแสงซินโครตรอนนั้นสามารถรู้ค่าได้แน่นอน โดยการคำนวณทางทฤษฎี แสงซินโครตรอนจึงสามารถนำมาใช้ในการทดลองโดยมีค่าความเข้มที่มาตรฐานตลอดย่านพลังงานที่ได้

2.1.1.5.6. เป็นแสงโพลาไรซ์ (polarized light) : แสงซินโครตรอนจาก bending magnet เป็นแสงโพลาไรซ์แบบระนาบที่มีทิศทางของสนามไฟฟ้า ขนานกับระนาบของแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค และโดยการใช้อุปกรณ์ เช่น helical undulator ทั้งยังสามารถผลิตแสงซินโครตรอนที่มี circular polarization ได้

2.1.1.5.7. เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีการปนเปื้อนต่ำ (clean environment) : เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนทำงานในระบบที่เกือบเป็นสุญญากาศ (ความดันประมาณ 10^{-10} Torr) ทำให้แสงที่ได้มีการปนเปื้อนจากรังสีอื่นๆ ที่ไม่ต้องการน้อยมาก คุณสมบัติข้างต้นดังกล่าวทำให้แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงสำคัญที่มีลักษณะพิเศษ หลายอย่างเหนือกว่าแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในห้องทดลองทั่วไป เช่น halogen lamps, plasma sources และ lasers ยิ่งไปกว่านั้น โดยการเร่งอนุภาคแบบ periodic โดยใช้สนามแม่เหล็กแบบ periodic magnets ของ undulator และ wiggler ยังสามารถผลิตแสงที่มีความเข้มสูงขึ้น และมีคุณสมบัติเฉพาะตามที่ต้องการ (<http://nsrc.sut.ac.th>)

2.1.2 โครงสร้างระบบลำเลียงแสง BL-6 (X-ray Lithography, XRL)

BL-6 เป็นระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ สำหรับกระบวนการประดิษฐ์โครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (high-aspect-ratio micromachining) และการอาบรังสีวัสดุ (material X-Ray exposure) แสงซินโครตรอนที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนพลังงานสูง ณ บริเวณแม่เหล็กไฟฟ้า BM-6 ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ถูกลำเลียงไปใช้งานที่สถานีอาบรังสี (Exposure Station) โดยระบบลำเลียงแสง BL-6 การลำเลียงแสงเพื่อนำออกมาใช้งานดังกล่าว มีข้อพิจารณาสามประการคือ

1. ตามปกติแล้วการอาบรังสีเอ็กซ์ลงบนวัสดุจะดำเนินการในบรรยากาศ ซึ่งมีความดันย่าน $10^{-2} - 10^{-4}$ torr แต่เนื่องจากบรรยากาศภายในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน มีความดันเพียง $10^{-9} - 10^{-11}$ torr ดังนั้นระบบลำเลียงแสงที่ใช้จะต้องมีส่วนที่แยกบรรยากาศที่แตกต่างกันมากดังกล่าวออกจากกัน

2. เนื่องจากแสงที่กำเนิดจากแม่เหล็ก BM-6 มีความยาวคลื่นในย่านกว้าง ดังนั้นจึงต้องทำการกรองแสงให้เฉพาะที่มีความยาวคลื่นในย่านที่ต้องการ ผ่านออกไปยังสถานีอาบรังสีได้

3. ลำแสงซินโครตรอนมีลักษณะเป็นแถบแบน ดังนั้นจึงต้องมีกลไกขับเคลื่อนวัสดุหรือชิ้นงาน ให้เคลื่อนที่ตัดผ่านแถบแสง จึงจะสามารถอาบรังสีเอ็กซ์ในบริเวณกว้างได้

โครงสร้างของระบบลำเลียงแสง BL-6 ได้รับการออกแบบโดยคำนึงถึงข้อพิจารณาสามประการข้างต้น ซึ่งแบ่งออกเป็นสามส่วนได้แก่ ระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า (Front-end) ระบบลำเลียงแสงใน โถงทดลองและระบบขับเคลื่อนชิ้นงาน (X-Ray scanner)

2.1.2.1 ระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า

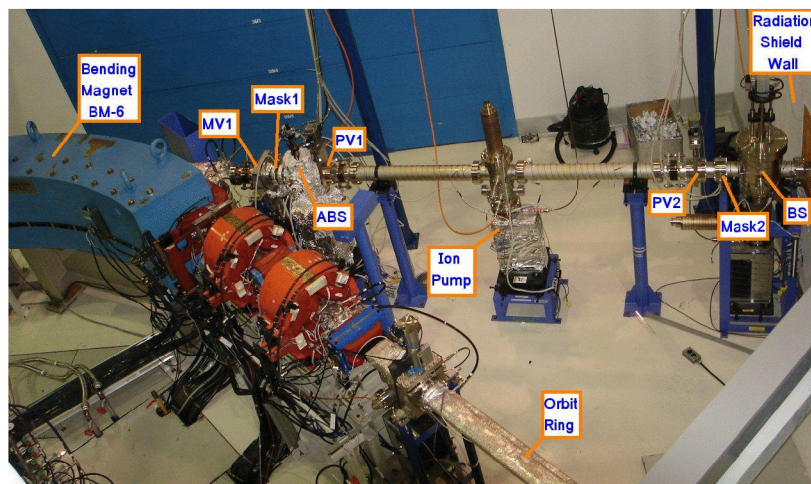
มีหน้าที่หลักในการเปิดและปิดการลำเลียงแสงซินโครตรอนจากแหล่งกำเนิด ออกไปยังโถงทดลอง นอกจากนี้ยังเป็นส่วนที่กำหนดขนาดและรูปร่างของลำแสงด้วย

2.1.2.2 ระบบลำเลียงแสงในโถงทดลอง

ทำหน้าที่แยกบรรยากาศซึ่งมีความดัน $10^{-9} - 10^{-11}$ torr ออกจากบรรยากาศซึ่งมีความดัน $10^{-2} - 10^{-4}$ torr และกรองแสงในย่านความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออกไปโดยใช้ฟลิก Be ที่มีความหนา 100 ไมโครเมตรเป็นฟิลเตอร์ ซึ่งจะยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1.24 nm (ย่านรังสีเอ็กซ์สั้น) ไป ซึ่งมีค่าพลังงานประมาณ 1-10 keV เดินทางผ่านไปยังสถานีอาบรังสีได้

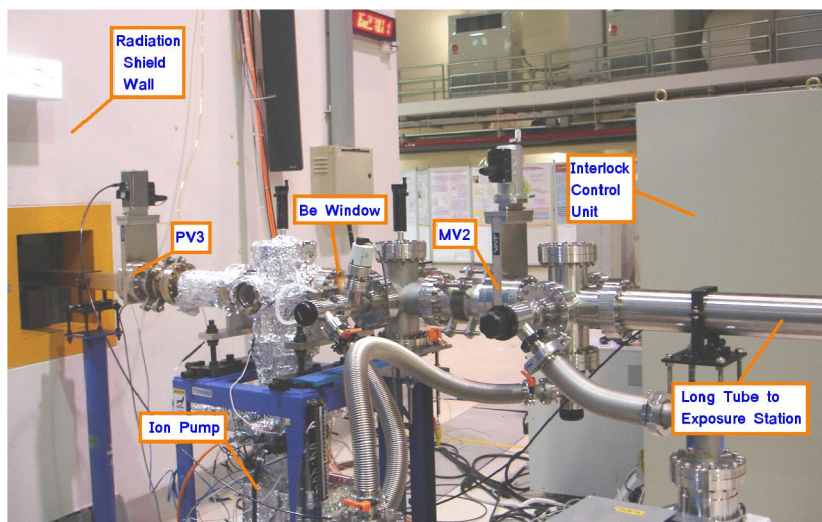
2.1.2.3 ระบบขับเคลื่อนชิ้นงาน

ใช้สำหรับจับยึดชิ้นงานและขับเคลื่อนชิ้นงานให้ตัดผ่านแถบแบนของแสงซินโครตรอน เพื่อให้มีพื้นที่อาบรังสีเพิ่มมากขึ้น



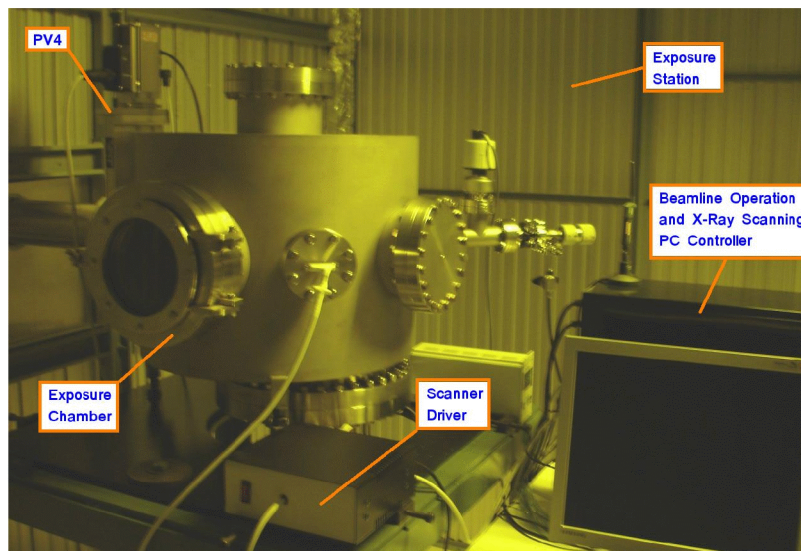
รูปที่ 2.2 ระบบลำแสง BL-6 ส่วนหน้า (ภายในกำแพงกันรังสี)

(<http://www.slri.or.th>)



รูปที่ 2.3 ระบบลำแสง BL-6 ในอุโมงค์ลอด

(<http://www.slri.or.th>)



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ภายในสถานีออบรังสี (<http://www.slri.or.th>)

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ในระบบลำแสง BL-6 (<http://www.slri.or.th>)

อุปกรณ์	ตำแหน่ง	หน้าที่
Bending Magnet (BM-6)	แทรกใน Orbit Ring	บังคับให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่โคจรใน Orbit Ring เลี้ยวเบน และกำเนิดแสงซินโครตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นในย่านกว้างออกมา
Manual Valve 1 (MV1)	ระหว่าง BM-6 และ Mask1	แยกระบบลำแสงออกจาก Orbit Ring ในกรณีทำการซ่อมบำรุง ตามปกติจะเปิดไว้ตลอดเวลา
Photon Mask 1 (Mask1)	ระหว่าง MV1 และ ABS	ใช้กำหนดขนาดของลำแสงซินโครตรอนที่แผ่ออกมาจากแม่เหล็ก BM-6 ในมุมกว้าง เพื่อป้องกันไม่ให้ท่อลำแสงถูกชนด้วยลำแสง
Heat Absorber (ABS)	ระหว่าง Mask1 และ PV1	ใช้ปิดกั้นลำแสงไม่ให้ผ่านเข้าไปในระบบลำแสง ซึ่งจะเกิดความร้อนขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องทำการหล่อเย็นอย่างต่อเนื่อง
Pneumatic Valve 1 (PV1)	ระหว่าง ABS และ Ion Pump	วาล์วสุญญากาศควบคุมการเปิด-ปิดด้วยแรงดันอากาศ ใช้แยกระบบลำแสงส่วน ABS ออกจากส่วนลำแสงถัดไป

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ในระบบลำเลียงแสง BL-6 (<http://www.sri.or.th>) ต่อ

อุปกรณ์	ตำแหน่ง	หน้าที่
Ion Pump	ระหว่าง PV1 และ PV2	ใช้สร้างสุญญากาศระดับความดัน 10^{-9} - 10^{-11} torr ภายในระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า
Pneumatic Valve 2 (PV2)	ระหว่าง Ion Pump และ Mask2	วาล์วสุญญากาศควบคุมการเปิด-ปิดด้วยแรงดันอากาศ ใช้แยกระบบลำเลียงส่วน Ion Pump ออกจากส่วนลำเลียงถัดไป
Photon Mask 2 (Mask2)	ระหว่าง PV2 และ BS	ใช้กำหนดขนาดของลำแสงซินโครตรอนที่แผ่ออกมาจาก Heat Absorber เพื่อป้องกันไม่ให้ท่อลำเลียงถูกชนด้วยลำแสงในระยะถัดไป
Beam Shutter (BS)	ระหว่าง Mask2 และ Radiation Shield Wall	ใช้ปิดกั้นรังสีทุติยภูมิ ที่แผ่ออกมาจาก Heat Absorber ไม่ให้ผ่านออกไปยังระบบลำเลียงแสงในโถงทดลอง
Radiation Shield Wall	ระหว่าง BS และ PV3	มีหน้าที่กั้นรังสีที่กำเนิดจาก Orbit Ring, แม่เหล็ก BM-6 และระบบลำเลียงแสงส่วนหน้า ไม่ให้ออกมายังโถงทดลอง
Pneumatic Valve 3 (PV3)	ระหว่าง Radiation Shield Wall และ Ion Pump	ใช้แยกระบบลำเลียงแสงส่วนหน้าออกจากระบบลำเลียงแสงในโถงทดลอง
Ion Pump	ระหว่าง PV3 และ Be Window	ใช้สร้างสุญญากาศระดับความดัน 10^{-9} - 10^{-11} torr ภายในระบบลำเลียงแสงในโถงทดลอง ส่วนที่อยู่ระหว่าง PV3 และ Be Window
Be Window	ระหว่าง Ion Pump และ MV2	ใช้แยกระบบลำเลียงแสงในโถงทดลองส่วนความดันสูง (ด้านสถานีออบรังสี) ออกจากส่วนความดันต่ำ (ส่วนหน้า) และใช้กรองแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 1.24 nm ไม่ให้ผ่านออกไปยังห้องออบรังสีเพื่อให้ได้แสงที่นำไปใช้งานอยู่ในย่านรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำขึ้นไป

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ในระบบลำเลียงแสง BL-6 (<http://www.slri.or.th>) ต่อ

อุปกรณ์	ตำแหน่ง	หน้าที่
Manual Valve 2 (MV2)	ระหว่าง Be Window และ Long Tube	ใช้แยก Long Tube ออกจาก Be Window ในกรณีทำการซ่อมบำรุง MV2 ตามปกติจะเปิดไว้ตลอดเวลา
Long Tube	ระหว่าง MV2 และ PV4	เป็นส่วนต่อขยายความยาวของระบบลำเลียงแสง เพื่อให้พื้นที่แสงตกกระทบบนชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้น ความดันภายในระบบลำเลียงแสงส่วนความดันสูงขณะทำการอบรังสีลงบนชิ้นงาน อยู่ในช่วง 10^{-2} - 10^{-4} torr
Interlock Control Rack	บริเวณ ใกล้กับ Be Window	ส่วนควบคุมการทำงานของระบบวาล์วสุญญากาศ ซึ่งจะต้องป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกรั่วไหลเข้าไปใน Orbit Ring ซึ่งจะก่อความเสียหายแก่เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนอย่างร้ายแรง ระบบนี้ควบคุมการทำงานด้วย PLC (programmable logic controller)
Exposure Station	ปลายสุดของ Long Tube	ใช้ควบคุมความสะอาดของอากาศ และควบคุมแสงรอบๆห้องอบรังสี เนื่องจากฝุ่นละอองในอากาศและแสงสีขาวยังจะทำให้ชิ้นงานซึ่งมีลวดลายต้นแบบขนาดเล็กมากและไวต่อแสงสีขาวยเกิดความเสียหายได้ อากาศที่ผ่านเข้าไปยังสถานีอบรังสีจะถูกกรองด้วย HEPA filter ตลอดเวลา ทำให้ความดันอากาศภายในสถานีอบรังสีสูงกว่าภายนอกห้องเล็กน้อย ซึ่งจะป้องกันไม่ให้ฝุ่นละอองในอากาศเล็ดลอดเข้าไปตามช่องประตู
Pneumatic Valve 4 (PV4)	ปลายสุดของ Long Tube ภายใน Exposure Station	ใช้แยก Long Tube ออกจากห้องอบรังสี โดยจะปิดวาล์วตัวนี้ ขณะทำการเปิดฝาห้องอบรังสีเพื่อนำชิ้นงานเข้า-ออก ทำให้ใช้เวลาในการสร้างสุญญากาศสั้นลงเนื่องจากต้องดูดอากาศเฉพาะส่วนที่เป็นห้องอบรังสีเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ในระบบลำเลียงแสง BL-6 (<http://www.slri.or.th>) ต่อ

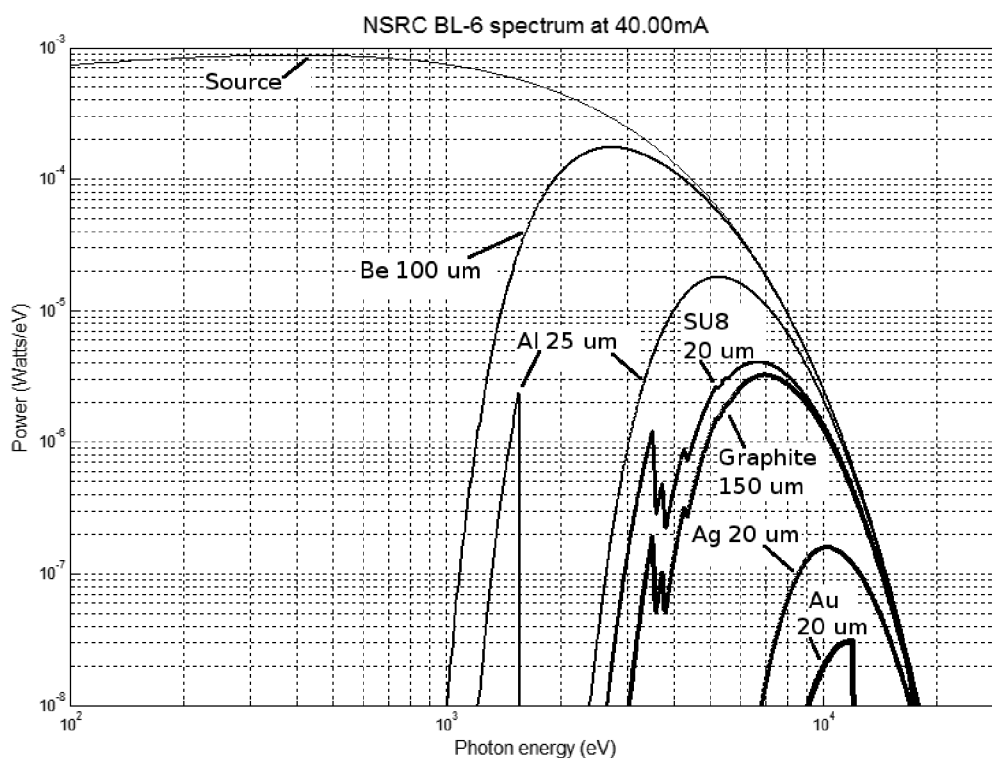
อุปกรณ์	ตำแหน่ง	หน้าที่
Exposure Chamber	ปลายสุดของระบบลำเลียงแสง ถัดจาก PV4	เป็นห้องอาบรังสี ซึ่งบรรจุระบบขับเคลื่อนชิ้นงานให้ตัดผ่านลำแสง เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น
X-Ray Scanner	ภายใน Exposure Chamber	เป็นระบบขับเคลื่อนชิ้นงานให้ตัดผ่านลำแสง เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น โดยทำการขับเคลื่อนให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวตั้งจนกว่าชิ้นงานจะได้รับพลังงานเพียงพอตามความต้องการ
Exposure Control PC	บริเวณใกล้กับ Exposure Chamber	ส่วนควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วสุญญากาศโดยผ่านทาง Interlock Control Rack และควบคุมระบบขับเคลื่อนชิ้นงานโดยผ่านวงจรควบคุมการขับเคลื่อนชิ้นงาน นอกจากนี้ยังใช้บันทึกข้อมูลการอาบรังสีลงบนชิ้นงานอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 สรุปข้อมูลทางเทคนิคของระบบลำเลียงแสง BL-6 (<http://www.slri.or.th>)

Electron energy	1.2 GeV
Bending magnet radius	2.78 m
Bending magnet field strength	1.44 T
Natural emittance	41 nm.rad
Critical photon energy	1.38 keV
Gaussian width at 10-degree port	H: 320 microns V: 47 microns
Opening angle of 100 micron-thick Be window	H: 5.3 mrad V: 1.1 mrad
Transmitted band-pass spectrum	2 keV - 8 keV

ตารางที่ 2.2 สรุปข้อมูลทางเทคนิคของระบบลำเลียงแสง BL-6 (<http://www.sri.or.th>) ต่อ

Source-to-sample distance	17.44 m
Beam size at sample	H: 87.2 mm V: 7.4 mm
Vertical scanning length of sample	100 mm
Opening diameter of circular sample holder	80 mm
Scanning speed	0.8 mm/s
Time duration in which a point on the sample passes through the beam height	9.25 s
Time duration in which the sample travels for 1 cm	0.21 minutes



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของแสงซินโครตรอนจากระบบลำเลียงแสง BL-6
เปรียบเทียบกำลังแสงที่ผ่านชั้นฟิลเตอร์ชนิดต่างๆ (<http://www.sri.or.th>)

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับยางธรรมชาติ

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหน่วยย่อยของแต่ละหน่วยประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรทางเคมีอย่างง่ายคือ C_5H_8 โครงสร้าง 1 โมเลกุลยางประกอบด้วยไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายเส้นตรงแบบซิส (linear cis-1,4 polyisoprene) ประมาณ 3,000 ถึง 5,000 หน่วยไอโซพรีน มีน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 400,000 มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงกว้างมาก (วราภรณ์, 2549) ยางธรรมชาติมีความหนาแน่น เท่ากับ 0.93 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20°C มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ประมาณ -72°C นั้นหมายความว่าหากนำยางธรรมชาติไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -72°C สมบัติของยางธรรมชาติ จะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่น ไปเป็นของแข็งเปราะคล้ายแก้ว (พงษ์ธร, 2547)

2.2.2 ส่วนประกอบต่างๆ ในน้ำยาง

น้ำยาง (latex) มีสภาพเป็นคอลลอยด์หรือสารแขวนลอย (dispersion) ที่ประกอบด้วยส่วนที่กระจัดกระจาย (dispersion phase) ได้แก่ อนุภาคขนาดเล็กๆ ของสารพอลิเมอร์ที่มีขนาด 0.05-5 ไมครอน และส่วนของสารที่เป็นตัวกลาง (dispersion medium) โดยทั่วไปเรียกว่า ซีรัม (serum)

น้ำยางสดมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสถานะเป็นสารคอลลอยด์หรือแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิกรัม มีค่า pH ประมาณ 6.5-7.0 ความหนืดมีค่าประมาณ 12-15 เซนติพอยส์ (centipoise) และอาจมีค่าแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนประกอบในน้ำยาง นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุยาง ฤดูกาล ฤดูแล้ง เป็นต้น น้ำยางสดอยู่ในสภาวะแขวนลอยและมีประจุที่เป็นลบจึงผลักดันตลอดเวลาทำให้คงสภาพอยู่ได้ จนกว่าสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ ที่มารบกวน เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด ซึ่งทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนของน้ำยาง (Blackley, 1997)

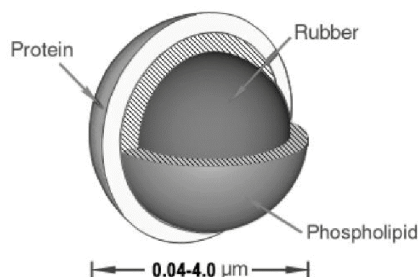
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของน้ำยางสด (Blackley, 1997)

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด(Total Solid Content; TSC)	27 - 48
เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content; DRC)	25 - 45
สารพวกโปรตีน	1 - 1.5
สารพวกเรซิน	1 - 1.25
ขี้เถ้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ100

2.2.3 ส่วนประกอบของน้ำยาง (เสาวนีย์, 2546)

2.2.3.1 ส่วนของเนื้อยาง มีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้ คือ

2.2.3.1.1 อนุภาคยาง ถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมันและโปรตีนโดยโปรตีนจะอยู่ชั้นนอกและอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โปแตสเซียม และทองแดงปะปนอยู่ ปริมาณเล็กน้อยประมาณ 0.5 % โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยในน้ำ ประกอบด้วยสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน มีชื่อโครงสร้างทางเคมีว่า ไอโซพรีน (*cis*-1,4 polyisoprene) มีความหนาแน่น 0.92 กรัมต่อมิลลิลิตร มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000-400,000 กรัมต่อโมล ลักษณะอนุภาคยางเป็นรูปค่อนข้างกลมคล้ายลูกแพร์ มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมากอยู่ระหว่าง 0.04-4 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 2.6 อนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีขนาดไม่เกิน 0.4 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูง พบว่า อนุภาคยางที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำขึ้นมาอยู่ด้านบนซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นน้ำยางชั้น ส่วนอนุภาคยางที่มีขนาดเล็กจะปนอยู่กับหางน้ำยาง (Skim latex)



รูปที่ 2.6 ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ (กนกวรรณ, 2543)

2.2.3.1.2 โปรตีน (Protein) โปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยาง มีอยู่ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำยาง โปรตีนที่อยู่ในน้ำยางส่วนใหญ่เป็นชนิด แอลฟาไกลบูลิน และฮีวิน (α -Globulin และ Hevein) ส่วนนอกสุดของอนุภาคยางมีโปรตีนห่อหุ้มอยู่ประมาณ 1% ของอนุภาคยาง ส่วนใหญ่เป็นพวก แอลฟาไกลบูลิน ซึ่งไม่ละลายในน้ำกลั่นแต่ละลายในกรด ด่าง หรือเกลือ มีค่า Isoelectric point ที่ $\text{pH} = 4.8$ ดังนั้นอนุภาคยางจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็วที่ pH ของแอลฟาไกลบูลินละลายน้อยที่สุด สำหรับโปรตีนที่ห่อหุ้มผิวรอบนอกของอนุภาคยางซึ่งเป็นโปรตีนพวกฮีวิน สามารถละลายในน้ำได้ มีค่า Isoelectric point ที่ $\text{pH} = 4.5$ จะป้องกันอนุภาคยางมารวมตัวกัน ส่วนประกอบของฮีวินมีกำมะถันอยู่ประมาณ 5% และเป็นประเภท crystalline disulphide linkage ดังนั้นขณะที่น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพจะเกิดการบูดเน่าโดยโปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวกไฮโดรซัลไฟด์และสารเมอร์แคปแทนทำให้มีกลิ่นเหม็น

2.2.3.1.3 ไขมัน (Lipid) ไขมันอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟลิปิด ชนิด α -Lecithin ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง น้ำยางในสถานะที่เป็นด่าง เช่น มีแอมโมเนียอยู่ (ประมาณ 0.6% ขึ้นไป) ฟอสโฟลิปิดจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาวซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสบู่ ทำให้น้ำยางมีความเสถียรยิ่งขึ้น แต่กรณีที่มีแอมโมเนียปริมาณน้อย (ประมาณ 0.2% ในน้ำยาง) การไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นน้อย การเพิ่มความเสถียรของน้ำยางจึงจำเป็นต้องเพิ่มสบู่หรือสารอื่นที่ช่วยในการเก็บรักษาน้ำยางเพิ่มลงไป

2.2.3.2 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง มีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้ คือ

2.2.3.2.1 ส่วนที่เป็นน้ำหรือเซรัม เซรัมของน้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อมิลลิเมตร ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ คาร์โบไฮเดรตเป็นสารพวกแป้งและน้ำตาล มีอยู่ในน้ำยางประมาณ 1% น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิดคิวบาชิทอล (Quebrachitol)

2.2.3.2.2 โปรตีนและกรดอะมิโน เป็นส่วนที่อยู่ในเซรัมของน้ำยาง มีค่า Isoelectric point หลายค่า โปรตีนที่มีค่า Isoelectric point สูงสามารถสลายตัวให้ประจุบวกได้เป็นสาเหตุให้น้ำยางสูญเสียสภาพ

2.2.3.2.3 ส่วนของลูทอยด์และสารอื่นๆ ลูทอยด์ (Lutoids) เป็นอนุภาคที่ค่อนข้างกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5-3 ไมครอน ห่อหุ้มด้วยเยื่อต่างๆ ภายในเยื่อต่างๆ นี้มีทั้งสารละลายและสารที่แขวนลอย มีค่า $\text{pH} = 5.5$ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน โดยมีโปรตีนที่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 3% และมีส่วนของโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 2%

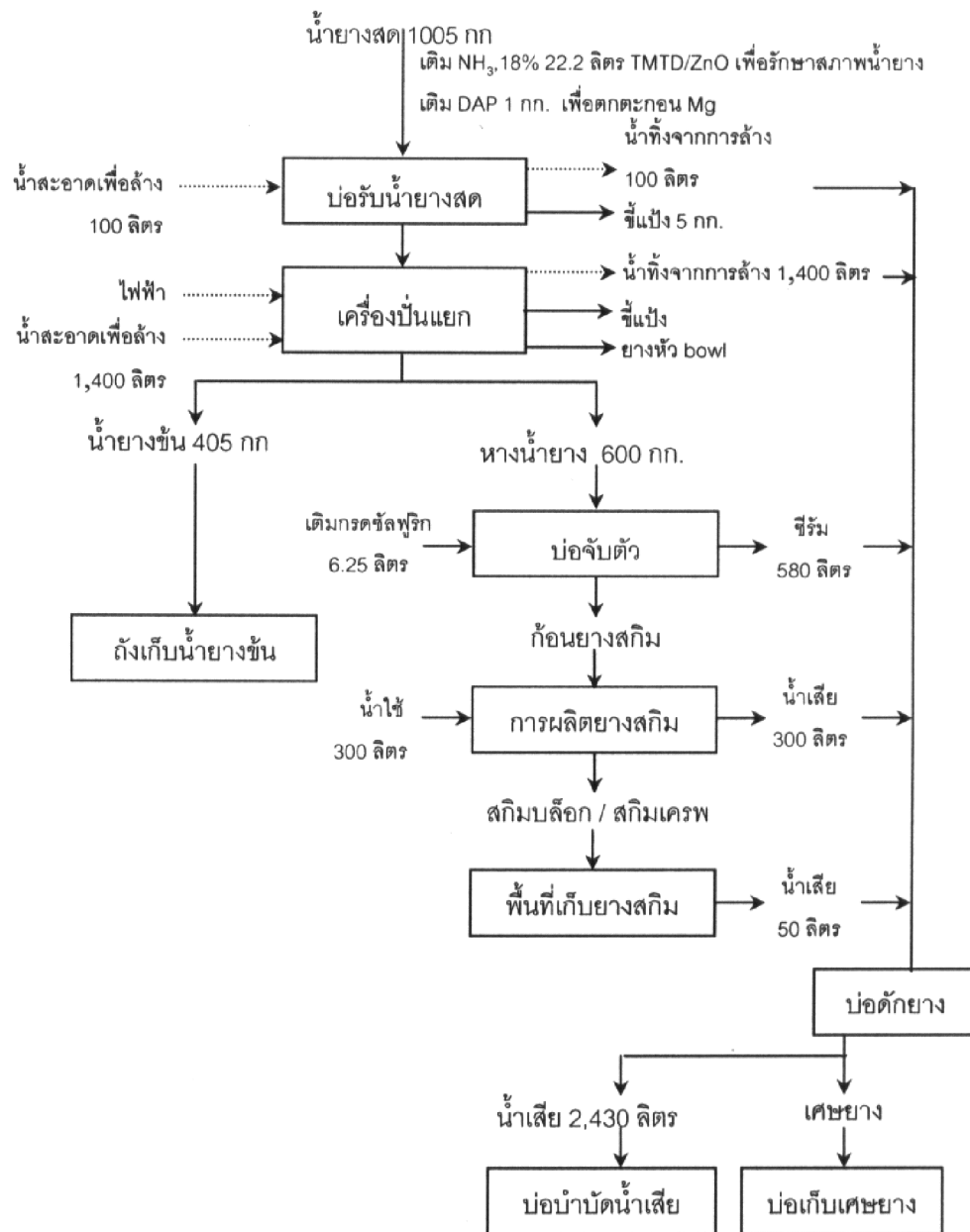
นอกจากนี้ยังมีส่วนของสารพวกฟอสโฟไลปิดแขวนลอยอยู่ประมาณ 0.5 % และมีสารโพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางมีสีเหลืองหรือสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ กุทอยด์ห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อชั้นเดียวสามารถเกิดการออสโมซิสได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยางสดจะทำให้กุทอยด์บวมและแตกง่าย ขณะที่กุทอยด์เกิดการพองตัวมีผลทำให้น้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้นและเมื่อกุทอยด์แตกความหนืดก็จะลดลง หากเติมแอมโมเนียลงในน้ำยางสด พบว่า ส่วนของกุทอยด์และสารพวกโกลหะแมกนีเซียมจะรวมตัวกับแอมโมเนีย เกิดการตกตะกอนเป็นคัมสิ่น้ำตาลและสีม่วงแยกตัวออกจากเนื้อยางและเกาะรวมกันอยู่ด้านล่างสามารถแยกออกได้ สารอื่นๆ โดยมากเป็นอนุภาคเฟรย์-วิสลิง (Frey wysssling) เป็นสารที่ไม่ใช่ยางมีอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีผนังล้อมรอบสองชั้น มีปริมาณไม่มากนัก ประกอบด้วย สารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ ซึ่งทำให้ยางมีสีเหลืองเข้ม สามารถรวมตัวกับแอมโมเนียและแยกตัวออกจากยางมาอยู่ในส่วนของเซรุ่ม

2.2.4 การผลิตน้ำยางข้น (สถาบันวิจัยยาง, 2542)

กระบวนการผลิตน้ำยางข้นได้จากการนำน้ำยางสดที่รักษาสภาพด้วย สารละลายแอมโมเนียหรือสารละลายโซเดียมซัลไฟท์ แล้วนำมาปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง เพื่อแยกน้ำและสารอื่นๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำออกไปบางส่วน จะได้น้ำยางแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. น้ำยางข้น 60% (Concentrated latex) รักษาสภาพด้วย 0.7% สารละลายแอมโมเนียชนิดเข้มข้นหรือ 0.2% สารละลายแอมโมเนียชนิดเจือจาง ร่วมกับสารช่วยรักษาสภาพน้ำยาง
2. หางน้ำยาง (Skim latex) นำมาใส่ NH_3 แล้วเติม H_2SO_4 แล้วผ่านกระบวนการการรีดเคพหรือตัดย่อย เพื่อผลิตเป็นสกิมเคพ หรือ สกิมบล็อก

การผลิตน้ำยางข้นโดยกระบวนการเซนตริฟิวจ์ เป็นวิธีการที่สำคัญที่สุดในการผลิตน้ำยางข้นจากน้ำยางสด เพราะสามารถผลิตได้ในปริมาณมากและผลิตอย่างต่อเนื่องโดยตลอด ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการออกแบบและการพัฒนาเครื่องปั่นแยก (centrifuge) ปริมาณการใช้ทรัพยากร ซึ่งได้แก่น้ำยางสด สารเคมี น้ำ และพลังงาน ตลอดจนของเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)



รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการผลิตน้ำยางข้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

ในการผลิตน้ำยางข้นชนิดต่างๆที่ได้จากกระบวนการปั่นแยก (Centrifuged latex) และ กระบวนการครีมมิ่ง (Creaming process) ได้มีการกำหนดมาตรฐานน้ำยางข้นดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของน้ำยางข้นตามมาตรฐาน ASTM 2005 D1076 : Standard
Specification for Rubber-Concentrated, Ammonia Preserved, Creamed
and Centrifuged Natural Latex (ASTM D1076, 2005)

Properties	Type 1	Type 2	Type 3
Total solids, min,%	61.5	66.0	61.5
Dry rubber content (DRC), min,%	60.0	64.0	60.0
Total solids content minus dry rubber content, max,%	2.0	2.0	2.0
Total alkalinity calculated as ammonia, as % latex	0.60 min	0.55 min	0.29 max
Sludge content, max,%	0.10	0.10	0.10
Coagulum content, max,%	0.050	0.050	0.050
KOH number, max,%	0.80	0.80	0.80
Mechanical stability, s, min	650	650	650
Copper content, max,% of total solids	0.0008	0.0008	0.0008
Manganese content, max,% of total solids	0.0008	0.0008	0.0008
Color on visual inspection	No pronounced blue or grey		
Odor after neutralization with boric acid	No putrefactive odor		

Type 1 Centrifuged natural latex preserved with ammonia only or by formaldehyde followed by ammonia

Type 2 Creamed natural latex preserved with ammonia only or by formaldehyde followed by ammonia

Type 3 Centrifuged natural latex preserved with low ammonia with other necessary Preservative

2.2.5 ชนิดของน้ำยางข้น

น้ำยางข้นชนิดที่ผลิตในประเทศไทย เป็นน้ำยางข้นจากกรรมวิธีการใช้เครื่องปั่น (centrifuge – concentrated latex) ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิดคือ

2.2.5.1 น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia, LA)

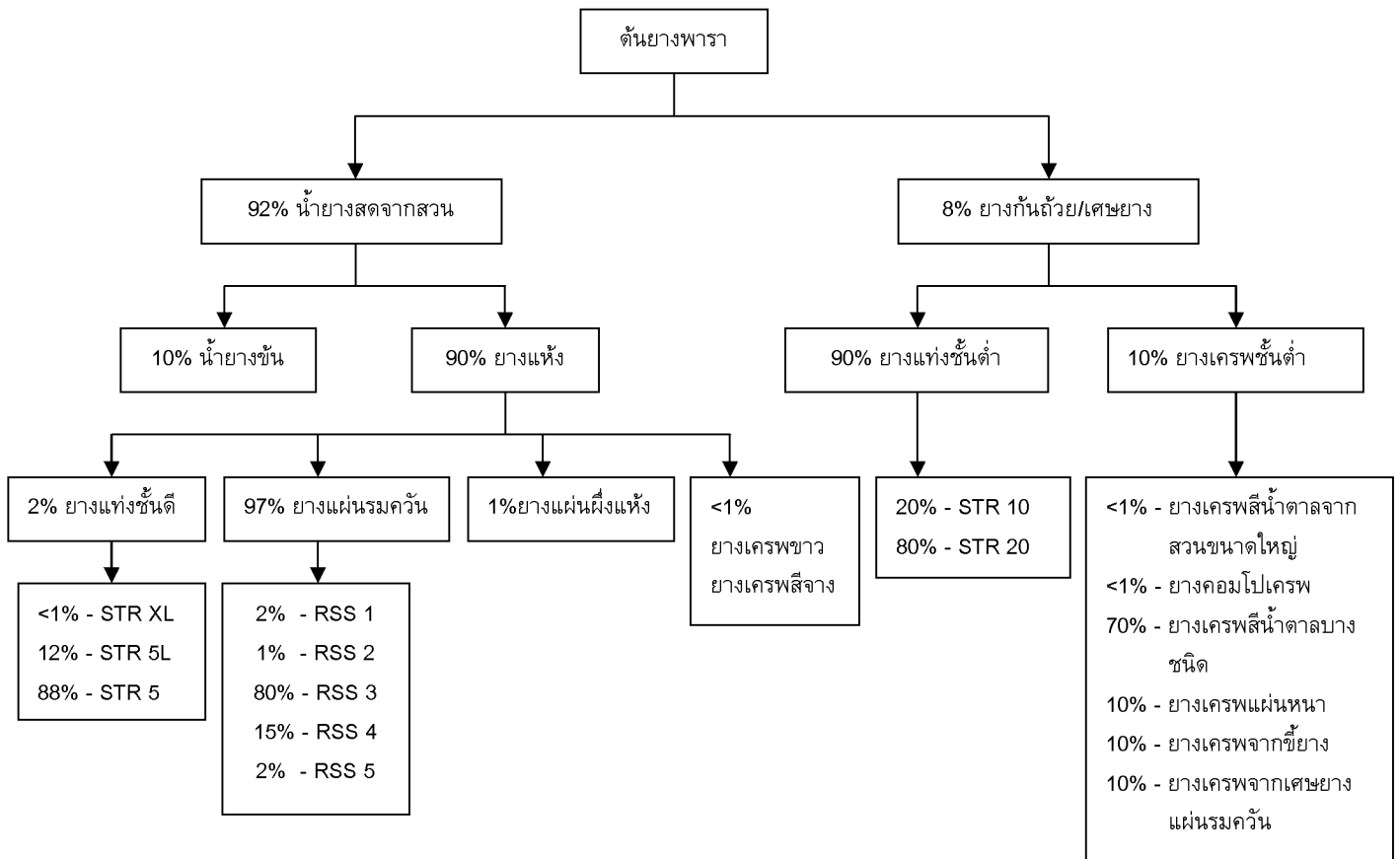
เป็นน้ำยางชั้นที่ใช้สารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย 0.2% ร่วมกับ ทีเอ็มทีดี 0.013% ร่วมกับ ซิงค์ออกไซด์ 0.013% ร่วมกับ กรดลอริก 0.035% ศัพท์วิชาการยางพาราใช้กันว่า LA - TZ ย่อมาจาก Low Ammonia - Tetramethyl - thiuram disulphide/Zinc oxide สำหรับน้ำยางชนิดที่ใช้ปริมาณแอมโมเนียน้อยรักษาสภาพ นอกจากการใช้สารช่วยกลุ่มทีเอ็มทีดี ซิงค์ออกไซด์ และกรดลอริกดังกล่าวข้างต้นแล้ว ผู้ผลิตน้ำยางชั้นประเภทอื่น ๆ ได้มีการใช้สารช่วยกลุ่มอื่นๆ เช่น แซคคีซีร่วมกับกรดลอริก หรือกรดบอริกร่วมกับกรดลอริก เป็นต้น น้ำยางชนิดแอมโมเนียต่ำ ส่วนใหญ่นำไปใช้ในกระบวนการผลิตยางพองน้ำ แต่ทั้งนี้ อายุการเก็บของน้ำยางชนิดนี้จะสั้นกว่าน้ำยางชนิดแอมโมเนียสูง

2.2.5.2 น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia, HA)

เป็นน้ำยางชั้นที่ใช้สารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย 0.7% ร่วมกับกรดลอริก 0.035% น้ำยางชนิดนี้มีข้อดี คือ มีอายุการเก็บน้ำยางได้นานเป็นปี ไม่เสี้ง่าย จึงมักนำไปผลิตถุงมือ ยาง, กาวยาง, ถุงยางอนามัย เป็นต้น ยกเว้นยางพองน้ำ เนื่องจากแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำยางจะไปยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดเจลหรือเกิดฟองในน้ำยางทำให้ได้ฟองน้ำที่ด้อยคุณภาพ

2.2.6 การแปรรูปน้ำยางธรรมชาติ

จากข้อมูลในรูปการแปรรูปยางของข้อมูลวิชาการยางพาราปี 2542 พบว่า น้ำยางที่ได้จากต้นยางพารา 100% จะได้น้ำยางสด 92% อีก 8 % ที่เหลือเป็นยางก้นถ้วยและเศษยาง ซึ่งส่วนใหญ่ประมาณ 90% ใช้ในการผลิตยางแท่งชั้นต่ำ ส่วนที่เหลือจึงผลิตเป็นยางเครพชั้นต่ำ ส่วนน้ำยางสดนั้นจะมีการแปรรูปเป็นยางแท่งถึง 90% โดยส่วนใหญ่ถึง 97% ของยางแท่งเป็นยางแผ่นรมควัน อีก 2%เป็นยางแท่งชั้นดี ซึ่งบางส่วนของยางแผ่นรมควันก็ถูกนำมาแปรรูปใหม่เป็นยางแท่งชั้นดีเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาสัดส่วนการผลิตยางแท่งเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (สถาบันวิจัยยาง, 2542)



รูปที่ 2.8 แผนผังการแปรรูปยางดิบของไทย (สถาบันวิจัยยาง, 2542)

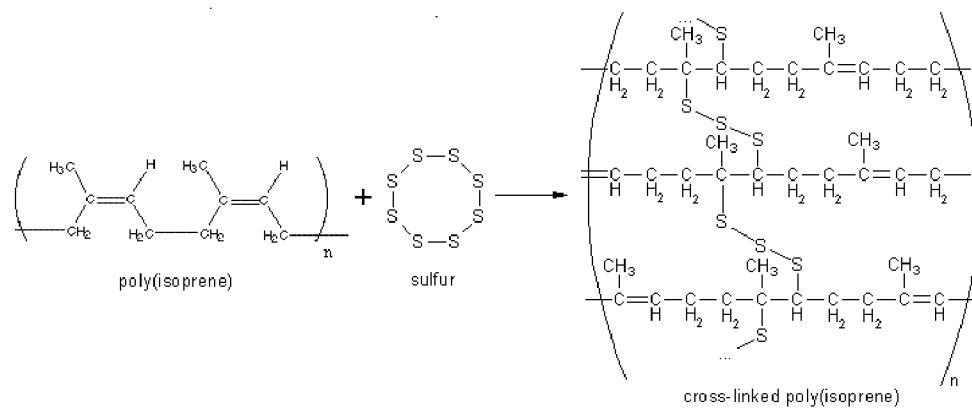
2.2.7 สารเคมีสำหรับยาง (Rubber Additives) (พงษ์ธร, 2548)

2.2.7.1 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางตรงตำแหน่งที่วงวโคต่อปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.9

กำมะถัน เมื่อนำกำมะถันใส่เข้าไปในยางแล้วนำมาให้ความร้อน จะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้นซึ่งจะทำให้ยางมีสมบัติที่ดีขึ้น คือ เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่เหนียว ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น เพราะกำมะถันทำให้โมเลกุลของยางมาเชื่อมต่อกัน ซึ่งการเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุลนี้เรียกว่าการ crosslink การเกิดการเชื่อมโยงในยางจะทำให้โมเลกุลของยางใหญ่ขึ้น ดังนั้นการหลอมเมื่อถูกความร้อนหรือแข็งเมื่อเย็นจึงเป็นไปได้ยาก รวมทั้งการละลายในตัวทำละลายก็เป็นไปได้ยากเช่นกัน จะเป็นเพียงแค่การบวมตัวเท่านั้น การใช้กำมะถันในยางถ้ายังมีปริมาณเพิ่มขึ้นการเชื่อมโยงก็จะมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และสมบัติของยาง เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง(tensile strength) ความแข็ง (hardness) โมดูลัส (modulus) ระยะยืดก่อนขาด (elongation at

break) และความกระด้างตัว (resilience) ของยางก็เปลี่ยนแปลงไปตามการเชื่อมโยงด้วย ในการทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงสามารถทำได้โดยการใช้ กำมะถัน สารตัวเร่ง และสารกระตุ้น

สารที่ให้กำมะถัน (sulfur donor) นอกจากกำมะถันจะใช้เป็นสารวัลคาไนซ์โดยตรงแล้ว สารที่สลายให้กำมะถันที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ ก็สามารถที่จะใช้เป็นสารที่วัลคาไนซ์ยางได้ ตัวอย่าง เช่น di-pentamethylene thiuramtetrasulphide, di-morpholy, benzothiazyl-2-N-dithiomorpholide และ thioplasts เป็นต้น สารให้กำมะถันเมื่อถูกนำมาใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ จะเกิดการวัลคาไนซ์เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล คือ เกิดการเชื่อมโยงแบบ disulfidic (หรือบางที่เป็นแบบ monosulfidic) ในขณะที่ถ้าใช้กำมะถันแบบธรรมดาจะทำให้เกิดการเชื่อมโยง ชนิด polysulfidic ซึ่งจะทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนและมี compression set ที่ดีกว่า การวัลคาไนซ์แบบ di-monosulfidic แต่ยางที่มีการเชื่อมโยงแบบ polysulfidic จะมีสมบัติต้านทานต่อการสึกหรอ และต้านทานต่อการหักงอดีกว่า ดังนั้นการที่จะแก้ไขเพื่อให้ได้ยางที่มีสมบัติที่ดีโดยตลอด จึงควรที่ใช้สารให้กำมะถันพร้อมๆกับการใช้กำมะถันอย่างเดียว



รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยกำมะถัน

การวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถันนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบ ดังนี้

1. ระบบกำมะถันปกติ (Conventional vulcanization system, CV)

เป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุด แต่ในพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอมเรียกการเชื่อมโยงแบบนี้ว่า polysulfidic crosslink การเชื่อมโยงแบบนี้ให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดและสมบัติความต้านทานต่อการฉีก และมีสมบัติในการต้านทานต่อการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่สมบัติการเกิดรีเวอร์ชัน (reversion) ไม่ดี เช่น สมบัติของยางลดลง เมื่ออบอุณหภูมิที่สูงเกินไป หรือยางถูกออกซิไดซ์ ทำให้

ยางเกิดการเชื่อมสภาพ ส่วนสมบัติความต้านทานต่อความร้อน ความต้านทานต่อการเชื่อมสภาพ และสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ของยางธรรมชาติจะดีกว่าระบบอื่นๆ การเกิด crosslink ระหว่างโมเลกุลของยางด้วยกำมะถันและจำนวนอะตอมของกำมะถันที่ใช้ในการ crosslink หนึ่งครั้งนั้นจะแตกต่างกัน ถ้าใช้กำมะถันหนึ่งอะตอมต่อหนึ่ง crosslink จะเรียกว่า monosulphidic crosslink ถ้าใช้กำมะถัน 2 อะตอมต่อหนึ่ง crosslink จะเรียกว่า disulphidic crosslink ถ้าใช้กำมะถันมากกว่าหนึ่งอะตอมต่อการ crosslink นั้นจะเรียกว่า polysulphidic crosslink

2. ระบบประสิทธิภาพ (Efficiency vulcanized system, EV)

เป็นระบบที่มีการปรับปรุงให้มีการใช้กำมะถันอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยการเพิ่มสัดส่วนของสารตัวเร่งต่อกำมะถันให้สูงขึ้น หรือใช้ระบบสารให้กำมะถัน (sulfur donor) โดยแต่ละพันธะเชื่อมโยงที่เกิดจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งอะตอมซึ่งส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 90 เป็น monosulfidic crosslink หรืออาจเป็นการเชื่อมโยงแบบสองอะตอม disulfidic crosslink สารที่ใช้กำมะถันที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ TMTD, TMTM, MBTS, MBT, CBS เป็นต้น ยางคอมปานด์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีกว่าระบบกำมะถันปกติ แต่ยังมี ความต้านทานต่อการเกิด reversion ได้ดี มีความต้านทานต่อความร้อนดี มีความต้านทานต่อการเสื่อมเมื่อถูกออกซิไดซ์และสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ดี

3. ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficiency vulcanized system, semi-EV)

เป็นระบบที่ใช้ปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งอยู่ในปริมาณที่อยู่กึ่งกลางระหว่างการ ใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบกำมะถันปกติและระบบประสิทธิภาพ ทำให้ยางคอมปานด์มีสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อการเชื่อมสภาพอยู่ระหว่างทั้งสองระบบนี้

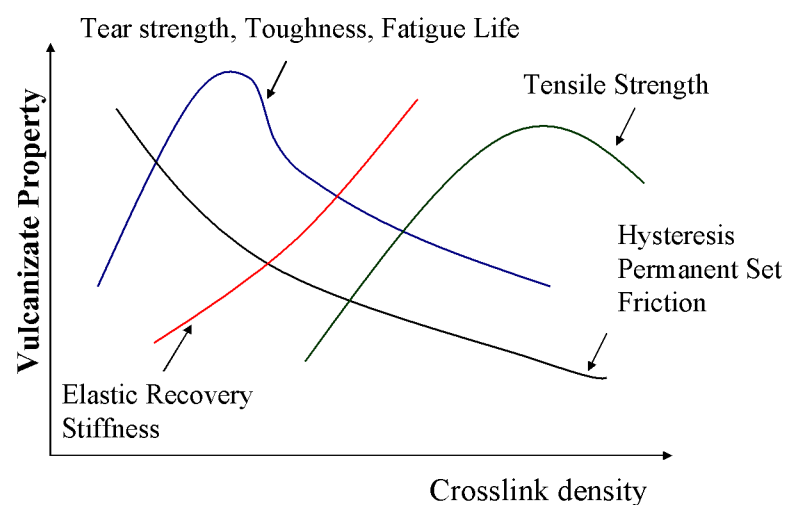
ปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติทั้งสามระบบ สามารถสรุปได้ดังตารางตารางที่ 2.5 ปริมาณพันธะการเชื่อมโยงแบบต่างๆของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ได้ แสดงในตารางที่ 2.6 และอิทธิพลของความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงต่อสมบัติยางวัลคาไนซ์นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.5 แสดงระบบการวัลคาไนซ์ ปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งที่ใช้

ระบบการวัลคาไนซ์	กำมะถัน	สารตัวเร่ง	อัตราส่วนของสารตัวเร่งต่อกำมะถัน
1. ระบบปกติ	2.0-3.5	0.4-1.2	0.1-0.6
2. ระบบเซมิ อีวี	1.0-1.7	1.2-2.5	0.7-2.5
3. ระบบอีวี	0.3-0.8	2.5-6.0	2.5-2.0

ตารางที่ 2.6 แสดงปริมาณพันธะการเชื่อมโยงแบบต่างๆของระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้กำมะถัน และสมบัติของยางธรรมชาติที่ได้ (Morton, 1987:1996)

Cure Systems, Conventional versus Efficient Vulcanization			
	Conventional	Semi-EV	EV
Poly & Di-sulfidic, %	95	50	20
Mono-sulfidic, %	5	50	80
Cyclic sulfide concentration	High	Medium	Low
Low temperature crystallization resistance	High	Medium	Low
Compression set, 22 hr at 70 °C, %	30	20	10



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงต่อสมบัติยางวัลคาไนซ์

2.2.7.2 สารตัวเร่ง (Accelerators)

เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้เร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมโยงเร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กัมมะถันในปริมาณที่น้อยลง ได้แก่ สารเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดช้า ปานกลาง หรือเร็ว เช่น กัวนีนีน (Guanidine), ไธอาโซล (Thiazole), ซัลฟีนามาไมด์ (Sulphenamide), ไธยูเรม (Thiuram)

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มๆ ได้เป็น 6 กลุ่มดังนี้

กลุ่ม ไดไธโอคาร์บามัท (Dithiocarbamate) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) กลุ่มเกลือโซเดียม (sodium salt) และกลุ่มเกลือสังกะสี (zinc salt) สารตัวเร่งกลุ่มนี้จัดอยู่ในพวกสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์สูง จะเร่งให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วมาก โดยกลุ่มเกลือสังกะสีมีการใช้งานในทางการค้ามากที่สุด และสารตัวเร่งกลุ่มนี้มักใช้เป็นสารตัวเร่งสำหรับน้ำยาง อุณหภูมิที่ใช้งานในการวัลคาไนซ์ไม่เกิน 125°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะโปร่งใส ขาว หรือมีสีสันสดใส ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ได้แก่ ZDPC, ZDEC, ZDBC, ZDMC เป็นต้น

กลุ่ม แซนเทท (Zanthate) เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ยางได้เร็วมาก (เร็วกว่ากลุ่มเกลือแอมโมเนียมของไดไธโอคาร์บามัท) ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยาง ไม่นิยมใช้กับยางแห้ง อุณหภูมิที่ใช้งานในการวัลคาไนซ์ประมาณ $80-110^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ได้การวัลคาไนซ์แบบพลาโต (plateau curve) ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ได้แก่ SIX, ZIX, ZBX

กลุ่มซัลฟีนามาไมด์ (Sulphenamide) เป็นสารตัวเร่งที่ delay action หรือให้เวลา สก๊อช นานกว่าไธอาโซล เพราะเมื่อได้รับความร้อน ซัลฟีนามาไมด์จะแตกตัวให้ MBT และเบสออกมา โดยที่ MBT จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ และเบสเป็นตัวกระตุ้นให้สารตัวเร่งทำงานเร็วขึ้น มอดูลัสสูงขึ้น สารกลุ่มนี้ได้แก่ CBS, TBBS, DCBS, Vulcacit AZ เป็นต้น การใช้ซัลฟีนามาไมด์ร่วมกับไดไธโอคาร์บามัทหรือไธยูเรม จะทำให้วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น และจำเป็นต้องมีซิงค์ออกไซด์ อย่างน้อย 3.0 phr และกรดไขมันร่วมด้วยเพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุด ซัลฟีนามาไมด์เป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงมากและมีสมบัติเชิงกลที่ดี รวมทั้งการวัลคาไนซ์แบบพลาโต แต่ซัลฟีนามาไมด์จะเกิดการแตกสลายได้ง่าย เมื่ออยู่ใกล้ความชื้นหรือไอน้ำ ซึ่งจะเร่งให้ยางเกิดการสก๊อชได้ง่ายขึ้น และเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลง

กลุ่มไธอะโซล (Thiazole) เป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ถ้าใช้สารไธอาโซลเป็นสารตัวเร่งเพียงอย่างเดียวแล้วนั้น ยางที่ได้จะมีความปลอดภัยในการผลิตมากกว่า

ใช้สารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงอื่นๆ ตัวอย่าง สารกลุ่มไฮโอโซล ได้แก่ MBTS, MBT, ZMBT, เป็นต้น (โดย MBTS และ MBT ช่วยให้อย่างนี้ลดลงในขณะที่ทำการบดผสมด้วย ส่วน ZMBT มีความเร็วในการวัลคาไนซ์มากกว่า MBTS จึงนิยมใช้กับน้ำยาง) ยางที่ใช้ในสารกลุ่มนี้สามารถวัลคาไนซ์ได้ทุกรูปแบบของการวัลคาไนซ์ โดยเฉพาะเครื่องอัด ถ้าใช้สารกลุ่มนี้ร่วมกับสารตัวเร่งกลุ่มอื่น เช่น ไดโซโอคาร์บามัทและไธยูเรม จะทำให้การวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น การใช้ไฮโอโซลจำเป็นต้องมีซิงค์ออกไซด์และกรดไขมันร่วมด้วย

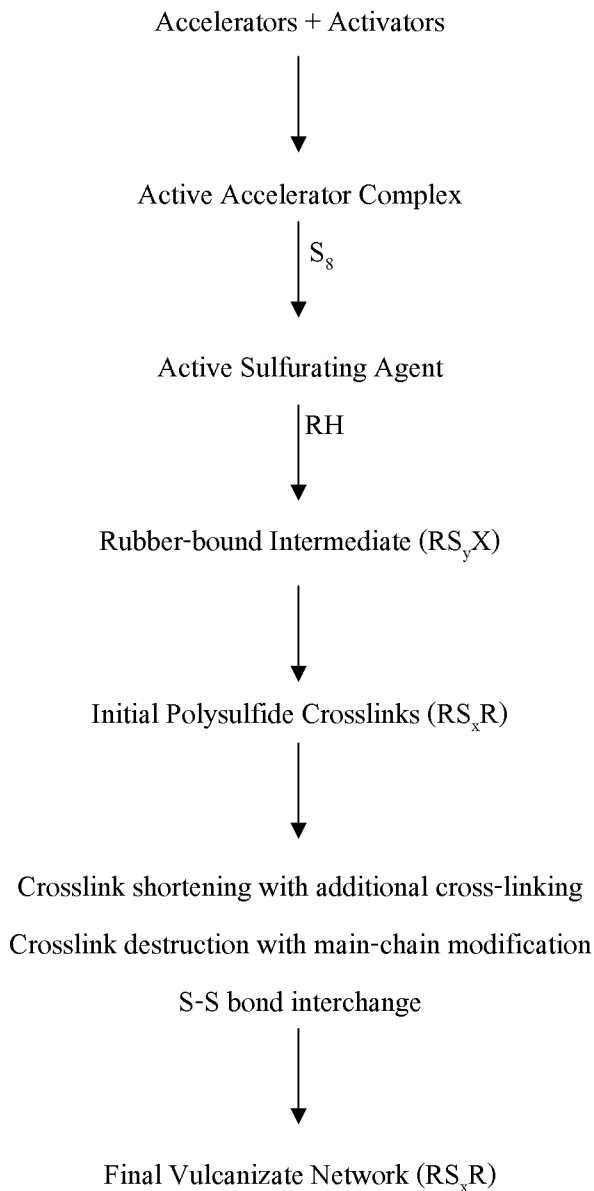
กลุ่ม กัวนิติน เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ได้ช้า มักใช้เป็นสารตัวเร่งเสริม เหมาะที่จะใช้กับยางหนา เพราะต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ที่นาน สารกลุ่มนี้ เช่น DPG, DOTG, ออกตะโททิลไบกัวนิติน (o-totyl biguanidine) เป็นต้น

กลุ่มไธยูเรม(Thiuram) จัดเป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงเป็นพิเศษ ยางจะสก๊อชและวัลคาไนซ์ช้ากว่ากลุ่มไดโซโอคาร์บามัท สารกลุ่มนี้สามารถใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นสารตัวเร่งด้วยตัวเองตามลำพัง โดยไม่ต้องมีกำมะถันก็สามารถวัลคาไนซ์ยางได้เช่นกันที่เรียกว่า thiuram vulcanization แต่ยางที่ได้จะมีค่ามอดูลัสต่ำ หรือใช้ปนกับกำมะถันในปริมาณเล็กน้อย ได้ยางที่มีสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำและทนความร้อน หรือใช้เป็นสารตัวเร่งเสริมเพื่อกระตุ้นสารตัวเร่งอื่น เช่น ใช้คู่กับไฮโอโซลและซัลฟิโนไมด์ เป็นต้น ตัวอย่างสารตัวเร่งกลุ่มนี้ คือ TMTD, TMTM, TETD, DPTS เป็นต้น และสารกลุ่มนี้จำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์กระตุ้นการทำงาน แต่ไม่จำเป็นต้องมีกรดไขมันได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ประมาณ 125-135°C มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่โปร่งใส มีสีขาว หรือสีต่างๆ และใช้กับวัสดุทางการแพทย์

2.2.7.3 สารกระตุ้น (Activator)

คือสารที่ช่วยเสริมให้สารตัวเร่งทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อาจเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์เป็นสารกระตุ้นที่สำคัญ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ส่วนสารกระตุ้นที่เป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญ คือ กรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก กรดลอริก กรดปาล์มิติก เป็นต้น สารกระตุ้นมีบทบาทสำคัญ คือ เมื่อใส่เข้าไปในยางในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงขึ้น และในบางครั้งถ้าไม่มีสารกระตุ้น จะไม่มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารกระตุ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารกระตุ้นเพื่อทำให้ยางวัลคาไนซ์ได้อย่าง

สมมุติปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันจะมีกระบวนการในการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันซึ่งมีสารตัวเร่ง

และสารกระตุ้นรวมอยู่ด้วย (Choi, 2006)

เมื่อ R = rubber chain
H = allylic proton
X = accelerator residue

2.2.7.4 สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agent)

ช่วงอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยาง สามารถเกิดการเสื่อมสภาพขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งสาเหตุของการเสื่อมสภาพของยางเกิดจากการที่โมเลกุลของยางถูกทำให้เปลี่ยนแปลงโดย ออกซิเจนและโอโซน การเสื่อมสภาพเกิดช้ามากถ้าไม่มีตัวเร่ง แต่ธรรมชาติ เช่น แสง ความร้อน ความไม่บริสุทธิ์ของโลหะล้วนเป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ช่วงของการอบยาง (ageing) ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดรอยแตกที่ผิว ผิวแข็งและสูญเสียความแข็งแรง ซึ่งกระบวนการเสื่อมสภาพของยาง สามารถแบ่งได้เป็น 5 แบบคือ

1. การเสื่อมสภาพเนื่องจากการตั้งทิ้งไว้นาน (self ageing)
2. การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (heat ageing)
3. การเสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (light ageing)
4. การเสื่อมสภาพเนื่องจากการหักงอไปมา (flex ageing)
5. เกิดรอยแตกเนื่องจากบรรยากาศ (atmoseric cracking)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้นไปจากเดิม จึงจำเป็นต้องมีสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนตี้ออกซิแดนท์หรือสารแอนตี้อิโซแนนท์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวนาน

2.2.7.5 สารอื่นๆ ได้แก่ สารหน่วง (retarder)

ใช้เพื่อช่วยให้เวลาสท้อชยาวขึ้น แต่เวลาในการวัลคาไนซ์ยังคงเท่าเดิม ในกรณีการขึ้นรูปที่ต้องการให้ยางไหลได้เต็มเบ้าก่อนเกิดการวัลคาไนซ์ สารลดการติดไฟ (flame retarder) เพื่อให้ยางเกิดการติดไฟได้ช้าลงหรือเพื่อไม่ให้ยางติดไฟลุกไหม้เอง และควรดับเมื่อเอาเปลวไฟออก สารที่ทำให้เกิดฟอง (foaming agent) เพื่อใช้ในกรณีที่ต้องการใช้ยางเป็นฟอง สารแต่งสี (pigment) เพื่อให้ยางมีสี

2.2.8 การพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ

หมายถึง การทำให้อนุภาคถูกเชื่อมโยงทางเคมี (chemical cross-linked) ซึ่งเมื่อยางแห้งจะได้แผ่นฟิล์มยางที่เกิดการวัลคาไนซ์โดยไม่ต้องให้ความร้อน วิธีการดังกล่าวให้คำจำกัดความว่า “น้ำยางวัลคาไนซ์แล้ว” หรือชื่อทางสามัญ คือ “น้ำยางพรีวัลคาไนซ์”

2.2.8.1 การวัลคาไนซ์ของแผ่นฟิล์มที่ได้จากน้ำยาง (Vulcanization of Latex Film)

ในอุตสาหกรรมที่ได้จากน้ำยางมีการใส่ส่วนผสมลงไปในน้ำยาง เช่น สารคงตัว ซัลเฟอร์ซิงค์ออกไซด์ สารตัวเร่งหนึ่งตัวหรือมากกว่านั้น และแผ่นฟิล์มยางถูกวัลคาไนซ์ด้วยความร้อน (ปกติที่ 100-140 °C) หรือให้อยู่ในช่วงความร้อนที่ 50-70 °C การคลอสลิงค์จะเกิดขึ้นจนกระทั่งส่วนผสมของน้ำทั้งหมดถูกขจัดออกไปจากยางและยางอยู่ในระยะต่อเนื่อง (continuous phase) ดังนั้นการวัลคาไนซ์เกิดขึ้นเกือบหมดในมวลของยางในระยะนี้ หรือในกรณีที่ 2 เกิดจากการกระทำของสารตัวเร่งและช่วงเวลาของการใช้ความร้อนถูกจัดให้มีดีกรีของการวัลคาไนซ์ซึ่งเกิดขึ้นก่อนที่ยางจะตกตะกอน (prevulcanize) การคลอสลิงค์จะเกิดขึ้นภายในอนุภาคยางแต่ละอนุภาคที่อยู่ในระยะกระจาย (disperse phase) ของน้ำยาง นอกจากนี้การคลอสลิงค์ยังเกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนภายหลังซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากการรวมของอนุภาคยางเข้าด้วยกัน

2.2.8.2 ผลทางโครงสร้างทางฟิสิกส์ในแผ่นฟิล์มน้ำยางพรีวัลคาไนซ์

การคลอสลิงค์ที่เกิดขึ้นในการวัลคาไนซ์น้ำยาง จะมีประสิทธิภาพมากกว่าในยางก้อนที่ต้องมาบด เนื่องจากในน้ำยางมีปลายสายโซ่อิสระ ที่ช่วยทำให้การวัลคาไนซ์แข็งแรงขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มน้ำยางจะช่วยยึดดีกรีของโครงสร้างภายในของเฟสน้ำยางซึ่งอนุภาคยางอยู่ใกล้กัน ใน surface-active interfacial film หรือชั้นที่ประกอบด้วยโปรตีนและฟอสโฟไลปิด ยกเว้นเมื่อมีการเติมสบู่หรือสารคงตัวลงไป ในการระเหยน้ำออก เมื่อแผ่นฟิล์มแห้งโครงสร้างนี้ซึ่งมีโปรตีน (หรือส่วนที่ไม่ใช่ยาง) ปรากฏเป็นร่างแหที่ยึดกันอยู่แผ่กว้างออกไป ซึ่งส่วนนี้จะถูกทำลายอย่างมากเมื่อทำการบดด้วยลูกกลิ้ง

2.2.9 การทำพรีวัลคาไนซ์ (Latex Compounding)

น้ำยางสามารถนำมาใช้โดยตรงกับอุตสาหกรรม หลักของน้ำยาง คือ ต้องเติมส่วนผสมลงไปก่อนที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หรือส่วนประกอบ ช่วงของส่วนที่ใช้ในเทคโนโลยีน้ำยางใช้ได้กว้างกว่าในยางที่เป็นของแข็ง

หลักพื้นฐานของการผสม คือ ให้มีจำนวนของสารเติมน้อยที่สุด เพื่อที่จะเป็นแบบของกระบวนการและสมบัติผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยทั่วไปส่วนผสมน้ำยางส่วนใหญ่ จะประกอบด้วย การเติมสารเคมีดังต่อไปนี้

2.2.9.1 สารเร่งปฏิกิริยารังสีอินทรีย์ หรือสารเซนซิไทเซอร์ (sensitizer)

เหตุผลของการใช้สารเร่งรังสีอินทรีย์ก็เพื่อการลดเวลาหรือลดอุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ยาง และยังเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติให้กับผลผลิตอีกด้วย ในการลดเวลาการวัลคาไนซ์ยางนั้น โดยปกติจะขึ้นอยู่กับปริมาณหรือชนิดของสารที่ใช้ อย่างไรก็ตามหลักการโดยทั่ว ๆ ไปที่ปฏิบัติกัน สรุปได้ดังนี้

1. ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยารังสีอินทรีย์เพียงชนิดเดียว (primary accelerators)

ให้พอเพียงที่จะวัลคาไนซ์ยางตามเวลาที่ต้องการ

2. ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยารังสีอินทรีย์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป

โดยประกอบด้วยชนิดหนึ่งใช้ในปริมาณมาก(primary accelerator) และอีกชนิดหนึ่งใช้ในปริมาณน้อย (secondary accelerator) (10-20% of the total) เพื่อช่วยเสริมและปรับปรุงคุณสมบัติของผลผลิตการใช้ระบบวัลคาไนซ์โดยสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปดังกล่าวนี้จะได้ผลผลิตที่มีคุณสมบัติดีกว่าการใช้ระบบสารใดสารหนึ่งเพียงอย่างเดียว

3. ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยารังสีอินทรีย์ที่มีปฏิกิริยาช้า (delayed action accelerators)

สารประเภทนี้จะไม่เกิดปฏิกิริยาขณะกรรมวิธีก่อนการวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหาการเกิดยางวัลคาไนซ์ก่อนเวลา อย่างไรก็ตามสารดังกล่าวนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยารังสีอินทรีย์เมื่อถึงอุณหภูมิของการวัลคาไนซ์

2.2.10 การวัลคาไนซ์ยาง

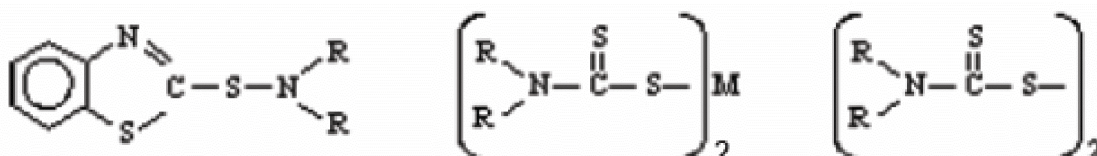
การวัลคาไนซ์ยาง หรือการทำให้ยางคงรูป หมายถึง กระบวนการซึ่งทำให้ได้วัสดุที่มีความยืดหยุ่น (elastic material) อันเนื่องมาจากโครงสร้างของโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงหรือยึดโดยพันธะเคมีระหว่างต่างโมเลกุลกัน ซึ่งในการแปรรูปยางดิบเป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้น จำเป็นจะต้องมีการนำยางมาผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน อันเป็นกระบวนการที่จะเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางจากเส้นตรง (linear) ไปเป็นพันธะเชื่อมโยง (cross-link) เพื่อให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการวัลคาไนเซชันนั้น โมเลกุลของยางจะต้องมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเชื่อมโยง (vulcanizing agent) โดยจะต้องมีการใช้ความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยา และในกระบวนการวัลคาไนเซชันนี้เอง เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาและพลังงานมากในขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งถ้ามีการพัฒนากระบวนการวัลคาไนเซชันให้มีระยะเวลาที่สั้นลง น่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มอัตราเร็วใน

การผลิตผลิตภัณฑ์จากยาง ตลอดจนลดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต อันจะส่งผลให้มีส่วนในการลดต้นทุนการผลิตลง ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีส่วนในการเพิ่มศักยภาพของอุตสาหกรรมในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทยในการแข่งขันกับนานาประเทศมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้เป็นที่ทราบกันดีว่า สมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์นั้นขึ้นกับ สภาวะของกระบวนการวัลคาไนซ์เป็นอย่างมาก ทั้งในเรื่องของ เวลา อุณหภูมิ สูตรของสารเคมีที่ใช้ อัตราเร็วในการเกิดการวัลคาไนซ์ และระบบของการวัลคาไนซ์ที่เลือกใช้ มีงานวิจัยที่พบว่า อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการวัลคาไนซ์ ส่งผลต่อ ชนิดของพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของยาง อันมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ ด้วยปัญหาเรื่องเป็นเวลาและพลังงานนี้ จึงเห็นถึงประโยชน์ของการเพิ่มอัตราเร็วและลดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต

จากเดิมยางธรรมชาติก่อนที่จะสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางจะต้องผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปของยางดิบให้เป็นยางที่รักษารูปร่างได้ มีความยืดหยุ่น (elasticity) หรือความแข็งตึง (stiffness) โดยให้มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยางด้วยกำมะถันหรือสารวัลคาไนซ์อื่น ๆ แม้ว่าการวัลคาไนซ์โดยกำมะถันสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้ความร้อนและความดัน แต่ต้องใช้เวลากการวัลคาไนซ์นาน การเติมสารตัวเร่งในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะทำให้กระบวนการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น ปริมาณของสารตัวเร่งและกำมะถันจะเป็นตัวกำหนดปริมาณและชนิดของพันธะเชื่อมโยง (cross-link) ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (cross-link density) จะขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ระบบการวัลคาไนซ์ ชนิดของสารตัวเร่ง เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ และอัตราส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่ง แต่ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากนี้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมทั่วไป ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ซึ่งมีการเติมสารเร่งปฏิกิริยา (accelerator) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เพื่อทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น สารที่ตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งอาจเป็นสารก่อมะเร็งจำพวกสารประกอบไนโตรซามีน (nitrosamine) และก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง บางรายอาจก่อให้เกิดการแพ้ได้ (Nakamaru, 1989 : 1)

แต่เนื่องจากการวิจัยอย่างกว้างขวางในช่วงปลายปี 1970 พบว่าผลิตภัณฑ์ยาง เช่น จุกนมเด็ก และหัวคุด มีส่วนประกอบของไนโตรซามีนมากถึง 300 ส่วนต่อพันล้าน (ppb) ซึ่งเป็นการนำไปสู่ความพยายามอย่างหนักในอุตสาหกรรมยางที่จะขจัดเอาไนโตรซามีนนี้ออกไป โดยปกติแล้วสารไนโตรซามีนเป็นสารเคมีที่เกิดขึ้นได้ในสิ่งแวดล้อม ในอาหารพวกหมักดอง กะปิ ปลา ร้า กุนเชียง เป็นต้น โดยไนโตรซามีนเกิดจากสารประกอบพวกอะมิโน (amino compound) เช่น ไนไตรท์ (เกิดในสารกันบูด) ไนเตรท (เกิดจากการหมัก) หรือไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (เกิดจากการสพาร์คของประจุของแสง)

สำหรับที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางไนโตรซามีนที่ระเหยได้เกิดขึ้นในระหว่างการวัลคาไนซ์ของยางที่ใช้ซัลเฟอร์และสารตัวเร่งพวกซัลฟิनाไมด์, ไดโซโอคาร์บาเมต, ไทยูแรม ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในเทคโนโลยีน้ำยางธรรมชาติ เนื่องจากให้สมบัติทางกายภาพดี ซึ่งมีโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่

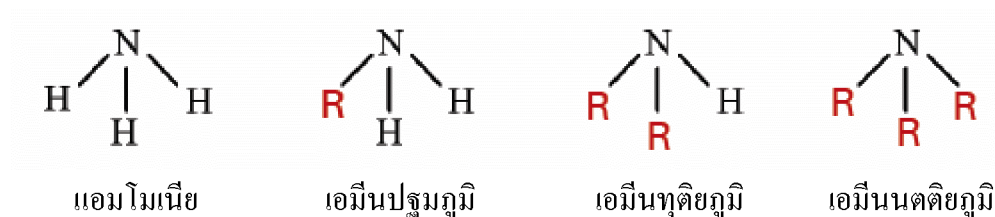


รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของสารตัวเร่งปฏิกิริยาของ

ก. ซัลฟิनाไมด์ ข. ไดโซโอคาร์บาเมต ค. ไทยูแรม

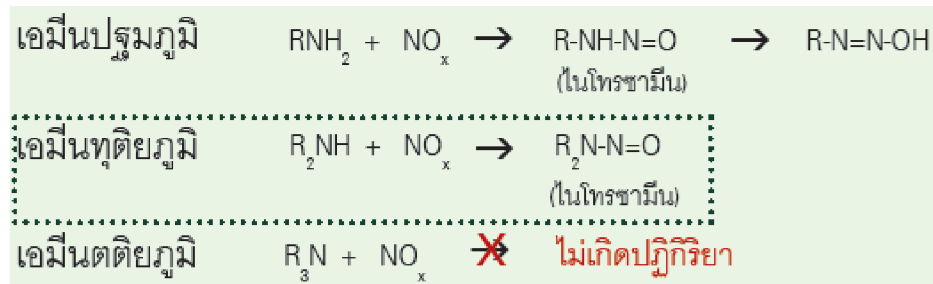
(www.rubbercenter.org/files/nitrosamine.pdf)

ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่ใช้มากที่สุดและเทคโนโลยีน้ำยาง จากการตรวจไม่พบไนโตรซามีน แต่มีไนโตรซาทเทเบิลไดเอทิลลามีน(nitrosatable diethylamine) มากถึง 400 ppb เนื่องจากสารตัวเร่งพวกนี้จะสลายตัวในเอมีนทุติยภูมิ (secondary amine) โครงสร้างทั่ว ๆ ไปของสารประกอบแต่ละประเภทของเอมีน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างสารประกอบแต่ละประเภทของเอมีน

(www.rubbercenter.org/files/nitrosamine.pdf)



รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาระหว่างเอมีนชนิดต่างๆกับไนโตรเจนออกไซด์

(www.rubbercenter.org/files/nitrosamine.pdf)

เยอรมันเป็นประเทศแรกที่กำหนดระดับของไนโตรซามีนในผลิตภัณฑ์น้ำยาง มีผลในวันที่ 1 มกราคม 1982 โดยกำหนดขอบเขตระดับของไนโตรซามีนและ ไนโตรเซทเทเบิลในจุนกนมเด็กและ หัวคูด 10 ppb และ 200 ppb ตามลำดับซึ่งเป็นมาตรฐานโลก (Gorton,1986)

การพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติโดยการใช้ความร้อนแก่น้ำยางที่มีส่วนผสมของออร์แกนิกเปอร์ออกไซด์ (organic peroxide) ได้มีการศึกษามาเป็นเวลาหลายปีแล้ว อย่างไรก็ตามมีการตีพิมพ์เกี่ยวกับเรื่องนี้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพื่อหลีกเลี่ยงการผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัลคาไนซ์น้ำยางด้วยระบบซัลเฟอร์ปกติ(Conventional Sulphur-Vulcanised)ที่มีปัญหาเรื่องการเกิดไนโตรซามีนซึ่งจะมีผลโดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์จำพวกจุนกนมเด็ก อย่างไรก็ตามระบบนี้โดยทั่วไปจะให้ผลในการสุก(Curing) ช้ากว่า ระบบซัลเฟอร์-ไดไซโอคาร์บาเมต

การพรีวัลคาไนซ์ด้วยระบบไฮโดรเปอร์ออกไซด์มีข้อได้เปรียบกว่าระบบพรีวัลไนซ์ด้วยระบบซัลเฟอร์ คือ ไม่เกี่ยวกับการใช้สารตัวเร่งซึ่งเป็นตัวที่ก่อให้เกิดสารที่ทำให้เกิดมะเร็งพวกไนโตรซามีน(Carcinogenic nitrosamines) ซึ่งสารตัวเร่งสามารถทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังได้ (allergenic skin reaction) นอกจากนี้การผลิตน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ด้วยระบบซัลเฟอร์ในทางการค้าซึ่งเตรียมโดยการปฏิกิริยาน้ำยางกับส่วนผสมที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์และสารตัวเร่งตัวเดียว หรือมากกว่า 1 ตัว โดยปกติจะใช้ซิงค์ไดเอทิลไดไซโอคาร์บาเมต(Zincdiethyldithiocarbamate,ZDEC) เป็นตัวเร่งและซิงค์ออกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ในการใช้ซัลเฟอร์เป็นตัววัลคาไนซ์ จะทำให้เกิดซัลเฟอร์อิสระ (free sulphur) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ไม่ใสและเกิดปรากฏการณ์ที่ซัลเฟอร์ซึมออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์(bloom) นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์(ZnO) ที่ใส่เข้าไปในโปดัสเซียมที่ละลายน้ำหรือเกลือโซเดียมจะไม่กระจายแทนที่ซิงค์ที่ละลายน้ำได้ และซิงค์ออกไซด์จะทำให้ความใสของแผ่นฟิล์มและความเสถียรของน้ำยางลดลง ถ้าใช้ที่ 0.2 phr หรือมากกว่านั้น ซึ่งความใสของ

แผ่นฟิล์มมีความสำคัญ ในการประยุกต์นำยางวัลคาไนซ์ไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์พวก จุกนม และถุงยางอนามัย เป็นต้น

นอกจากนี้ในระบบซัลเฟอร์ยังมีปัญหาเรื่องการกระจายตัวของสารเคมีที่ละลายไม่ได้ใน ส่วนผสมน้ำยาง อาจทำให้น้ำยางเกิดเป็นก้อนขึ้นและจะจับตัวจนหมด ดังนั้นสารเคมีที่จะใส่ลงใน น้ำยางจะต้องมีการเตรียมให้ผิวของสารเคมีห่อหุ้มด้วยน้ำเสียก่อน และจะต้องบดในเครื่องบด เพื่อให้มีอนุภาคเล็กจะได้ไม่ตกตะกอน การทำเช่นนี้ต้องทำกับสารเคมีทุกตัวที่มีลักษณะเป็นผง แห้ง ๆ ในระบบซัลเฟอร์ รวมทั้งสารที่ใช้ในวัลคาไนซ์ คือ ซัลเฟอร์เองด้วย ซึ่งปกติสามารถทำให้ เข้ากันได้กับน้ำยางโดยใช้เทคนิคการบดหรือตัดให้มีขนาดเล็กลงและต้องให้ได้ขนาดเล็กสูงสุด 5 ไมโครเมตรจึงต้องใช้เวลาและพลังงานมากในอุตสาหกรรมน้ำยางที่จะลดขนาดซัลเฟอร์ให้มีขนาด เล็กกว่า 5 ไมโครเมตรได้

นอกจากการใช้สารเคมีแล้ว การฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา ก็สามารถทำใหยาง คงรูปได้เช่นกัน ถือเป็นกระบวนการวัลคาไนซ์ชั้นอีกหนึ่งวิธี โดยเมื่อถูกรังสีโมเลกุลของยางจะ แตกตัวให้เรดิคัล และจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอนทำใหยางที่ได้มีความเสถียร ต่อความร้อน มีความบริสุทธิ์สูงเพราะไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน จึงเหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์ หรือชิ้นส่วนทางการแพทย์ ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่ควรจะมีสารเคมีเจือปนน้อยที่สุด โดยในเวลา ต่อมาได้มีผู้ทำการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากน้ำยางวัลคาไนซ์ด้วยรังสี (Chapiro, A., 1987 : 65) เพื่อให้โมเลกุลยางเกิดการพันธะเชื่อมโยง (cross-link) แทนการใช้กำมะถัน โดยมีเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ชนิดต่างๆ เป็นตัวลดปริมาณรังสีให้ต่ำลงผลิตภัณฑ์ยางจากน้ำยางที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี จะมีสมบัติบางประการที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากน้ำยางที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เช่น ปลอดภัยจากสารก่อมะเร็งไม่ระคายเคืองต่อผิวหนัง โปรงใสกว่า และมีโมดูลัส (modulus) ต่ำกว่า เป็นต้น

รวมถึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของยางในด้านต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น เช่น สมบัติเชิงกล ความ ต้านแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต้านการฉีกขาด (tear resistance) ความทนทานต่อการ ขัดสี (abrasion resistance) และความยืดหยุ่น (elasticity) แต่การใช้รังสีจะมีผลต่อสมบัติบาง ประการของผลิตภัณฑ์ยางด้วย เช่น สมบัติความทนต่อแรงดึงหลังบ่มเร่งลดลง

2.2.11 การทดสอบคุณสมบัติของยางในลักษณะฟิล์มบาง

วิธีการทดสอบต่างๆ ที่สะดวกในการคำนวณหาองศาของการคลอสลิงค์ (degree of cresslinking) ในส่วนผสมน้ำยาง อาจทำได้โดยวิธีคลอโรฟอร์ม นัมเบอร์ การบวมพองในตัวทำ ละลาย การคำนวณหาค่า PRM (Prevulcanizate relaxed modulus) การวัดสมบัติความต้านทานต่อ

แรงดึง เป็นต้น วิธีการทดสอบแบบคลอโรฟอร์มเป็นวิธีที่รวดเร็วแต่ยากที่จะเปรียบเทียบระหว่างแต่ละชิ้นตัวอย่าง หรือช่วงการขยายเวลามากเกินไป (over an extended time period)

2.2.11.1 สมบัติการบวมพอง (Swelling)

ยางที่ยังไม่คงรูปก็เหมือนกับพอลิเมอร์อื่นๆ ที่จะบวมหรือพองในตัวละลายชนิดใดชนิดหนึ่ง ทั้งนี้เพราะตัวทำละลายจะถูกดูดซึมเข้าไปในยางหรือพอลิเมอร์จนกระทั่งโมเลกุลของยางหรือพอลิเมอร์สูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายใน (inner cohesion) และโมเลกุลก็จะรวมกับตัวละลาย

การบวมหรือพองของยางที่วัลคาไนซ์แล้วจะไม่ถูกกระทบกระเทือนจากองศาการคลอสลิงค์ของยาง แต่ละกรณีขึ้นอยู่กับโดยตรงกับโครงสร้างทางเคมีของยางและตัวละลาย โดยมีตัวอย่างวัลคาไนซ์ถูกแช่ในของเหลวจะมีดังต่อไปนี้เกิดขึ้น (Lee,2534)

1. เกิดการดูดซึมของเหลวโดยยางทำให้เกิดการบวมพอง
2. เกิดการสกัดสารที่ละลายได้ออกจากยาง หรือ อาจจะ
3. เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างของเหลวและยาง

ปกติการบวมพองจะเกิดจากผลในข้อ 1 และ 2 การบวมพองจะเกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ การบวมพองในตัวทำละลายมีข้อได้เปรียบหลัก คือ เวลาในการทำให้แผ่นฟิล์มแห้งและการถึงจุดสมดุลของการบวมพอง (Murray,1982) ซึ่งความสมดุลของการบวมพองของยางวัลคาไนซ์ในตัวทำละลายขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ธรรมชาติของตัวทำละลายและยาง ดังนั้นค่าความสมดุลของการบวมพองจะเป็นตัวชี้วัดความหนาแน่นของการคลอสลิงค์ของยางวัลคาไนซ์ ความสมดุลของการบวมพองทำการคำนวณ โดยแช่แผ่นฟิล์มยางบางๆในตัวทำละลายซึ่งปกติจะใช้โทลูอีนและวัดการเพิ่มน้ำหนักหรือเส้นผ่านศูนย์กลางที่สภาวะสมดุล (Gorton and Pendle,1976)

การศึกษาพันธะเชื่อมโยงของยางด้วยวิธีการบวมตัว (swelling test) โดยการนำยางวัลคาไนซ์มาแช่ในตัวทำละลาย ตัวทำละลายจะค่อยๆแพร่เข้าไปในเนื้อยาง ตัวทำละลายที่แทรกเข้าไปจะทำให้เนื้อยางวัลคาไนซ์แยกออกมาจนกระทั่งเกิดความเครียดในยางสูงพอที่จะป้องกันไม่ให้เนื้อยางพองต่อไปอีก ในภาวะที่จุดนี้ถือเป็นจุดสมดุล

โดยวิธีการ คือ นำแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางมาตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยตัดให้มีขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ หลังจากนั้นนำมาแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ที่อุณหภูมิห้อง ($20^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง หลังจากนั้นนำสารตัวอย่างมาคำนวณตามสมการ ดังนี้

$$\text{Swelling Ratio} = 1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)\left(\frac{w_2}{w_1}\right) - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)$$

- โดยที่ค่า d_1 คือ ความหนาแน่นของยาง เท่ากับ 0.93 g/cm^3
 d_2 คือ ความหนาแน่นของสารละลายโทลูอีน เท่ากับ 0.867 g/cm^3
 w_1 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างตอนเริ่มต้น
 w_2 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างหลังจากแช่สารละลายโทลูอีน

โดยอัตราส่วนการบวมพองมีความหมายดังนี้

- ยางนั้นยังไม่วัลคาไนซ์ (Unvulcanized rubber), $Q > 15$
 ยางวัลคาไนซ์เล็กน้อย (Lightly vulcanized), $Q = 10-15$
 ยางวัลคาไนซ์ปานกลาง (Moderately vulcanized), $Q = 7-10$
 ยางวัลคาไนซ์เต็มที่ (Fully vulcanized), $Q < 7$

2.2.11.2 การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

เมื่อได้ค่าสัดส่วนการขยายตัว (Swelling ratio) จากการทดสอบสัดส่วนการขยายตัวแล้ว จึงนำค่ามาแทนในสมการ เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ต่อไป โดยอาศัยสมการ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{การคำนวณ} \quad & \text{Cross-link density} = K \times Q^{-5/3} \\ \text{เมื่อค่า} \quad & K = 4.71 \times 10^{20} \end{aligned}$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ

Bhowmick (1980) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันในยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเร่งประเภทไดไซโอโมอร์โฟลีน (dithiodimorpholine) โดยใช้เครื่อง oscillating disk rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิ 150 และ 180°C ในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน พบว่า การเติมเขม่าดำจะช่วยเพิ่มปริมาณของพันธะ polysulfidic crosslink และเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา

การตัดพันธะกำมะถัน (desulfuration) และการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ไม่ต้องการ และพบว่าปริมาณการเกิด crosslink ที่อุณหภูมิ 180 °C ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 150 °C

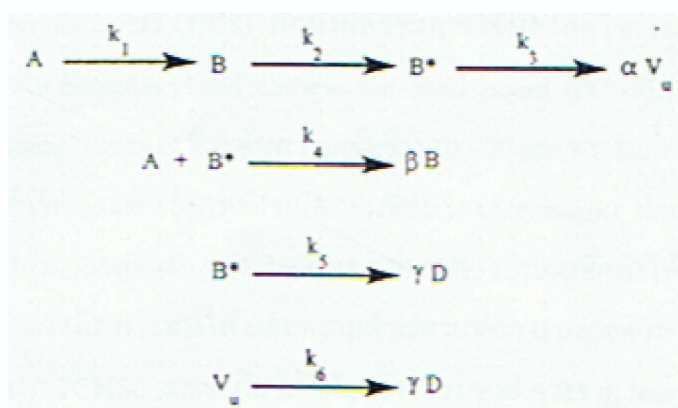
Hsich (1982) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยารัดคาไนซ์เซชันในยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม โดยใช้เครื่อง oscillating disk rheometer (ODR) พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยารัดคาไนซ์เซชันเท่ากับ 75.3 kcal/mol และพบว่าปริมาณของเขม่าดำไม่มีผลต่อค่าพลังงานกระตุ้น แต่การเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้ระยะเวลาการรัดคาไนซ์ก่อนกำหนด (scorch time) ลดลง

Butler (1992) ศึกษาเชิงปริมาณถึงอิทธิพลของความชื้นและปริมาณน้ำที่มีผลต่อพฤติกรรมกรัดคาไนซ์ของยางธรรมชาติคอมปาวด์ซึ่งใช้ MBS (N-Morpholybenzothiazole-2-sulfenamide) เป็นสารตัวเร่งหลัก ตัวอย่างยางคอมปาวด์จะถูกทำให้มีความชื้นในปริมาณที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงหาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่าง และทำการทดสอบสมบัติการรัดคาไนซ์ พบว่าระยะเวลาการรัดคาไนซ์ก่อนกำหนด (scorch time) ของยางคอมปาวด์มีความสัมพันธ์เป็นส่วนกลับกับปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำ จากการศึกษากลไกปฏิกิริยาของน้ำที่มีผลต่อพฤติกรรมกรัดคาไนซ์ของยางคอมปาวด์แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของสารตัวเร่ง MBS จะยับยั้งการชะลอการเริ่มการรัดคาไนซ์ก่อนกำหนด (delay-scorch time) และทำให้เกิด MBT (2-Mercaptobenzothiazole) ขึ้น ซึ่ง MBT มีผลทำให้อัตรารัดคาไนซ์ของยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้น

Chough and chang (1996) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความว่องไวของการรัดคาไนซ์ และโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (NR) ยางบิวตะไดอิน (BR) ยางสไตรียบิวตะไดอิน (SBR) และยางเบลนด์ (rubber blend) ของ NR/BR, NR/SBR และ SBR/BR ที่มีอัตราส่วนเป็น 35/36 และ 65/35 ในแต่ละตัวหาสภาวะที่เหมาะสมในการรัดคาไนซ์ของยางคอมปาวด์สำหรับผลิตยางรถที่ใช้กำมะถันเป็นสารรัดคาไนซ์ โดยใช้รีโอมิเตอร์ (rheometer) ที่อุณหภูมิ 140, 160 และ 180 °C และ differential scanning calorimeter (DSC) ที่อัตราให้ความร้อน 5, 10, 20 และ 40 °C / min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนในการทดสอบ เนื่องจากอนุมูลอิสระของกำมะถัน (sulfur radicals) สามารถทำปฏิกิริยา allylic hydrogen ได้ง่ายกว่า hydrogen ตัวอื่น ในโครงสร้างของยาง ดังนั้นอัตราของการรัดคาไนซ์ของยางจะขึ้นกับจำนวน allylic hydrogen ซึ่งจำนวน allylic hydrogen ของ NR > BR > SBR เท่ากับ 7, 4 และ 3.3 ตามลำดับ ดังนั้นอัตราเร็วการรัดคาไนซ์ ของ NR > BR > SBR สำหรับค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) จะแปรผกผันกับจำนวน allylic hydrogen คือ ถ้าจำนวน

allylic hydrogen มาก ค่าพลังงานกระตุ้นจะต่ำ จึงเป็นการง่ายที่จะทำนายความว่องไวและสถานะของการวัลคาไนซ์โดยเปรียบเทียบกับจำนวน allyl group

Ding and Leonov (1996) ศึกษาแบบจำลอง (model) ทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันของยางธรรมชาติในระบบกัมมะถันที่มีสารตัวเร่ง เสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นฐานของ Coran ดังนี้



เมื่อ	A	=	สารตัวเร่งหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสารตัวเร่งกับ Zn
	B	=	สารพอลิเมอร์ในขั้นก่อนเกิดพันธะเชื่อมโยง
	B*	=	รูปที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสารพอลิเมอร์ในขั้นก่อนเกิดพันธะเชื่อมโยง
	V _u	=	พันธะเชื่อมโยง
	D	=	ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา
	α, β, γ	=	ค่าปรับสมดุลของสมการ

จากการใช้เครื่อง ODR ในการติดตามการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน พบว่า k_2 เป็นอัตราเร็วที่ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันกับอุณหภูมิ

Lin and Huang (1996) ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เซชันของ siloxane-modified DGEBA epoxy resin ด้วยเทคนิค DSC โดยการหาค่าพลังงานกระตุ้นด้วยการวัด DSC แบบการให้ความร้อนที่ไม่คงที่ (non-isothermal) แล้วใช้สมมติฐานว่าจุดที่ต่ำที่สุดของพีคการเปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับศูนย์ คำนวณตามสมการ Arrhenius ด้วยวิธีการดังนี้

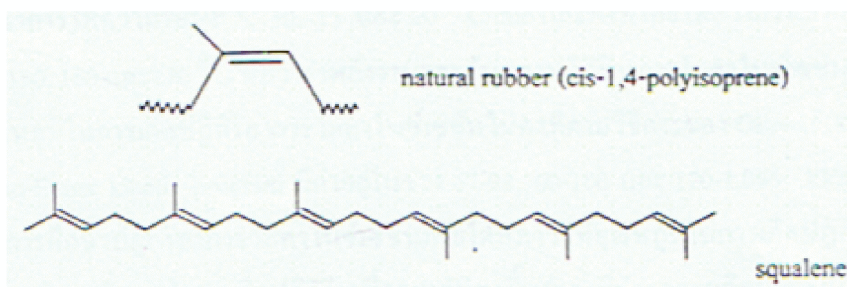
$$\begin{aligned} \text{สมการของ Ozawa คือ} & \quad \ln \beta = \ln A - (E_a R) / T_p \\ \text{สมการของ Kissinger คือ} & \quad - \ln (\beta / T_p^2) = \ln (AR / E_a) + E_a / RT_p \end{aligned}$$

เมื่อ	β	=	อัตราการให้ความร้อน ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
	E_a	=	ค่าพลังงานกระตุ้น (J/mol)
	T_p	=	อุณหภูมิที่จุดต่ำสุดของพีค (K)
	R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ 8.314 (J/mol.k)
	A	=	แฟกเตอร์ของความถี่ (Frequency factor, min^{-1})

สาโรช (2541) ศึกษาหาอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นในการวัดคาบไบนซ์ของยางสองชนิด คือ ยางธรรมชาติ และยางอีพีดีเอ็ม โดยนำยางทั้งสองชนิดมาผสมโดยใช้สูตรเดียวกัน หาเวลาการวัดคาบไบนซ์และระดับการวัดคาบไบนซ์โดยใช้เครื่อง oscillating disk rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิ คือ 19.85 และ 17.91 kcal/mol ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราในการวัดคาบไบนซ์ของยางจะสูงขึ้น โดยช่วงเวลาก่อนการวัดคาบไบนซ์ลดลง และอัตราในการวัดคาบไบนซ์ของยางธรรมชาติจะสูงกว่ายางอีพีดีเอ็ม

Menon (1998) ศึกษาผลของการใช้พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) สองชนิดกับยางธรรมชาติ คือ phosphorylated cashew nut shell liquid (PCNSL) และ 2-ethyl hexyl diphenyl phosphate (Santicizer 141) ที่ระดับความเข้มข้น 10-20 phr พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ ZnO ต่อ PCNSL เพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดการเชื่อมโยง (crosslink) ต่ำลง เนื่องจากเกิดเป็น complex ขึ้นระหว่างกลุ่ม phosphate ของ ZnO และ PCNSL เป็นผลชักนำให้เกิดวัดคาบไบนซ์ช้าลงสมบัติด้านความทนต่อแรงดึง การทนไฟ และความต้านทานต่อการสลายตัวทางความร้อนจะดีขึ้นเมื่อใช้ PCNSL เนื่องจาก PCNSL จะเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติ ต่างจาก Santicizer 141 ที่เข้ากับยางธรรมชาติได้ไม่ดี เกิดการปดุม (bloom) ที่ผิว

Rodriguez (1999) ใช้แบบจำลองโมเดลกุล (Model Compound Vulcanization, MCV) เพื่อศึกษากระบวนการวัดคาบไบนซ์และวิเคราะห์ของผสมที่มีเพียงส่วนประกอบของกระบวนการวัดคาบไบนซ์ (สารตัวเร่ง กำมะถัน และสารกระตุ้น) โดยใช้ squalene แทนยางธรรมชาติ ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของยางธรรมชาติและ squalene

ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ทำภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ที่อุณหภูมิ 140 °C การใช้ HPLC-MS ติดตามการเกิดปฏิกิริยา สามารถตรวจพบสารประกอบที่เกิดระหว่างปฏิกิริยา (intermediate compounds) เรียกว่า active sulfurating agent ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายโมเลกุลกำมะถันไปยังสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon chain) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงขึ้น และพบว่าการใช้สารตัวเร่งประเภท sulfonamide ร่วมกับ thiuram จะทำให้จำนวนของ active sulfurating agent เพิ่มขึ้น การเคลื่อนย้ายโมเลกุลกำมะถันจะดีขึ้น แต่ถ้าในระบบมีซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น ช่วยกระตุ้นการทำงานของสารตัวเร่ง ทำให้การเคลื่อนย้ายโมเลกุลกำมะถันยิ่งดีเพิ่มขึ้น

Sadequ (1999) ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเร่งและระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้ต่อค่า cure index ของยางธรรมชาติ (Standard Malaysian Rubber, SMR L) และยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ ENR 25 โดยใช้เครื่องทดสอบความหนืดของยาง (MV 2000) ที่อุณหภูมิ 100-180 °C สารตัวเร่งที่ใช้ในการทดลอง คือ 2-mercaptobenzothiazole (MBT), tetramethylthiuram disulphide(TMTD), Zinc dimethyldithiocarbamate (ZDMC), N-tert-butyl-2-benzothiazole sulfonamide(TBBS) และ diphenylguanidine (DPG) ระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้ คือ ระบบกำมะถันปกติ (conventional,CV) ระบบเซมิอีวี (semi-EV) และระบบอีวี (EV) พบว่า cure index และค่าพลังงานกระตุ้นของ SMR L สูงกว่า ENR 25 เนื่องจากการกระตุ้นโดยกลุ่มอีพอกซีไคซ์ซึ่งอยู่ติดกับพันธะคู่โดยที่ค่ากระตุ้นพลังงานกระตุ้นลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สารตัวเร่งที่มีหมู่แทนที่มาก (เช่น TBBS) จะมีแนวโน้มให้ค่า cure index และค่าพลังงานกระตุ้นสูงกว่าสารตัวเร่งที่มีหมู่แทนที่น้อยกว่า

Nieuwenhuizen (2000) ได้ศึกษาถึงกัมมันต์และการใช้งานของ Model Compound Vulcanization (MCV) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาการวัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆเช่น กำมะถัน

เปอร์ออกไซด์และเทคนิคอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างของตัว MCV เอง ตัวอย่างเช่น ชนิดของ model compound สภาวะต่างๆในการทดลอง ลักษณะของ MCV ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อผลการศึกษา MCV นอกจากนี้ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลจากเทคนิค chromatographic และ spectroscopic เพื่อใช้ในการศึกษา MCV เช่น เทคนิค HPLC, GC, NMR และ IR spectroscopy ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษา MCV นั้นจะอธิบายได้ทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ และจากการศึกษาพบว่าการศึกษา MCV นั้นเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้ในการศึกษา vulcanization chemistry ได้

Ploenpit (2000) ศึกษาจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เซชันของยางธรรมชาติที่มี trans-1,4-polyisoprene (TPI) ผสมอยู่ในอัตราส่วน 30,50 และ 70 % (w/w) มีการวัลคาไนซ์ในระบบกัมมะถันปกติ ระบบเคมีอีวี และระบบอีวี ซึ่งมีอัตราส่วนของกัมมะถันต่อสารตัวเร่ง เท่ากับ 1.8:0.9, 1.5:1.5, และ 1.5:3 ตามลำดับโดยใช้เทคนิค DSC ในการศึกษาปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เซชันภายใต้สภาวะสองแบบคือที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เซชันไม่คงที่มีอัตราการให้ความร้อนที่ 5, 10, 15 และ 20 °C/min และคงที่โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ที่ 140, 150, 160, และ 170 °C พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันไม่คงที่ตามวิธีการของ Ozawa, Kissinger และ Perkin-Elmer kinetic program ที่มีค่าอยู่ในช่วง 67-92, 60-100 และ 120-1,066 kJ/mol ตามลำดับและการศึกษาปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เซชันภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันคงที่ พบว่าการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น โดยระบบ EV มีค่ามากที่สุดรองลงมา คือ ระบบ Semi-EV และระบบ CV ตามลำดับ ค่าพลังงานกระตุ้นในระบบ Semi-EV ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ส่วนในระบบ CV มีค่าสูงกว่าระบบ EV พลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 65-69 kJ/mol

Buzar (2001) ได้ศึกษาผลของการบ่มเร่งยางวัลคาไนซ์ด้วย high resolution solid state ¹³C-NMR ของ vulcanization chemistry รูปแบบของโครงสร้างและผลของ thermal oxidative aging ของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม carbon-black ลงไป โดยทำการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์, ระบบประสิทธิภาพ(EV) และระบบกัมมะถันปกติ(CV) ซึ่งการจัดเรียงตัวของ cis-trans และโครงสร้างของ sulfide ต่างๆนั้นสามารถที่ศึกษาได้ด้วย ค่า chemical shift ของกราฟ extra NMR lines ซึ่งสังเกตได้จากการวัลคาไนซ์ต่างๆ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงจลนศาสตร์ของการเกิดการเชื่อมโยงและการทำลาย polysulfidic crosslinks จะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในขั้นตอนการเสื่อมในระบบกัมมะถันปกติ(CV) ของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่เติมและไม่เติม carbon-black ในขณะที่ไม่พบในระบบเปอร์ออกไซด์และระบบประสิทธิภาพ

Ehabe (2001) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ คือ อีวี กำมะถันปกติ เปอร์ออกไซด์ และไดยูรีเทน เพื่อศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ที่ 50%, 90%, 100%, และ 200% ของเวลาการวัลคาไนซ์สูงสุด พบว่ายางธรรมชาติที่มีสารประกอบใกล้เคียงกันจะมีพฤติกรรมและสมบัติการวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน ขึ้นกับระบบการวัลคาไนซ์ ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 140 °C จะเหมาะสำหรับการวัลคาไนซ์เพียงบางระบบเท่านั้น แต่ระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide) จะไม่เหมาะสม เนื่องจากการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ไม่ดีพอที่จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้ ด้านสมบัติ compression set เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับการวัลคาไนซ์เท่ากัน พบว่า ระบบอีวี และระบบเปอร์ออกไซด์จะให้ค่า compression set ต่ำกว่าระบบกำมะถันปกติและระบบยูรีเทน

Lewis (2003) ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางโบรโมบิวไทล์ เขม่าดำ และสารตัวเร่ง TBBS ที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง โดยใช้หลักสถิติ Response Surface Methodology (RSM) ในการออกสูตรยาง พบว่า อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางโบรโมบิวไทล์ เขม่าดำ และสารตัวเร่ง TBBS ที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางฟิสิกส์ของยางแตกต่างกัน โดยเขม่าดำจะมีอิทธิพลต่อเวลาสกอซ เวลาสุก และสมบัติทางฟิสิกส์มากที่สุด

Lopez-Manchado (2003) ศึกษาผลกระทบของการใช้ดินขาว 2 ชนิด คือ unmodified clay และ organoclay ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การวัลคาไนซ์เซชันของยางธรรมชาติที่ใช้ในการผลิตยางรถทดสอบพฤติกรรมการวัลคาไนซ์โดยใช้ curemeter ที่อุณหภูมิ 160 - 200 °C และ DSC ที่อุณหภูมิกึ่งที่ ตั้งแต่อุณหภูมิ 160 -200 °C ภายใต้สภาวะพลวัต (dynamic) ทำให้อัตราการให้ความร้อน 2, 5, 10, 15, 25 และ 50 °C/min พบว่า organoclay จะประพฤติตัวเป็นสารวัลคาไนซ์เร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน ทำให้เวลาสกอซและเวลาสุกสั้นลง ค่าพลังงานการกระตุ้นของกระบวนการวัลคาไนซ์มีค่าต่ำสุด เกิดการเชื่อมโยงสูง สังกัดได้จากค่าทอร์กที่มีค่าสูงสุด สำหรับ octadecylamine จะทำให้อัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลที่เสริมกันระหว่าง benzothiazyl (สารตัวเร่ง) กับ amine แต่การใช้ unmodified clay จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เด่นชัด

Wang (2003) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการเปลี่ยนแปลงทอร์กจากวัลคาไมเตอร์ (vulcameter) ระหว่างการวัลคาไนซ์เซชันของยางธรรมชาติและวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการวัลคาไนซ์เซชัน พบว่าความเร็วของการเปลี่ยนแปลงทอร์กระหว่างการวัลคาไนซ์ประกอบด้วย 2 สภาวะ คือ สภาวะ

ความเร็วเพิ่มและลดกระบวนการวัดคาบในสภาวะที่ความเร็วเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ โดยการใช้ สมการ

$$[\ln(M_H - M_t) - \ln A]^{1/\alpha} = -K_1^{1/\alpha} (t - t_0)$$

ซึ่งแตกต่างจากสมการที่เสนอโดย Coran คือ

$$V_{ut} = - (aK_3/K_4) \ln[(K_2 e^{K_1 t} - K_1 e^{K_2 t}) / (K_2 - K_1)]$$

ค่า $K_1^{1/\alpha}$ ใช้เป็นค่าคงที่อัตราปฏิกิริยาเพื่อนำไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_1) ตามสมการ Arrhenius กระบวนการวัดคาบในสภาวะที่ความเร็วลดลง สามารถอธิบายได้ โดยการใช้สมการ

$$\ln(M_H - M_t) = \ln B - K_1(t - t_{dis})$$

เมื่อ	M_H	คือ	ค่าทอร์คสูงสุด
	M_t	คือ	ค่าทอร์คที่เวลา (t) ใด ๆ
	A และ B	คือ	ค่าคงที่
	K	คือ	ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยา (rate constant)
	t_0 และ t	คือ	เวลาเริ่มต้นและเวลาใด ๆ ตามลำดับ
	V_{ut}	คือ	ความเร็วของการเปลี่ยนค่าทอร์ค
	t_{dis}	คือ	เวลาที่สารตัวเร่งหรืออินเตอร์มีเดียต (intermediates) ทำปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์
	α	คือ	อันดับปฏิกิริยา (reaction order)

นภาพร (2547) อิทธิพลของขนาดอนุภาคสารเคมีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มวัดคาบในสภาวะจุ่มน้ำยางธรรมชาติได้ถูกศึกษา โดยเตรียมน้ำยางคอมปอสต์จากน้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียสูงร่วมกับสารเคมีดีสเพอร์ชันที่แปรขนาดอนุภาคให้อยู่ในช่วง 1-44 ไมครอน โดยควบคุมน้ำยางคอมปอสต์ให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 35% และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า เมื่อแปรขนาดอนุภาคกัมมะถันดีสเพอร์ชันให้อยู่ในช่วง 1 – 20 ไมครอน การใช้กัมมะถันที่ระดับปริมาณ 0.50 phr การเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคของกัมมะถันจะไม่มีผลต่อระดับของการพรีวัล

คาไลนซ์ แต่ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงและสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ 100% โมดูลัส 300% โมดูลัส และความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ส่วนสมบัติทางด้านระยะยึดจนขาดของแผ่นฟิล์มจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้กัมมะถันที่ระดับปริมาณ 1.25 phr และ 2.50 phr การเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคของกัมมะถันจะไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระดับของการพรีวัลคาไลนซ์ สมบัติทางกายภาพ และความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง การแปรขนาดอนุภาคของสารตัวเร่ง ซิงค์ไดออกไซด์ ไทโอคาร์บามเตและซิงค์ไดบิวทิลไดไทโอคาร์บามเต ที่อยู่ในช่วง 1 – 20 ไมครอน จะให้ผลในทำนองเดียวกับการใช้กัมมะถันดิสเพอร์ชันที่ระดับ 1.25 phr นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณกัมมะถันจะส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่วนการแปรขนาดอนุภาค สารเคมีผสมดิสเพอร์ชันให้อยู่ในช่วง 1–44 ไมครอน พบว่าเมื่อทำการบ่มน้ำยางคอมปาวด์เป็น ระยะเวลาไม่น้อยกว่า 6 ชั่วโมง ขนาดอนุภาคของสารเคมีผสมดิสเพอร์ชันจะไม่มีผลต่อระดับการพรีวัลคาไลนซ์ แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มน้ำยางคอมปาวด์มากขึ้น การใช้ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น จะส่งผลให้น้ำยางคอมปาวด์มีการเพิ่มขึ้นของระดับของการพรีวัลคาไลนซ์ที่น้อยลง โดยการใช้ขนาดอนุภาคที่ระดับ 44 ไมครอน จะส่งผลให้มีระดับการพรีวัลคาไลนซ์ต่ำที่สุด และเมื่อนำแผ่นฟิล์มมาทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคของสารเคมีผสมดิสเพอร์ชันเพิ่มขึ้น สมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้ เช่น 100% โมดูลัส 300% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงมีแนวโน้มลดลง แต่สมบัติด้านระยะยึดจนขาดของแผ่นฟิล์ม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มวัลคาไลนซ์ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติ ที่เตรียมโดยเทคนิคการจุ่มแบบพิมพ์ พบว่าการใช้ขนาดอนุภาคของสารเคมีผสมดิสเพอร์ชันที่ต่ำกว่า 5 ไมครอน หรือใช้ปริมาณของสารเคมีผสมดิสเพอร์ชันที่ต่ำลง หรือการเพิ่มเวลาในการวัลคาไลนซ์ มีผลทำให้แผ่นฟิล์มวัลคาไลนซ์มีลักษณะของความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

ประมวล (2547) ได้ศึกษาปฏิกิริยาการวัลคาไลนซ์ด้วยกัมมะถันและเปอร์ออกไซด์ในอนุภาคยางธรรมชาติ โดยได้ศึกษาสัณฐานวิทยา (morphology) ของลักษณะการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลภายในอนุภาคยาง พบว่าจากการวัด %swelling ratio ของแผ่นยางที่เตรียมจากน้ำยางชั้นที่ได้ทำการพรีวัลคาไลนซ์แล้ว พบว่ามีค่าลดลงอย่างมากในช่วงแรกและคงที่เมื่อเวลานานขึ้น การบ่มและการใช้ sodium dodecyl sulphate (SDS) ในระบบกัมมะถันมีผลทำให้ %swelling ratio ของยางลดลง แต่ไม่พบผลของการเติม SDS ในระบบเปอร์ออกไซด์เมื่อใช้กระบวนการ phase transfer/bulk polymerization เตรียมตัวอย่าง และใช้ transmission electron microscopy (TEM) ศึกษา morphology ของอนุภาคยางพบว่ามีเกิดการเชื่อมโยงอย่างสม่ำเสมอในทุกอนุภาคยางของที่ทำ

การพรีวัลคาไนซ์และพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการพรีวัลคาไนซ์นานขึ้นจะทำให้ crosslink density ของอนุภาคยางจะเพิ่มขึ้น

สุวิมล (2547) กระทบการวัลคาไนซ์ของน้ำยางธรรมชาติ (NR) สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ซิงค์ไดออกไซด์ไทโอคาร์บาเมต (ZDEC) ซึ่งเป็นสารเร่งการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป จากการศึกษาค้นคว้าผลของปริมาณสารช่วยในการวัลคาไนซ์ (กำมะถัน) และสารเร่งการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป (ZDEC) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของน้ำยาง ได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง ค่าความยืดเมื่อขาด โมดูลัส และค่าความแข็ง ซึ่งปริมาณกำมะถันและสารเร่งการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโครงข่ายร่างแหของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติ การคงรูปของน้ำยางธรรมชาติกระทำที่อุณหภูมิห้องโดยระยะเวลาการบ่มต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณ ZDEC 50% ดิสเพอร์ชันคงที่เท่ากับ 3 phr ค่าความต้านแรงดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้น พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณกำมะถัน ซึ่งค่าความยืดเมื่อขาดไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งและ 300% โมดูลัสของน้ำยางธรรมชาติค่าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณกำมะถันน้อยกว่า 4 phr แต่เมื่อปริมาณกำมะถันมากกว่า 4 phr ค่าสมบัติเชิงกลต่างๆจะไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนค่าแรงยึดติด พบว่ามีแนวโน้มไม่แน่นอนถึงแม้ปริมาณกำมะถันจะเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านแรงดึงของแผ่นฟิล์มยางธรรมชาติที่ปริมาณกำมะถัน 50% ดิสเพอร์ชันคงที่เท่ากับ 4 phr มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ZDEC เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความยืดเมื่อขาดลดลง และเมื่อปริมาณ ZDEC น้อยกว่า 3 phr ค่าความแข็งจะค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อปริมาณ ZDEC เพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ ZDEC มากกว่า 3 phr ส่วนค่า 300% โมดูลัสและค่าแรงยึดติดไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณ ZDEC เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิห้องการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของน้ำยางธรรมชาติไม่พบการเปลี่ยนแปลง เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองอธิบายถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโครงข่ายร่างแห

Maridass (2004) ใช้หลักสถิติ Response Surface Methodology (RSM) ในการทำนายพารามิเตอร์ คือ อุณหภูมิบาร์เรล (barrel) และความเร็วสกรู ของ counter rotating twin screw ที่ใช้ในการดีวัลคาไนซ์ (devulcanization) ยางธรรมชาติ พบว่าในการดีวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ อุณหภูมิและความเร็วสกรูที่เหมาะสม คือ 219 °C และ 20 rpm ตามลำดับ

Wang (2004) ศึกษาจลนพลศาสตร์การวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องวัลคาไมเตอร์ (vulcameter) ที่อุณหภูมิ 140 – 170 °C พบว่าค่าคงที่อัตราวัลคาไนซ์ก่อนและหลัง t_{dis} (เวลาที่สาร

ตัวเร่งหรืออินเทอร์มีเดียต (intermediates) ทำปฏิกิริยาหมดไป) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ MBT แต่ค่า t_0 (scoch time) และ t_{dis} ลดลง ค่าพลังงานกระตุ้นของการระบวนการวัลคาไนซ์เซชันก่อนและหลัง t_{dis} ลดลงเมื่อปริมาณ MBT เพิ่มขึ้น

Choi (2006) ได้ศึกษาปฏิกิริยาของสาร hydrocarbon โดยที่ปฏิกิริยา radical จะเกิดผ่านตำแหน่ง allylic radicals ผลของ MCV และโครงสร้างการเชื่อมโยงของ vulcanizates นั้นสามารถอธิบายได้ว่าปฏิกิริยาหลักของ accelerated sulfur vulcanization จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีการศึกษาในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาหลักๆ และโครงสร้างการเชื่อมโยงของ accelerated sulfur vulcanization จากการพิจารณาถึงปฏิกิริยา radical ปฏิกิริยาของ allylic radicals และผลของ MCV พบว่า accelerated sulfur vulcanization ของยางธรรมชาติจะเกิดโครงสร้างหลักแบบ Pa cross-link ซึ่งส่วนใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาร่วมกันได้อย่างสมบูรณ์

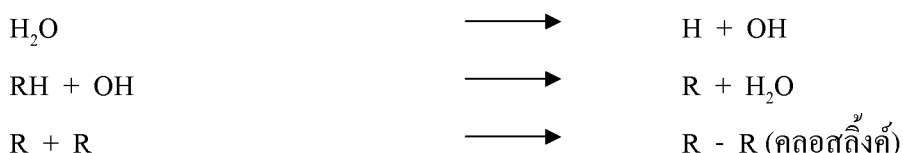
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสี

Minoura and Asao (1961) การศึกษาการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสีแกมมา จาก Co-60 เริ่มตั้งแต่ ค.ศ. 1960 โดยพบว่าปริมาณรังสีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติมากกว่า 300 kGy ซึ่งถือว่าสูงเกินไปในระดับอุตสาหกรรม และได้เสนอกลไกปฏิกิริยาดังนี้

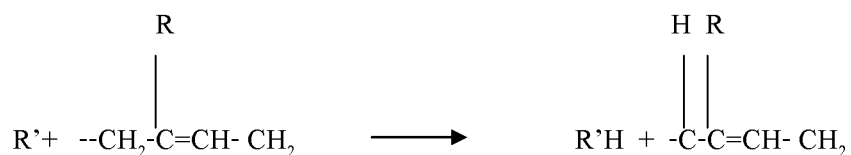
ผลทางตรง



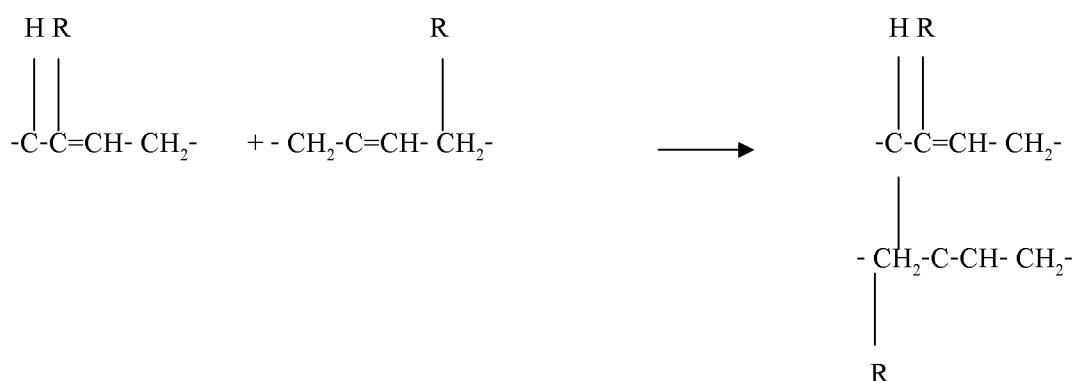
ผลทางอ้อม



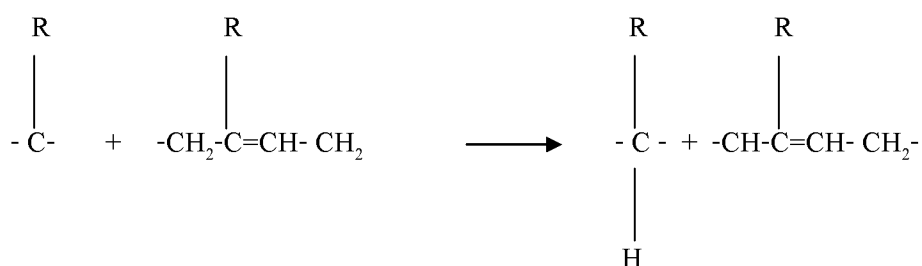
กรณีผลทางตรงอธิบายได้ว่า อนุมูลตัวแรกจะดึงไฮโดรเจนที่ตำแหน่งแอลฟา



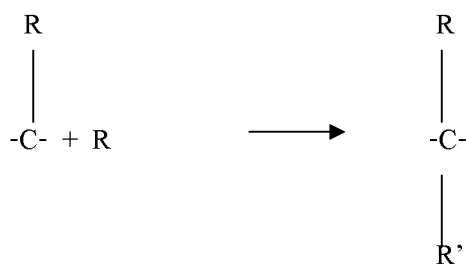
Laizier et al (1969) จากนั้นอนุมูลพอลิเมอร์จะเข้าตรงตำแหน่งพันธะคู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ ตัวที่สองจะทำให้เกิดการครอสลิงค์ และได้อนุมูลพอลิเมอร์ตัวใหม่เกิดขึ้น ตามสมการ



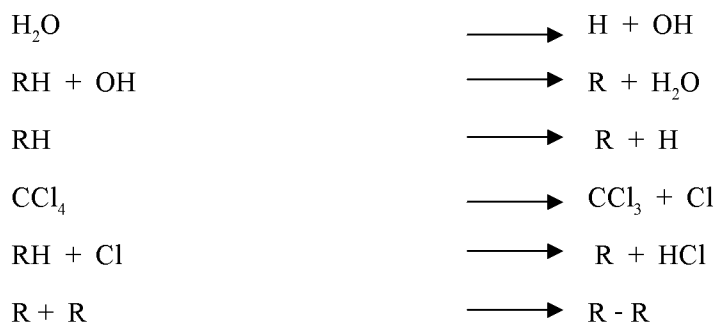
การเกิดพันธะเชื่อมโยงจะดำเนินต่อไปซ้ำ ๆ กันในกระบวนการขึ้นการแผ่ (propagation) และอาจเกิดการย้ายโซ่ (chain transfer) ผลการย้ายของอนุมูลอิสระไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง อาจทำให้เกิดโมเลกุลที่เป็นเส้นตรง ดังสมการ



อาจเนื่องมาจากในระบบที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงเชื่อว่าในขั้นสุดท้าย (termination) เกิดขึ้นจากอนุมูลพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลเริ่มต้น



Samarno and Sundardi (1977) การวัดคาบในชั้นยางในสภาพน้ำยางจะใช้ปริมาณรังสีต่ำลงได้ โดยเฉพาะถ้าเติมเซนซิไทเซอร์ที่เหมาะสมลงไป เช่น เมื่อเติม CCl_4 4 phr จะใช้ปริมาณรังสีต่ำกว่า 50 kGy และเสนอกลไกปฏิกิริยาต่อไปนี้

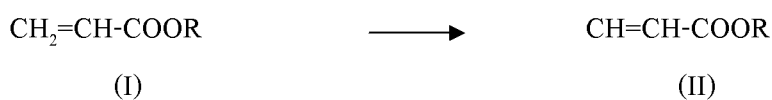


Makuuchi and Hagiwara (1984) ได้ใช้อะคริลิกโมโนเมอร์ (acrylic monomer) แทน CCl_4 โดยใช้เซนซิไทเซอร์ที่เป็นพอลิฟังก์ชันนัลโมโนเมอร์ (polyfunctional monomer) เป็นตัวช่วยให้เกิดการครอสลิงก์โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้เร็วขึ้น แต่เนื่องจากมีตำแหน่งที่แตกตัวแล้วให้อนุมูลได้หลายตำแหน่งโดยปริมาณรังสีที่ใช้ในการวัดคาบน้อยกว่า 10 kGy อย่างไรก็ตามพอลิฟังก์ชันนัลโมโนเมอร์ที่ใช้ทำน้ำยางเกิดการตกตะกอนหลังจากที่ทิ้งไว้ค้างคืนที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เพราะการกระจายของไดอะคริเลต (diacrylate) ไปบนพื้นผิวของอนุภาคยางมีเสถียรภาพต่ำ เนื่องจากตัวมันมีความสามารถในการละลายกับยางธรรมชาติได้น้อยมาก และการกำจัดพอลิเมอร์ฟังก์ชันนัลโมโนเมอร์ออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยากเพราะความดันไอน้ำต่ำมาก เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลสูง

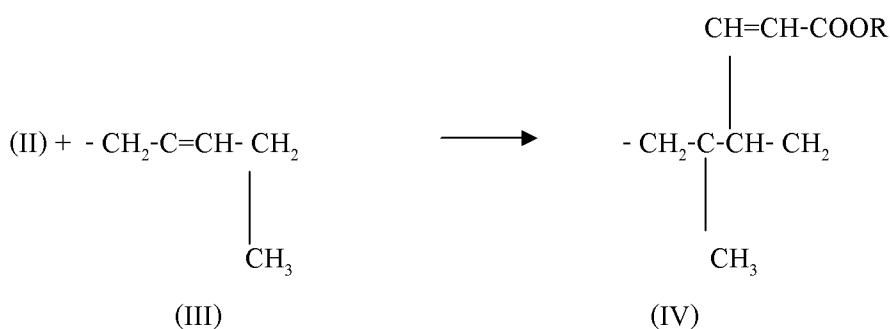
Makuuchi and Devendra (1986) ใช้อะคริลิกโมโนเมอร์ที่เป็นโมโนฟังก์ชันนัล (monofunctional) โดยพบว่า การใช้โมโนฟังก์ชันนัลโมโนเมอร์เป็นเซนซิไทเซอร์มีข้อดีกว่าพอลิเมอร์ฟังก์ชันนัลที่ราคาถูกลงกว่า และมีความดันไอสูงพอที่สามารถกำจัดออกได้โดยการให้ความร้อน

จากการใช้ 2-เอซิลเฮกซิลอะคริเลต (2-ethylhexyl acrylate, 2-EHA) เป็นเซนซิไทเซอร์นั้นสามารถลดปริมาณรังสีถึงเหลือ 30 kGy และเมื่อใช้ 2-EHA ร่วมกับ CCl_4 ปริมาณรังสีที่ใช้เท่ากับ 15 kGy อย่างไรก็ตามแผ่นฟิล์มยางที่เตรียมจากการใช้ 2-EHA มีกลิ่นเหม็น เนื่องจากมีสารตกค้างของ 2-EHA

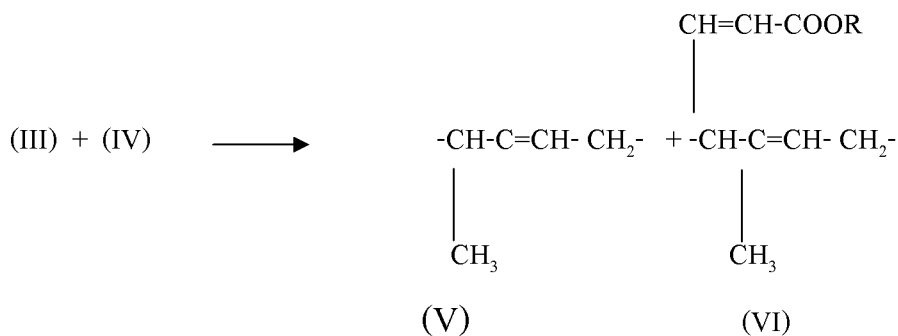
ชยากริต (1990) ได้ศึกษากลไกปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยรังสี โดยมี 2-EHA เป็นเซนซิไทเซอร์ด้วยเทคนิค $^{13}\text{C-NMR}$ และ FT-IR ดังนี้



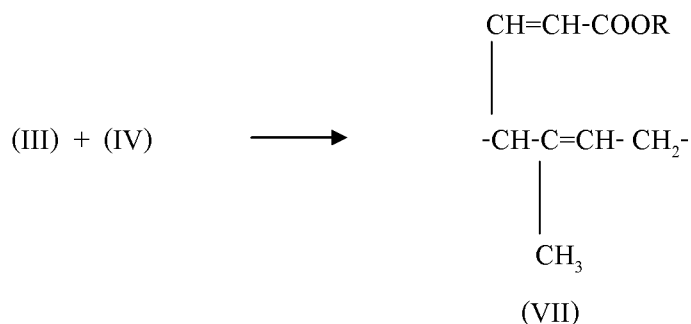
อนุมูลอะคริเลตที่เกิดขึ้น จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าโมเลกุลยางจึง ไปจับกับพันธะคู่ที่ไกลที่สุด



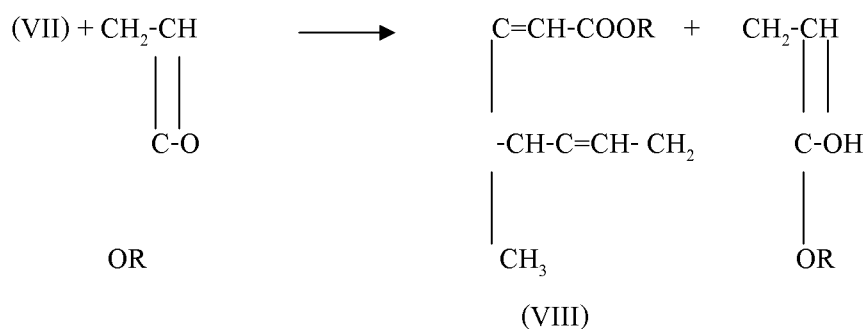
อนุมูลอิสระ (IV) ที่เกิดขึ้นจะไปดึงไฮโดรเจนอะตอมของกลุ่มเมทิลลินในสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ไกลที่สุดกลายเป็นอนุมูลอิสระขงใหม่ (V)



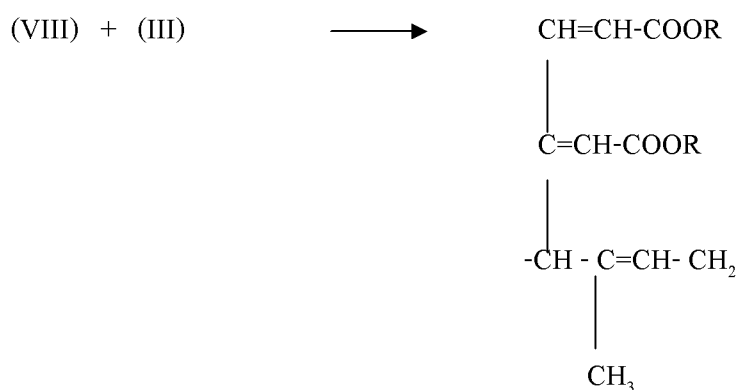
อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นอาจจะรวมตัวกันเองได้ผลผลิตที่เป็นสารมัธยันต์ (intermediate)



2-EHA อาจจับกับสารมัธยันต์ข้างบน



หรือ



Sabarinah and Sundari (1990) การวิจัยอะโครติกโมโนเมอร์ตัวใหม่คือ นอร์มอลบิวทิล อะคริเลต (*n*-butyl acrylate, *n*-BA) ร่วมกับ CCl_4 ในสัดส่วน 1 : 1 phr เป็นเซนซิไทเซอร์นั้น พบว่า ปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ระดับ 20 kGy ให้ค่าความทนแรงดึง 20 MPa (Sabarinah, et al . 1990 : 815-818) ทั้งนี้ไม่อาจหลีกเลี่ยงการใช้ CCl_4 ที่เติมลงไปได้ การวิจัยถึงผลของไฮโดรเจนเปอร์

ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) ในการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสีโดยใช้ CCl_4 และ *n*-BA ในสัดส่วน 1 : 1 phr เช่นเดียวกันเป็นเซนซิไทเซอร์ที่ช่วยลดปริมาณรังสีให้ต่ำลง พบว่า การเติม H_2O_2 30% ในปริมาณ 2.5 phr ปริมาณรังสีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์เท่ากับ 14 kGy ที่ให้ความทนแรงดึงสูงสุด 18 MPa

Zhonghai and Makuuchi (1990) กรณีที่ใช้ *n*-BA จะต้องใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH) 0.2 phr เพิ่มความคงตัวของน้ำยาง และเมื่อใช้ *n*-BA 5 phr พบว่า ปริมาณรังสีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์อยู่ที่ระดับ 15 kGy ให้ค่าความทนแรงดึง 30 MPa ความยืดเมื่อขาด 980% ซึ่งถือว่ามีความเกินกำหนดมาตรฐานถุงมือทางการแพทย์ (ASTM D3578) และน้ำยางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีนี้สามารถเก็บไว้ได้นานกว่า 90 วัน

Parinya ang Makuuchi (1990) จากการวิจัยพบว่า *n*-BA เข้มข้น 5 phr ร่วมกับ เทอริวีวี บิวทิว ไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ (*t*-butyl hydroperoxide, HPO) 0.1 phr เป็นเซนซิไทเซอร์ โดยมี KOH เป็นสารเพิ่มความคงตัวของน้ำยางธรรมชาติ และพบว่าการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก่อนที่จะเติม *n*-BA นั้นทำให้น้ำยางมีเสถียรภาพมากกว่าการใช้ *n*-BA เพียงอย่างเดียว ปริมาณรังสีที่ใช้ประมาณ 8 kGy โดยที่แผ่นฟิล์มยางมีค่าความทนแรงดึงประมาณ 29 MPa

Jayasuriya (2001) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้ น้ำยางธรรมชาติ ชนิดแอมโมเนียสูง นำไปหมนเหวี่ยงเพื่อให้เหลือปริมาณน้ำยางชั้นประมาณ 50% แล้วใช้สารเร่ง (accelerator) คือ trimethylol propane trimethacrylate (TMPTMA) และ phenoxy ethyl acrylate (PEA) เติมลงไปปริมาณ 3 และ 5 phr (ทำให้ได้สารตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง) และเติมสารนอร์มอล บิวทิล อะคริเลต (*n*-butyl acrylate, *n*-BA) เป็นตัวเซนซิไทเซอร์ พบว่า หลังจากนำไปเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมาที่ปริมาณ โดสรังสี 20, 30, 40 และ 50 kGy แล้ว ผลจากการทดลองทำให้ทราบว่า โดยใช้สารเร่ง(accelerator) PEA จะให้ผลดีกว่า TMPTMA

Chirinos (2003) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง ที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยลำอิเล็กตรอน โดยใช้สารนอร์มอลบิวทิล อะคริเลต (*n*-butyl acrylate, *n*-BA) เป็นตัวเซนซิไทเซอร์ พบว่า ลำอิเล็กตรอนสามารถทำให้น้ำยางธรรมชาติเกิดโครงสร้างแบบพันธะเชื่อมโยง (cross-link) ได้ โดยใช้ช่วงพลังงาน 250 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีช่วงกระแสของลำอิเล็กตรอนประมาณ 5 – 20 มิลลิแอมแปร์ ทำให้สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ได้ว่า

$R_{vul} = kI^{0.6}$ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ค่าของอัตราการวัลคาไนซ์ของน้ำยางธรรมชาติ แปรผันกับค่ากระแสของลำอิเล็กตรอน

Abad (2006) ได้ศึกษาสมบัติของสารต้านทานต่อการเกิดการออกซิเดชันและกรดอะมิโนบางชนิดที่ไม่ละลายน้ำที่มีผลต่อการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยรังสี (RVNRL) ซึ่งประกอบไปด้วย cystine, tyrosine, asparagine phenyl alanine และ alanine จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่า amino acids ซึ่งประกอบด้วย cystine, alanine และ asparagine, phenyl alanine จะให้สมบัติในการต้านทานการเสื่อมสภาพของยาง RVNRL ที่ดีกว่า และการรวมสารเหล่านี้เข้าด้วยกันเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านต้านทานต่อการเสื่อมสภาพในยาง RVNRL และจากการศึกษาผลของ Keratin จากชนไก่ต่อสมบัติการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพของ RVNRL และเมื่อทำการสกัด keratin ด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน พบว่าจะมีผลต่อ RVNRL ด้วย การลดลงของ keratin กับ sodium bisulfite จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารต้านทานการออกซิเดชันได้ อย่างไรก็ตาม การสกัด keratin กับสารละลายพวก alkaline ก็อาจทำให้เกิดสมบัติทางด้าน pro-oxidant ในยาง RVNRL ได้

Stephen (2006) ได้ศึกษาความเสถียรทางความร้อนของยางธรรมชาติและยาง XSBR และส่วนผสมของทั้งสองด้วยเทคนิค thermo gravimetric คุณลักษณะของการบ่มเร็น้ำยางที่ผสมกันจะศึกษาโดยใช้ hot air oven thermal ageing เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิ 70 °C โดยได้ศึกษาสมบัติทางกลของการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนของน้ำยางผสมและสมบัติหลังจากการบ่มเร็น้ำยางแต่ละชนิด สามารถที่จะตรวจสอบได้ด้วยสารอ้างอิงชนิดพิเศษกับอัตราส่วนการผสมและเทคนิคการวัลคาไนซ์ เมื่อปริมาณ XSBR เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ระหว่างการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและรังสีพบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีนั้น จะให้ค่าเสถียรทางความร้อนสูงกว่าเนื่องจากการเชื่อมโยงระหว่าง carbon-carbon จากกราฟ DTG จะใช้ในการหาความแตกต่างของสถานะที่เกิดการเสื่อมสภาพและพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นสำหรับการเกิดการเสื่อมสภาพนั้นสามารถที่จะหาได้ด้วย Coatse Redfern plot พบว่าสมบัติของตัวอย่างที่เกิดการ ageing นั้นลดลง เนื่องจากการลดลงของสายโซ่ อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสของ XSBR และ NR/XSBR blends นั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากการก่อรูปจากการ cross-link ขณะที่ ageing

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. น้ำยางข้น ชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Latex, HA) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ผลิตโดยบริษัท ฉลอง อุตสาหกรรมน้ำยางข้น

2. น้ำยางข้น ชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia Concentrated Latex, LA) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ผลิตโดยบริษัท ฉลอง อุตสาหกรรมน้ำยางข้น

3. เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA, $H_2C=CHCO_2(CH_2)_3CH_3$) น้ำหนักโมเลกุล 128.2 กรัม/โมล ความบริสุทธิ์ 99% จุดเดือด 148 °C จุดหลอมเหลว -64 °C มีลักษณะเป็นของเหลวใส ทำหน้าที่เป็นสารเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ผลิตโดยบริษัท Sigma-ALDRICH Chemistry Co.,Ltd.

4. เตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) น้ำหนักโมเลกุล 165.8 กรัม/โมล ความบริสุทธิ์ 99% จุดเดือด 121.1 °C จุดหลอมเหลว -19 °C มีลักษณะเป็นของเหลวใส ทำหน้าที่เป็นสารเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ผลิตโดยบริษัท Lab Scan Asia Co., Ltd. ประเทศไทย

5. ไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane, $CHCl_3$) น้ำหนักโมเลกุล 119.38 กรัม/โมล ความบริสุทธิ์ 99% จุดเดือด 61.2 °C จุดหลอมเหลว -63.5 °C มีลักษณะเป็นของเหลวใส ทำหน้าที่เป็นสารเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ผลิตโดยบริษัท Lab Scan Asia Co., Ltd. ประเทศไทย

6. โทลูอีน (toluene $C_6H_5CH_3$) น้ำหนักโมเลกุล 92.14 กรัม/โมล ความบริสุทธิ์ 99% จุดเดือด 110.6 °C จุดหลอมเหลว -93 °C มีลักษณะเป็นของเหลวใส ทำหน้าที่เป็นสารเคมี เพื่อทดสอบสัดส่วนการขยายตัว หรือ Swelling ratio ผลิตโดยบริษัท Lab Scan Asia Co., Ltd. ประเทศไทย

7. อะซิโตน (acetone, CH_3COCH_3) น้ำหนักโมเลกุล 58.08 กรัมต่อโมล ความบริสุทธิ์ 99% จุดเดือด 56.53 °C จุดหลอมเหลว -94.9 °C มีลักษณะเป็นของเหลวใส ผลิตโดยบริษัท J.T.Baker Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

1. แผ่นกระจก สำหรับเตรียมฟิล์มบาง

2. บีกเกอร์ขนาดต่างๆ
3. มีดปาดฟิล์ม (casting knife)
4. เครื่องกวนผสมสารเคมีกับน้ำยาง ผลิตโดยบริษัท MERIT TECH Co., Ltd
5. ใบพัดกวนน้ำยางผสมสารเคมี ชนิด 4 ใบพัด
6. ช้อนตักสาร
7. กระดาษชั่งสาร
8. ขวดแก้วขนาดเล็กพร้อมฝาปิด
9. กระจุกพลาสติกขนาดเล็ก สำหรับใส่น้ำยาง
10. อุปกรณ์พื้นฐานอื่นๆ เช่น มีด คัตเตอร์ กรรไกร ถุงเก็บตัวอย่าง
11. เครื่องชั่งสาร เป็นเครื่องชั่งระบบดิจิทัล มี 2 แบบ คือทศนิยม 2 ตำแหน่งและ 4 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Mettler Co., Ltd
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ผลิตโดยบริษัท Jeol รุ่น JSM-5200 LV
13. ตู้อบอากาศร้อน (Hot Air Oven) มีพัดลมเป่ากระจายความร้อนเพื่อควบคุมให้สม่ำเสมอ สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงสุด 250 °C ผลิตโดยบริษัท Memmert Co., Ltd ประเทศเยอรมันนี รุ่น D06061
14. เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่น Gammacell 220 Excel ที่ศูนย์ฉายรังสีแกมมา สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทท.) กทม.
15. ระบบลำแสงซินโครตรอน สำหรับเทคนิค X-ray Lithography (X-ray Lithography, XRL) beamline 6 ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเตรียมน้ำยางธรรมชาติและสารเคมี ก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์

ในการเตรียมตัวอย่างยางซึ่งเป็นน้ำยาง เนื่องจากมีปริมาณน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณในหน่วย phr ก่อนที่จะชั่งสารเคมีแต่ละชนิดในหน่วยเป็นกรัมโดยคำนวณจากปริมาณเนื้อยางแห้งที่อยู่ในน้ำยาง หลังจากนั้นทุกหัวข้อจะดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การเตรียมน้ำยางธรรมชาติสำหรับทำการวัลคาไนซ์

เตรียมน้ำยางจำนวน 166.67 กรัม จะได้น้ำยางที่มีเนื้อยาง 100 phr หลังจากนั้นชั่งสารเคมีตามสูตรที่ได้กำหนดไว้ดังนี้

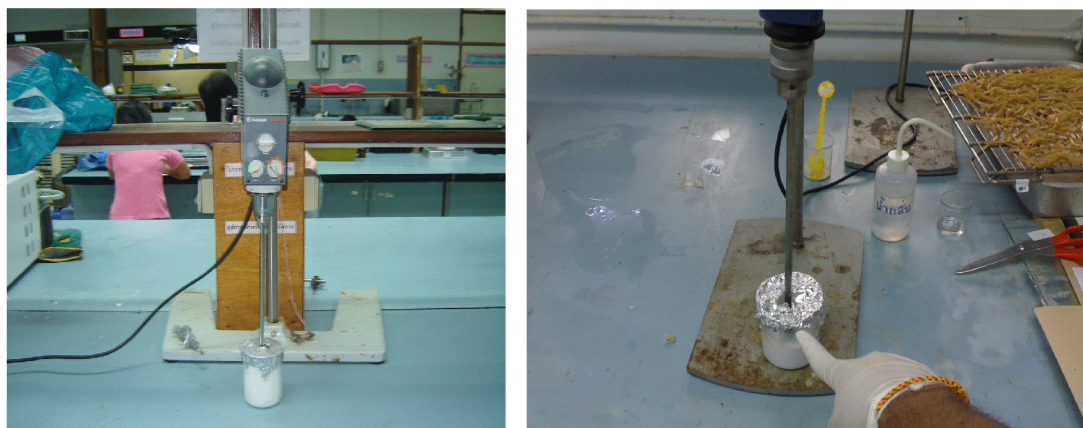
ตารางที่ 3.1 สูตรน้ำยางธรรมชาติผสมสารเคมี

สารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)	น้ำหนักเปียก (g)
60% Latex	100	166.67
n-BA	5	5
C ₂ Cl ₄	5	5
CHCl ₃	5	5

โดยเตรียมน้ำยางตามสูตรประมาณ 2.5 เท่า ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ในขั้นตอนการเติม n-BA ให้หยดอย่างช้าๆ ทีละหยด เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางเหนียว (Parinya and Makuuchi, 1990) จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนผสมสารเคมีกับน้ำยางจนครบตามสูตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ค้างคืนที่อุณหภูมิห้อง สำหรับน้ำยางธรรมชาติทั้งชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) และแอมโมเนียสูง (HA)

ตารางที่ 3.2 ลำดับการผสมสารเคมี

ลำดับการผสมสารเคมี	เวลา (นาที)	เวลาสะสม (นาที)
1. เติม n-BA	1	1
2. เมื่อผ่านไป 5 นาที เติม C ₂ Cl ₄	1	7
3. เมื่อผ่านไป 5 นาที เติม CHCl ₃	1	13



รูปที่ 3.1 ชุดกวนน้ำยางผสมสารเคมี

3.3.2 กระบวนการวัลคาไนซ์

3.3.2.1 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน

เพื่อหาปริมาณสารเซนซิไทเซอร์และค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยรังสีแกมมา โดยได้รับปริมาณรังสี 10 kGy โดยใช้เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่น Gammacell 220 Excel ที่ศูนย์ฉายรังสีแกมมา สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) กทม. (มีอัตราการฉายรังสี 10 kGy/h ซึ่งมาจากการสลายตัวของสาร ^{60}Co แล้วสลายตัวให้รังสีแกมมา พลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV)

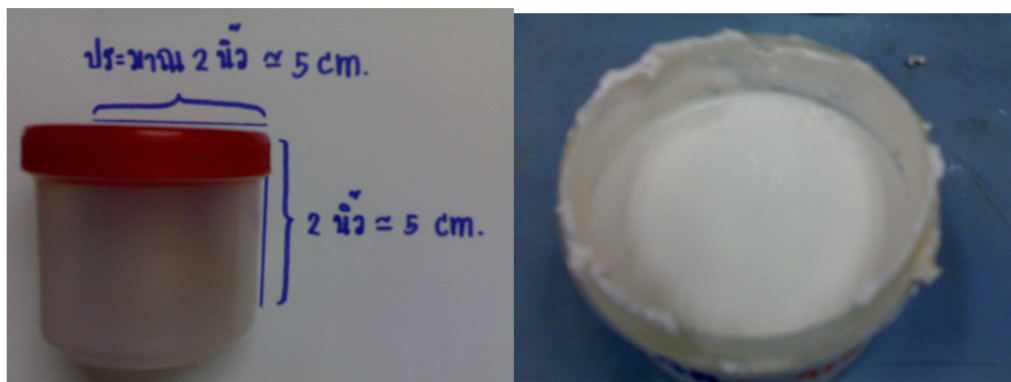
1. นำน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียที่แตกต่างกัน ทั้งชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) และแอมโมเนียสูง (HA) ตามสูตรที่ได้กำหนดไว้ บรรจุลงผลิตภัณฑ์ โดยใช้กระปุกพลาสติกขนาดเล็ก ประมาณ 70 กรัม เพื่อให้น้ำยางได้รับปริมาณรังสีอย่างทั่วถึง

ตารางที่ 3.3 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี
สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	LAPn _{2.5}	LAPn ₅	LAPn _{7.5}	LAPn ₁₀
60% LA-Latex	100	100	100	100
n-BA	2.5	5	7.5	10

ตารางที่ 3.4 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี
สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	HAPn _{2.5}	HAPn ₅ C ₅	HAPn _{7.5}	HAPn ₁₀
60% HA-Latex	100	100	100	100
n-BA	2.5	5	7.5	10



รูปที่ 3.2 กระจุกพลาสติกขนาดเล็ก สำหรับใส่น้ำยาง
สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน

2. นำไปฉายรังสีแกมมาให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 10 kGy โดยที่สำหรับกรณีนี้ เราศึกษาการฉายรังสีแกมมาให้ได้รับปริมาณรังสีเพียงค่าเดียว เพื่อต้องการเปรียบเทียบสมบัติของการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน โดยมีอัตราการรับรังสีประมาณ 10 kGy/hr

3.3.2.2 กระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา

เพื่อหาปริมาณรังสีแกมมาที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง

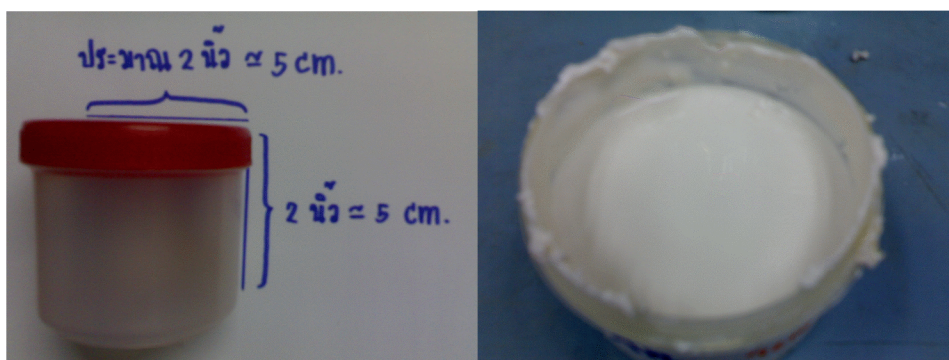
1. นำน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียที่แตกต่างกัน ทั้งชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) และแอมโมเนียสูง(HA) ตามสูตรที่ได้กำหนดไว้ บรรจุลงผลิตภัณฑ์ โดยใช้กระจุกพลาสติกขนาดเล็ก ประมาณ 70 กรัม เพื่อให้น้ำยางได้รับปริมาณรังสีอย่างทั่วถึง

ตารางที่ 3.5 สูตรน้ำยางธรรมชาติแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี
สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	LAPn ₅	LAPn ₅ C ₅	LAPn ₅ CH ₅	LAPn ₅ C ₅ CH ₅
60% LA-Latex	100	100	100	100
n-BA	5	5	5	5
C ₂ Cl ₄	-	5	-	5
CHCl ₃	-	-	5	5

ตารางที่ 3.6 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี
สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	HAPn ₅	HAPn ₅ C ₅	HAPn ₅ CH ₅	HAPn ₅ C ₅ CH ₅
60% HA-Latex	100	100	100	100
n-BA	5	5	5	5
C ₂ Cl ₄	-	5	-	5
CHCl ₃	-	-	5	5



รูปที่ 3.3 กระจุกพลาสติกขนาดเล็ก สำหรับใส่น้ำยาง
สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา

2. ฉายรังสีแกมมาในปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน โดยที่สำหรับกรณี sensitizer ชนิดเดียว นำไปฉายรังสีแกมมาให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 10 , 12 , 14 , 16 และ 18 kGy ตามลำดับ ส่วนกรณี sensitizer หลายชนิด นำไปฉายรังสีแกมมาให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 14 , 16 , 18 , 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยมีอัตราการรับรังสีประมาณ 10 kGy/hr



รูปที่ 3.4 เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่นGammacell 220 Excel ที่ศูนย์ฉายรังสีแกมมา สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทท.)

3.3.2.3 กระบวนการวัดค่าในซึ่ด้วยการฉายแสงซินโครตรอน

เพื่อหาปริมาณแสงซินโครตรอนที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง

1. นำน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียที่แตกต่างกัน ทั้งชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) และแอมโมเนียสูง(HA) ตามสูตรที่ได้กำหนดไว้ บรรจุลงผลิตภัณฑ์ โดยใช้ถุงพลาสติกขนาดเล็ก (หนาประมาณ 70 ไมโครเมตร) โดยใช้ น้ำยางประมาณ 13-14 กรัม เพื่อให้ น้ำยางได้รับปริมาณรังสีอย่างทั่วถึง

ตารางที่ 3.7 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน

ส่วนผสม (phr)	สูตร
	$LAPn_5C_5CH_5$
60% LA-Latex	100
n-BA	5
C_2Cl_4	5
$CHCl_3$	5

ตารางที่ 3.8 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน

ส่วนผสม (phr)	สูตร
	$HAPn_5C_5CH_5$
60% HA-Latex	100
n-BA	5
C_2Cl_4	5
$CHCl_3$	5



รูปที่ 3.5 ถุงพลาสติกขนาดเล็ก (หนาประมาณ 70 ไมโครเมตร) เพื่อใส่น้ำยาง สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน



รูปที่ 3.6 การติดตั้งสารตัวอย่าง ก่อนทำการทดลอง
สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน



รูปที่ 3.7 การติดตั้งสารตัวอย่าง ภายในเครื่องฉายแสงซินโครตรอน
สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน

2. ฉายแสงซินโครตรอนในปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน โดยที่สำหรับกรณี sensitizer หลายชนิด นำไปฉายแสงซินโครตรอนให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0 , 0.5 , 3.5 , 6.5 , 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการทดลองของโครงสร้างระบบลำเลียงแสง BL-6 (X-ray Lithography, XRL) ในส่วนของการอบรังสีวัสดุ (material X-Ray exposure)



รูปที่ 3.8 ลักษณะเครื่องฉายแสงซินโครตรอน
ภายใต้สภาวะการทดลองของโครงสร้างระบบลำแสง BL-6 (X-ray Lithography, XRL)
ในส่วนของ การอบรังสีวัสดุ (material X-Ray exposure)



รูปที่ 3.9 ลักษณะห้องฉายแสงซินโครตรอน
ภายใต้สภาวะการทดลองของโครงสร้างระบบลำแสง BL-6 (X-ray Lithography, XRL)

3.3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง

3.3.3.1 การขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง

ส่วนที่ 1 : เพื่อหาปริมาณสารเซนซิไทเซอร์และค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง

นำน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด ทั้งชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) และแอมโมเนียสูง (HA) เฉพาะสูตรจากข้อ 3.3.2.1 มาทำเป็นแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง โดยเทลงบนแผ่นกระจก แล้วปาดด้วยมีดปาดฟิล์ม ซึ่งใช้น้ำยางประมาณ 20 g ทิ้งไว้ให้แห้งจนใสที่อุณหภูมิห้อง ($20^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นลอกแผ่นฟิล์มยางออก แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งก่อนนำไปตากที่อุณหภูมิห้อง และอบต่อที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง) , 50 , 60 , 70 , 80 และ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ส่วนที่ 2 : เพื่อหาค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในกรณีที่ใช้สาร sensitizer ชนิดเดียวและหลายชนิด ผสมกัน สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์

นำน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด ทั้งชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) และแอมโมเนียสูง (HA) เฉพาะสูตรจากข้อ 3.3.2.2 และ 3.3.2.3 ที่ผ่านการฉายรังสีแล้ว มาทำเป็นแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง เช่นเดียวกับวิธีการในส่วนที่ 1 แต่กรณีที่เป็นน้ำยางชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) อบที่อุณหภูมิ 80°C และกรณีที่เป็นน้ำยางชนิดแอมโมเนียสูง (HA) อบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ภายหลังจากผ่านการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางทั้ง 2 ส่วนนั้น จะนำแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง มาทดสอบสมบัติทางกายภาพต่อไป



รูปที่ 3.10 การปาดน้ำยางด้วย casting knife



รูปที่ 3.11 แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางที่ผ่านการอบ

3.3.3.2 สมบัติการบวมพอง (Swelling)

โดยวิธีการ คือ นำแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางมาตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยตัดให้มีขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ หลังจากนั้นนำมาแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ($20 - 25^\circ\text{C}$) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง หลังจากนั้นนำสารตัวอย่างมาคำนวณตามสมการ ดังนี้

$$\text{Swelling Ratio} = 1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right) \left(\frac{w_2}{w_1}\right) - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)$$

- โดยที่ค่า d_1 คือ ความหนาแน่นของยาง เท่ากับ 0.9300 g/cm^3
 d_2 คือ ความหนาแน่นของสารละลายโทลูอีน เท่ากับ 0.8670 g/cm^3
 w_1 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างตอนเริ่มต้น
 w_2 คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างหลังจากแช่สารละลายโทลูอีน

โดยอัตราส่วนการบวมพองมีความหมายดังนี้

- ยางยังไม่วัลคาไนซ์ (Unvulcanized rubber), $Q > 15$
 ยางวัลคาไนซ์เล็กน้อย (Lightly vulcanized), $Q = 10-15$
 ยางวัลคาไนซ์ปานกลาง (Moderately vulcanized), $Q = 7-10$
 ยางวัลคาไนซ์เต็มที่ (Fully vulcanized), $Q < 7$

3.3.3.3 การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

เมื่อได้ค่าสัดส่วนการขยายตัว (Swelling ratio) จากการทดสอบสัดส่วนการขยายตัวแล้ว จึงนำค่ามาแทนในสมการ เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ต่อไป โดยอาศัยสมการ ดังนี้

$$\text{การคำนวณ} \quad \text{Cross-link density} = K \times Q^{-5/3}$$

$$\text{เมื่อค่า} \quad K = 4.71 \times 10^{20}$$



รูปที่ 3.12 แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ที่ตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ก่อนนำมาแช่ในสารละลายโทลูอีน



รูปที่ 3.13 แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ที่ถูกแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะหึ่งปิด คือ ขวดแก้วขนาดเล็กพร้อมฝาปิด

3.3.2.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

(เฉพาะยงที่ผ่านกระบวนการวัดคาบไชนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอนเท่านั้น)

นำแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางที่เตรียมได้ ทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM เตรียมชิ้นตัวอย่างโดย ตัดแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางเป็นชิ้นเล็กๆ แช่ในไนโตรเจนเหลวจากนั้นหักให้แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางขาดจากกัน หลังจากนั้นติดบนแท่งทองเหลือง ฉาบด้วยไอทองคำ แล้วถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-5200 LV

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน

เพื่อหาปริมาณสารเซนซิไทเซอร์และค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยรังสีแกมมา โดยได้รับปริมาณรังสี 10 kGy

4.1.1 น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA)

ตารางที่ 4.1 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี
สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	LAPn _{2.5}	LAPn ₅	LAPn _{7.5}	LAPn ₁₀
60% LA-Latex	100	100	100	100
n-BA	2.5	5	7.5	10

ตารางที่ 4.2 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง

Hour	T (°C)	Swelling	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)
24	25	16.8000	4.2700
	50	15.8660	4.7100
	60	16.3110	4.5200
	70	16.4900	4.4300
	80	12.7100	6.8100
	90	17.8620	3.8900
48	25	16.9300	4.2200
	50	16.0510	4.6200
	60	16.5290	4.4200
	70	16.8120	4.2900
	80	12.8590	6.6700
	90	18.1050	3.8000
72	25	16.9940	4.1900
	50	16.1030	4.5900
	60	16.6200	4.3800
	70	16.9400	4.2300
	80	12.9230	6.6200
	90	18.1980	3.7700
96	25	17.0050	4.1900
	50	16.1220	4.5800
	60	16.6400	4.3700
	70	16.9770	4.2200
	80	12.9390	6.6100
	90	18.2220	3.7600
120	25	17.0130	4.1900
	50	16.1340	4.5800
	60	16.6530	4.3700
	70	16.9910	4.2100
	80	12.9470	6.6000
	90	18.2360	3.7600

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.2

กรณีที่ 1 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.7100

กรณีที่ 2 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.8595

กรณีที่ 3 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

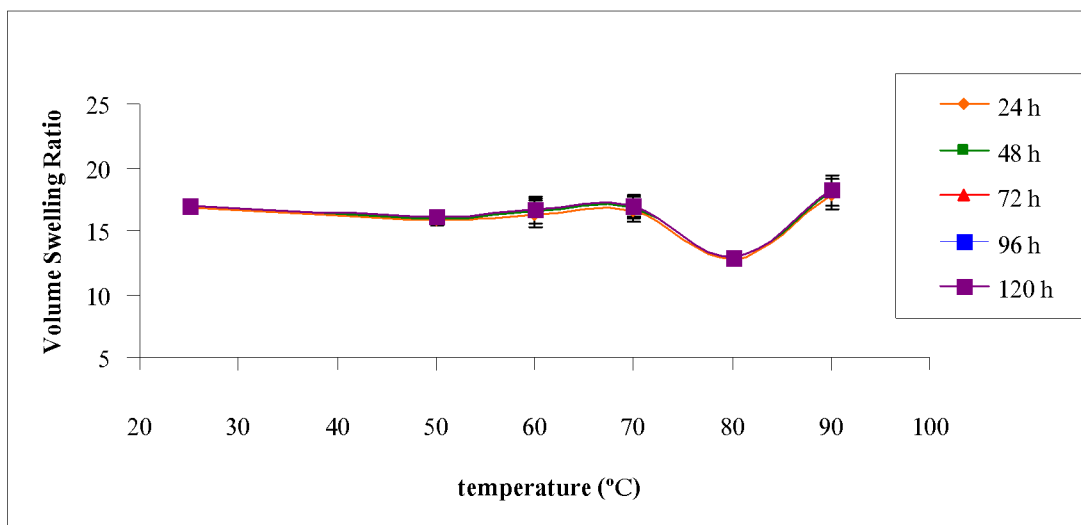
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.9231

กรณีที่ 4 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.9388

กรณีที่ 5 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.9472



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.1

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.7100

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ใน

สารละลายโทลูอิน ภายใต้ภาวะปิด ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.2

กรณีที่ 1 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 6.8100×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 2 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 6.6700×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 3 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

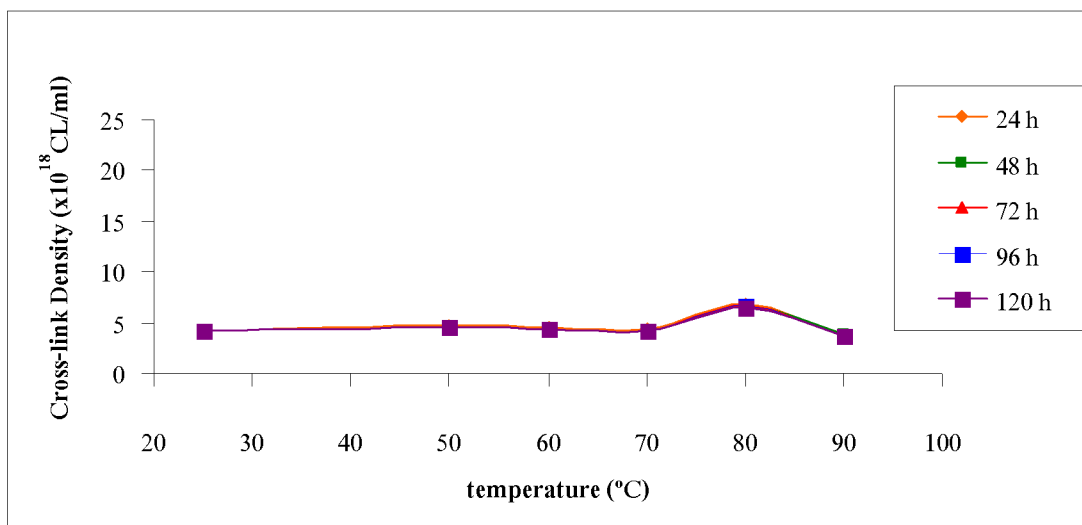
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 6.6200×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 4 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 6.6100×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 5 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 6.6000×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n_{2.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n_{2.5} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.2

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 6.8100×10^{18} CL/ml

ตารางที่ 4.3 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง

Hour	T (°C)	Swelling	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)
24	25	15.1200	5.1000
	50	13.8900	5.8800
	60	13.6200	6.1400
	70	12.5800	6.9400
	80	10.9600	8.7100
	90	14.8200	5.2900
48	25	15.2200	5.0300
	50	14.0600	5.7600
	60	13.8400	5.9800
	70	12.9900	6.5800
	80	10.9900	8.6800
	90	15.0500	5.1600
72	25	15.2900	5.0000
	50	14.1300	5.7200
	60	13.9800	5.8800
	70	13.1600	6.4300
	80	11.1300	8.5000
	90	15.2400	5.0600
96	25	15.4500	4.9200
	50	14.1400	5.7100
	60	13.9900	5.8600
	70	13.1900	6.4100
	80	11.1500	8.4800
	90	15.2700	5.0400
120	25	15.4500	4.9100
	50	14.1500	5.7000
	60	14.0100	5.8500
	70	13.2100	6.3900
	80	11.1700	8.4500
	90	15.2800	5.0400

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.3

กรณีที่ 6 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 10.9620

กรณีที่ 7 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 10.9912

กรณีที่ 8 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

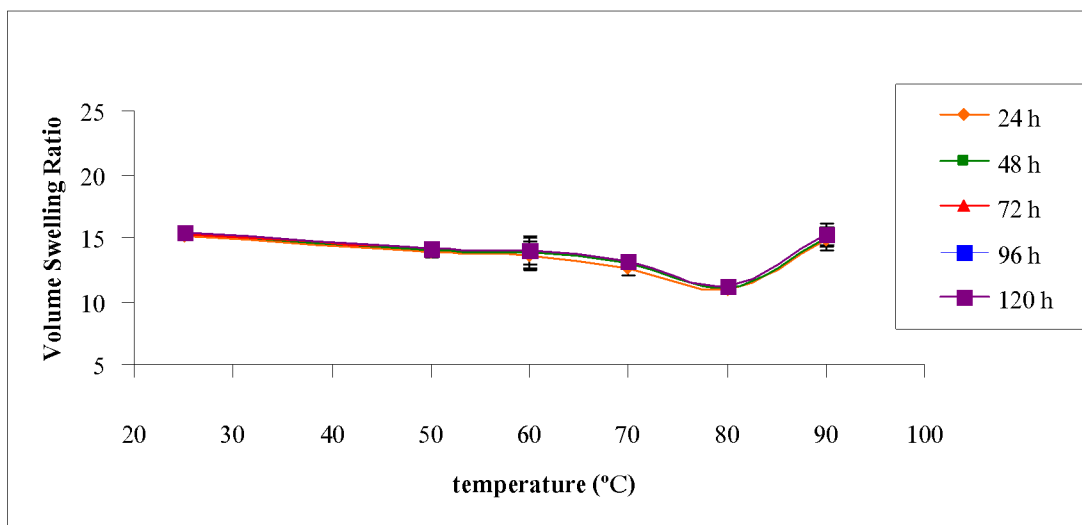
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 11.1310

กรณีที่ 9 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 11.1530

กรณีที่ 10 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 11.1712



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.3

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 10.9620

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ใน

สารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.3

กรณีที่ 6 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 8.7100×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 7 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 8.6800×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 8 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

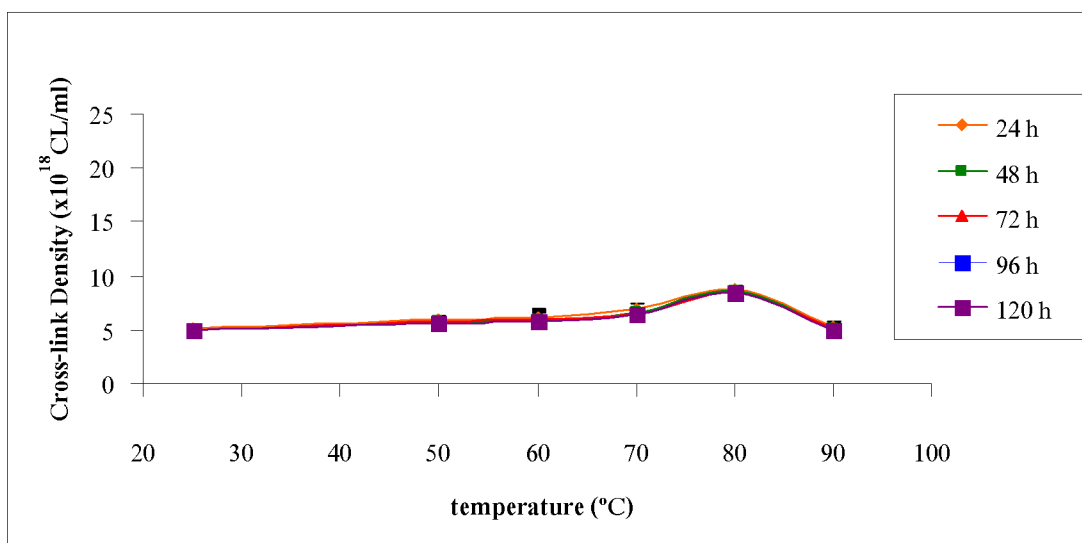
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 8.5000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 9 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 8.4800×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 10 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 8.4500×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.4

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 8.7100×10^{18} CL/ml

ตารางที่ 4.4 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง

Hour	T (°C)	Swelling	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)
24	25	13.8330	5.9100
	50	12.4940	7.0200
	60	12.4330	7.0600
	70	9.6630	10.8000
	80	9.5540	11.0000
	90	12.4940	7.0200
48	25	13.9610	5.8200
	50	12.6350	6.8900
	60	12.6390	6.8700
	70	9.9790	10.2000
	80	9.6950	10.7000
	90	12.7270	6.8100
72	25	14.0120	5.7800
	50	12.6800	6.8500
	60	12.6940	6.8200
	70	10.0710	10.0000
	80	9.7370	10.6000
	90	12.8360	6.7200
96	25	14.0260	5.7700
	50	12.6990	6.8300
	60	12.7130	6.8000
	70	10.1020	9.9900
	80	9.7520	10.6000
	90	12.8590	6.7000
120	25	14.0310	5.7700
	50	12.7050	6.8200
	60	12.7240	6.7900
	70	10.1150	9.9700
	80	9.7600	10.6000
	90	12.8710	6.6900

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.4

กรณีที่ 11 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.5538

กรณีที่ 12 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.6946

กรณีที่ 13 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

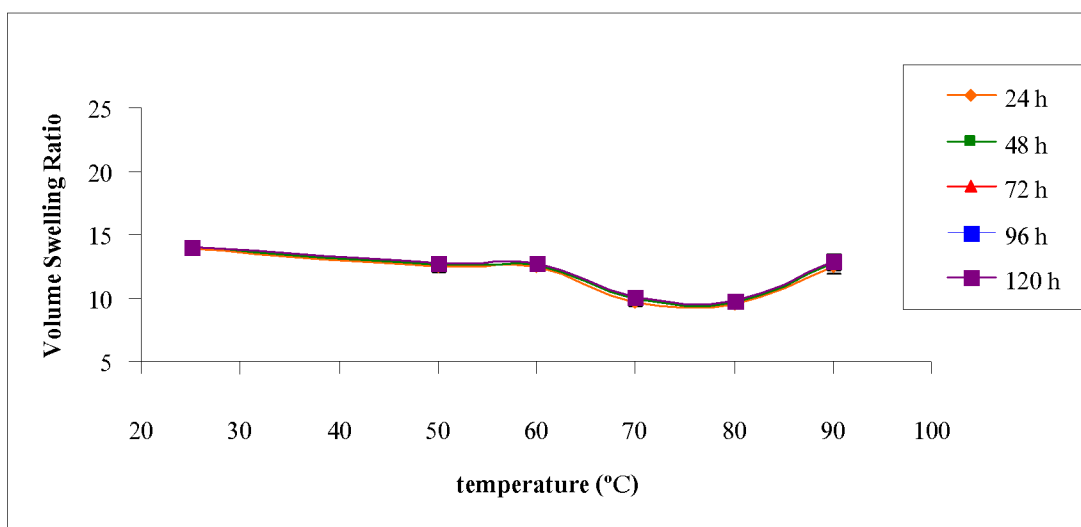
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.7375

กรณีที่ 14 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.7522

กรณีที่ 15 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.7598



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.5

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.5538

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn_{7.5} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ

25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.4

กรณีที่ 11 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 11.0000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 12 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.7000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 13 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

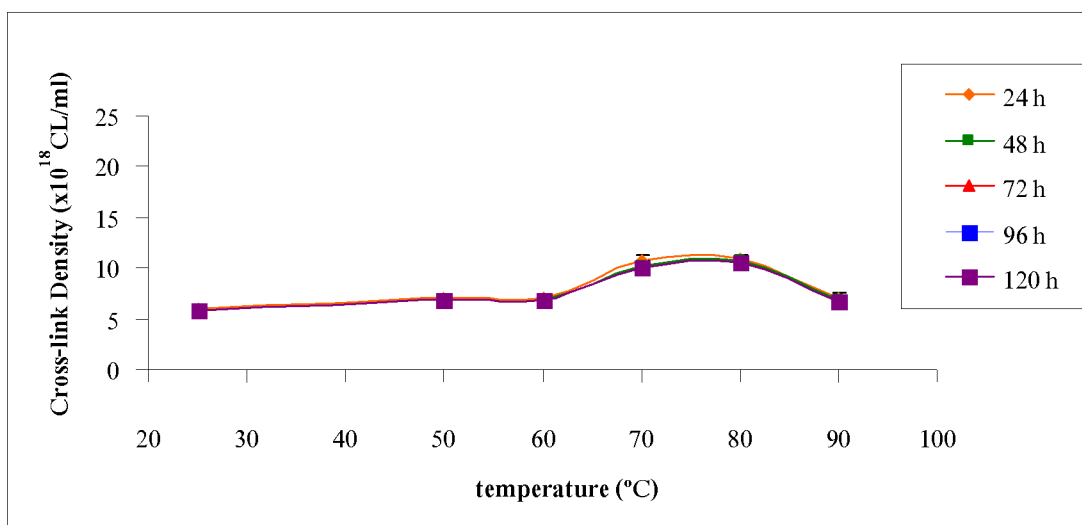
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.6000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 14 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.6000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 15 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.6000×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n_{7.5} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.6

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยง มากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 11.0000×10^{18} CL/ml

ตารางที่ 4.5 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง

Hour	T (°C)	Swelling	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)
24	25	12.4440	7.0500
	50	10.9000	8.8300
	60	10.2760	9.7000
	70	6.4100	21.3000
	80	8.0870	14.5000
	90	10.0400	10.1000
48	25	12.5510	6.9500
	50	11.0400	8.6400
	60	10.4830	9.3800
	70	6.7240	19.7000
	80	8.2330	14.0000
	90	10.2730	9.7200
72	25	12.5890	6.9100
	50	11.0760	8.5900
	60	10.5430	9.3000
	70	6.8080	19.3000
	80	8.2770	13.9000
	90	10.3470	9.6100
96	25	12.6020	6.9000
	50	11.0920	8.5700
	60	10.5630	9.2700
	70	6.8400	19.1000
	80	8.2920	13.9000
	90	10.3700	9.5700
120	25	12.6080	6.9000
	50	11.0970	8.5600
	60	10.5700	9.2600
	70	6.8460	19.1000
	80	8.2970	13.9000
	90	10.3780	9.5600

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n₁₀ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.5

กรณีที่ 16 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 6.4101

กรณีที่ 17 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 6.7240

กรณีที่ 18 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

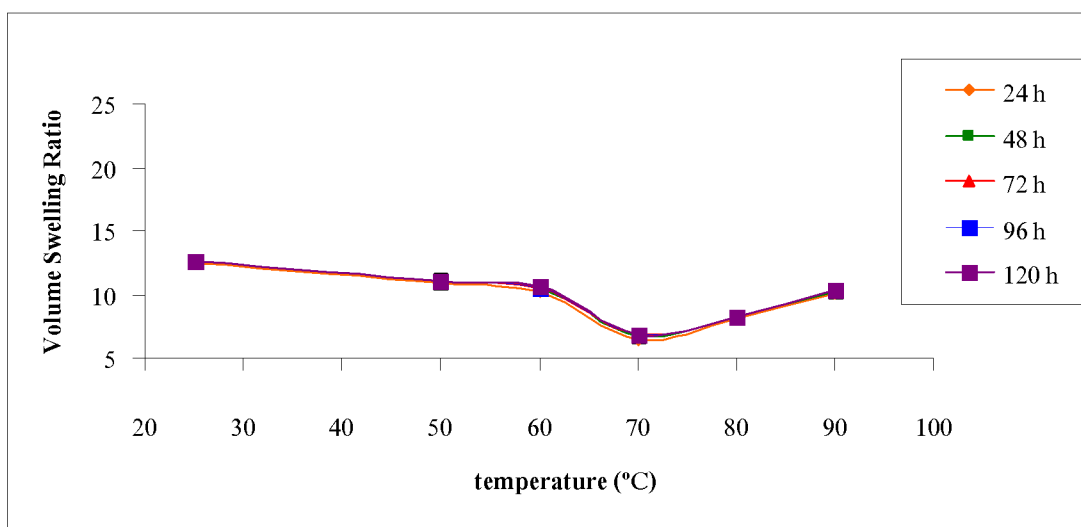
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 6.8082

กรณีที่ 19 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 6.8403

กรณีที่ 20 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_n₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 6.8465



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₁₀ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.7

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 6.4101

วิจารณ์ผลการทดลองสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร พบว่า ค่าการบวมพอง (Swelling) ที่ลดลงเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณสารเซนซิไทเซอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบ

สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_{n10} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.5

กรณีที่ 16 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_{n10} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 21.3000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 17 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_{n10} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 19.7000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 18 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_{n10} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

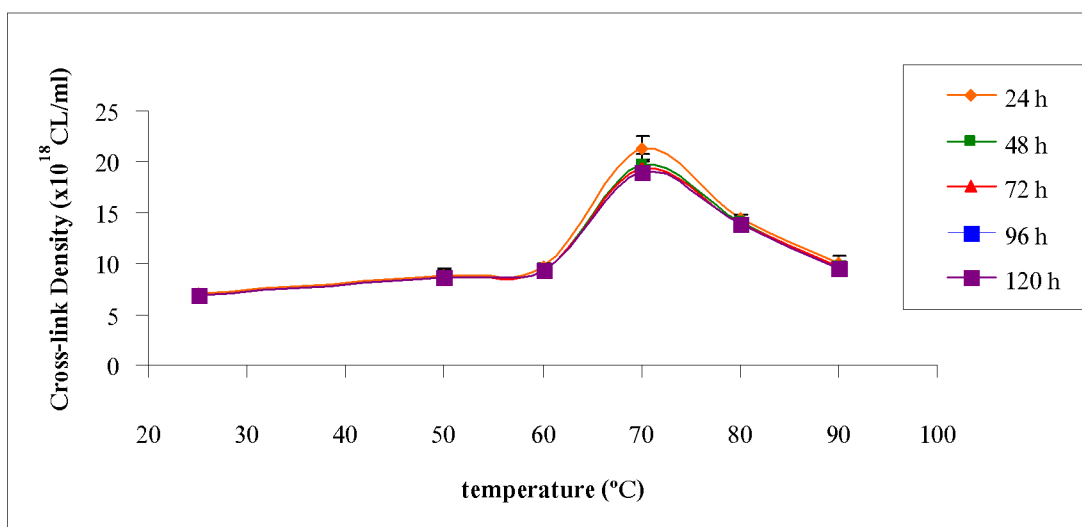
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 19.3000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 19 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAP_{n10} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 19.1000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 20 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 19.1000×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₁₀ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.8

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 70 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยง มากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 21.3000×10^{18} CL/ml

วิจารณ์ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร พบว่า ค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณสารเซนซิไทเซอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

4.1.2 น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)

ตารางที่ 4.6 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	HAPn _{2.5}	HAPn ₅ C ₅	HAPn _{7.5}	HAPn ₁₀
60% HA-Latex	100	100	100	100
n-BA	2.5	5	7.5	10

ตารางที่ 4.7 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_{2.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง

Hour	T (°C)	Swelling	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)
24	25	17.4510	4.0100
	50	14.2650	5.6200
	60	18.5610	3.6200
	70	17.8010	3.8800
	80	19.6520	3.3000
	90	20.6390	3.0400
48	25	17.7400	3.9100
	50	14.4830	5.4800
	60	18.8060	3.5400
	70	18.0280	3.8000
	80	19.9170	3.2200
	90	20.9030	2.9700
72	25	17.7870	3.8900
	50	14.5670	5.4300
	60	18.9130	3.5100
	70	18.1030	3.7800
	80	20.0580	3.1900
	90	21.0400	2.9400
96	25	17.8000	3.8800
	50	14.5870	5.4200
	60	18.9390	3.5000
	70	18.1210	3.7700
	80	20.0850	3.1800
	90	21.0670	2.9300
120	25	17.8000	3.8800
	50	14.5990	5.4100
	60	18.9500	3.5000
	70	18.1300	3.7700
	80	20.0990	3.1800
	90	21.0900	2.9300

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n_{2.5}}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.7

กรณีที่ 1 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n_{2.5}}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 14.2650

กรณีที่ 2 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n_{2.5}}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 14.4834

กรณีที่ 3 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n_{2.5}}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

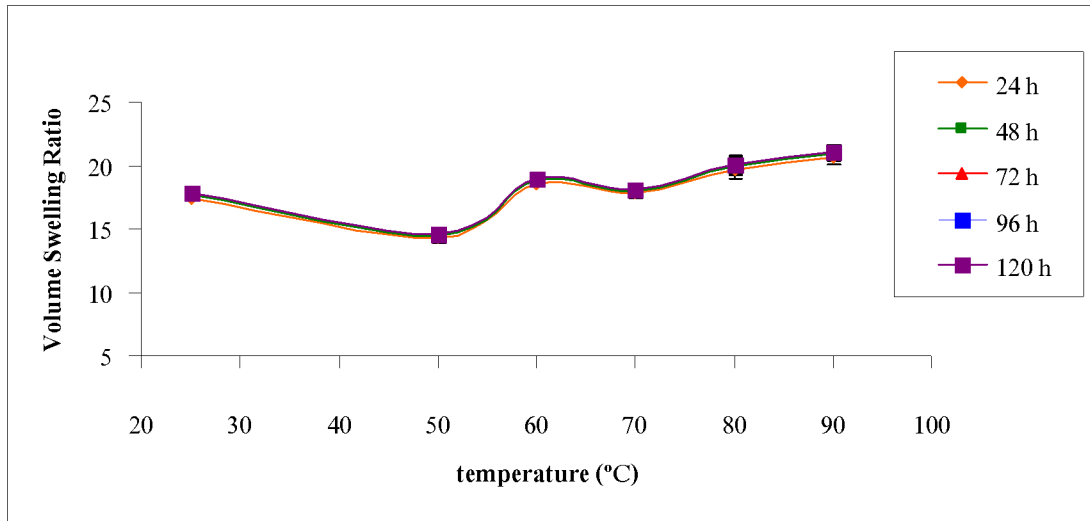
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 14.5672

กรณีที่ 4 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n_{2.5}}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 14.5868

กรณีที่ 5 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n_{2.5}}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 14.5986



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{2.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{2.5}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.9

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 14.2650

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{2.5}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ใน

สารละลายโทลูอิน ภายใต้ภาวะปิด ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.7

กรณีที่ 1 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{2.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 5.6200×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 2 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{2.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 5.4800×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 3 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{2.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

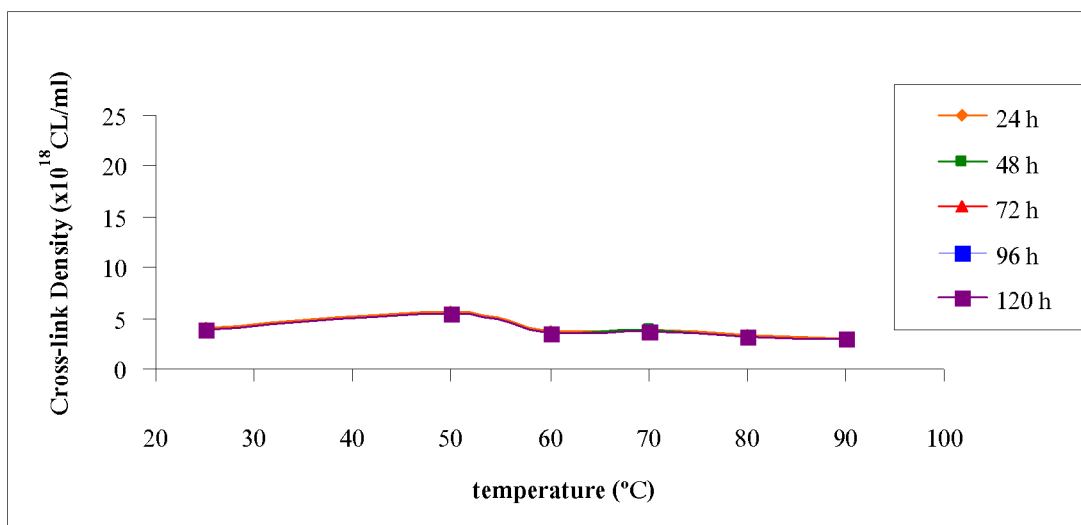
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 5.4300×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 4 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{2.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 5.4200×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 5 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{2.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอิน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 5.4100×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_{2.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลารวมทั้งหมด 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_{2.5}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.10

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยง มากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 5.6200×10^{18} CL/ml

ตารางที่ 4.8 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง

Hour	T (°C)	Swelling	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)
24	25	15.7600	4.7500
	50	11.6900	7.8300
	60	15.4800	4.9000
	70	15.3500	4.9700
	80	16.2900	4.5000
	90	17.1800	4.1200
48	25	15.8700	4.7000
	50	11.9500	7.5400
	60	15.7800	4.7500
	70	15.5200	4.8800
	80	16.4600	4.4300
	90	17.4300	4.0200
72	25	16.0000	4.6300
	50	12.0800	7.4100
	60	15.8500	4.7100
	70	15.7100	4.7800
	80	16.8600	4.2500
	90	17.5600	3.9700
96	25	16.0200	4.6300
	50	12.1100	7.3800
	60	15.8800	4.7000
	70	15.7400	4.7700
	80	16.8900	4.2400
	90	17.5800	3.9600
120	25	16.0200	4.6300
	50	12.1200	7.3700
	60	15.8900	4.6900
	70	15.7500	4.7600
	80	16.9100	4.2300
	90	17.6000	3.9600

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAP_n ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.8

กรณีที่ 6 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAP_n โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 11.6905

กรณีที่ 7 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAP_n โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 11.9538

กรณีที่ 8 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAP_n โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

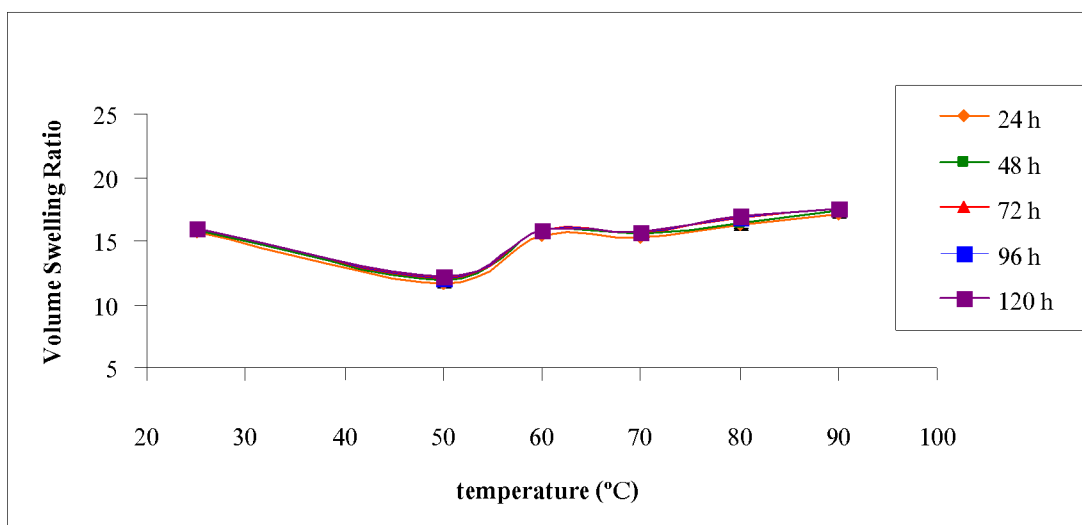
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.0844

กรณีที่ 9 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAP_n โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.1103

กรณีที่ 10 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAP_n โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.1193



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.11

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 11.6906

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากการทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่ง

แต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.8

กรณีที่ 6 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.8300×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 7 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.5400×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 8 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

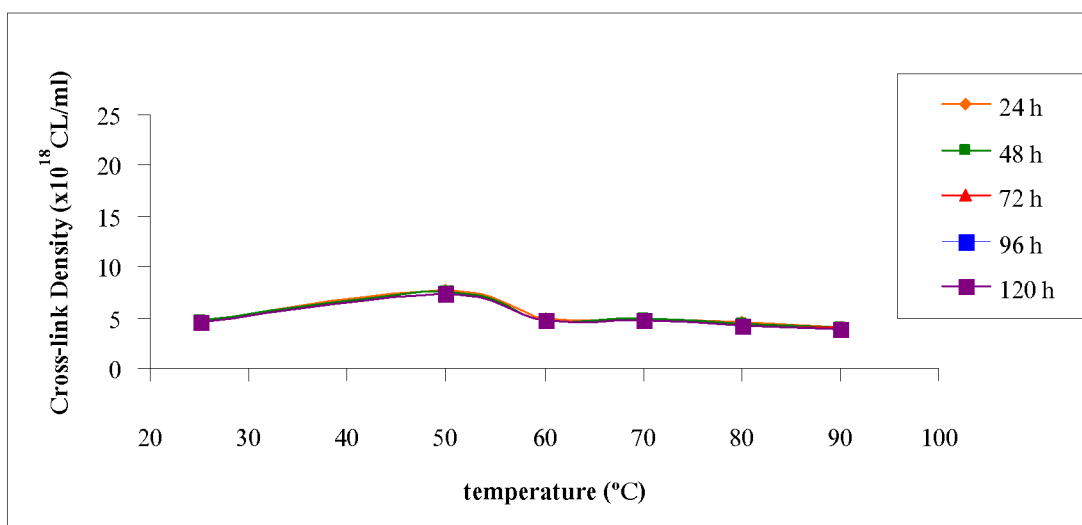
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.4100×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 9 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.3800×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 10 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.3700×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลารวมทั้งหมด 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.12

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.8300×10^{18} CL/ml

ตารางที่ 4.9 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 -120 ชั่วโมง

Hour	T (°C)	Swelling	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)
24	25	14.7290	5.3300
	50	9.6700	10.7000
	60	13.2530	6.3500
	70	13.5450	6.1200
	80	13.8800	5.8800
	90	14.6530	5.3700
48	25	14.8600	5.2600
	50	9.8750	10.4000
	60	13.4760	6.1800
	70	13.7330	5.9800
	80	14.1230	5.7100
	90	14.9060	5.2200
72	25	14.8970	5.2600
	50	9.9350	10.4000
	60	13.5390	6.1800
	70	13.7890	5.9800
	80	14.1960	5.7100
	90	14.9910	5.2200
96	25	14.9100	5.2300
	50	9.9560	10.2000
	60	13.5620	6.1100
	70	13.8080	5.9300
	80	14.2200	5.6500
	90	15.0160	5.1600
120	25	14.9150	5.2200
	50	9.9630	10.2000
	60	13.5710	6.1100
	70	13.8120	5.9300
	80	14.2330	5.6400
	90	15.0290	5.1500

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n,7.5}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.9

กรณีที่ 11 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n,7.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.6698

กรณีที่ 12 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n,7.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.8745

กรณีที่ 13 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n,7.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

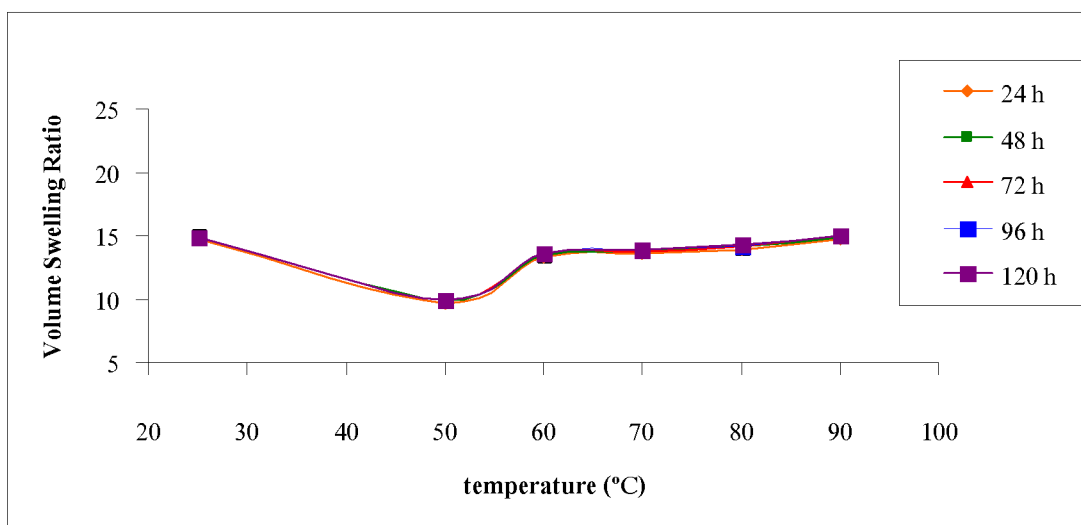
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.9351

กรณีที่ 14 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n,7.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.9558

กรณีที่ 15 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n,7.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.9634



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n_{7.5}}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAP_{n_{7.5}}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.13

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.6698

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_{7.5} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.9

กรณีที่ 11 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.7000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 12 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.4000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 13 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

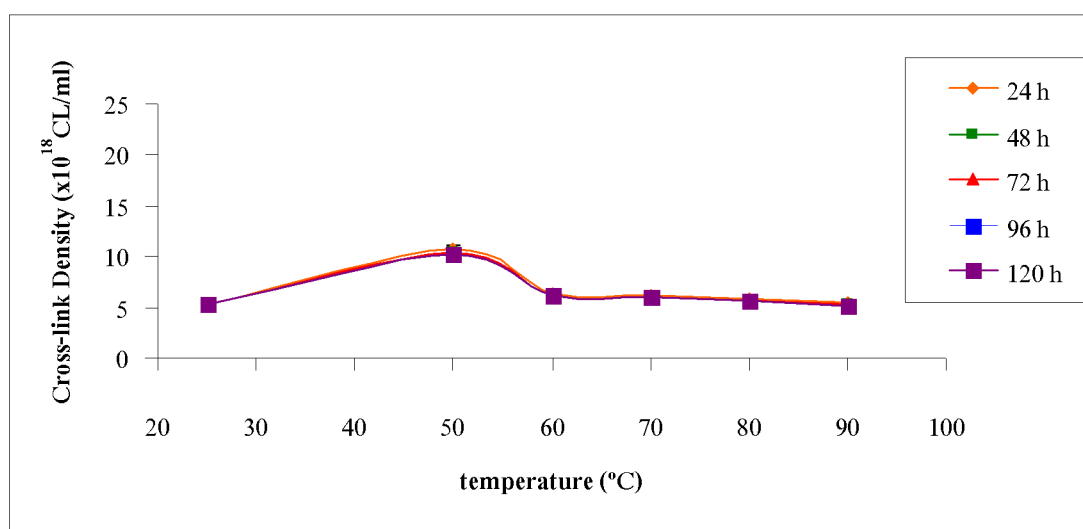
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.3000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 14 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.2000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 15 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_{7.5} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.2000×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_{7.5}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_{7.5}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.14

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.4000×10^{18} CL/ml

ตารางที่ 4.10 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₁₀ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง

Hour	T (°C)	Swelling	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)
24	25	13.3790	6.2700
	50	7.5910	16.1000
	60	10.9310	8.7800
	70	11.6540	7.8600
	80	11.3610	8.2100
	90	12.0020	7.4900
48	25	13.5070	6.1700
	50	7.7920	15.4000
	60	11.1560	8.4800
	70	11.8370	7.6600
	80	11.5680	7.9700
	90	12.2520	7.2400
72	25	13.5510	6.1300
	50	7.8520	15.2000
	60	11.2220	8.4000
	70	11.8950	7.6000
	80	11.6370	7.8900
	90	12.3310	7.1600
96	25	13.5630	6.1200
	50	7.8720	15.1000
	60	11.2440	8.3700
	70	11.9130	7.5800
	80	11.6610	7.8600
	90	12.3550	7.1400
120	25	13.5670	6.1200
	50	7.8800	15.1000
	60	11.2550	8.3600
	70	11.9220	7.5700
	80	11.6730	7.8500
	90	12.3680	7.1200

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.10

กรณีที่ 16 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.5912

กรณีที่ 17 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.7917

กรณีที่ 18 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

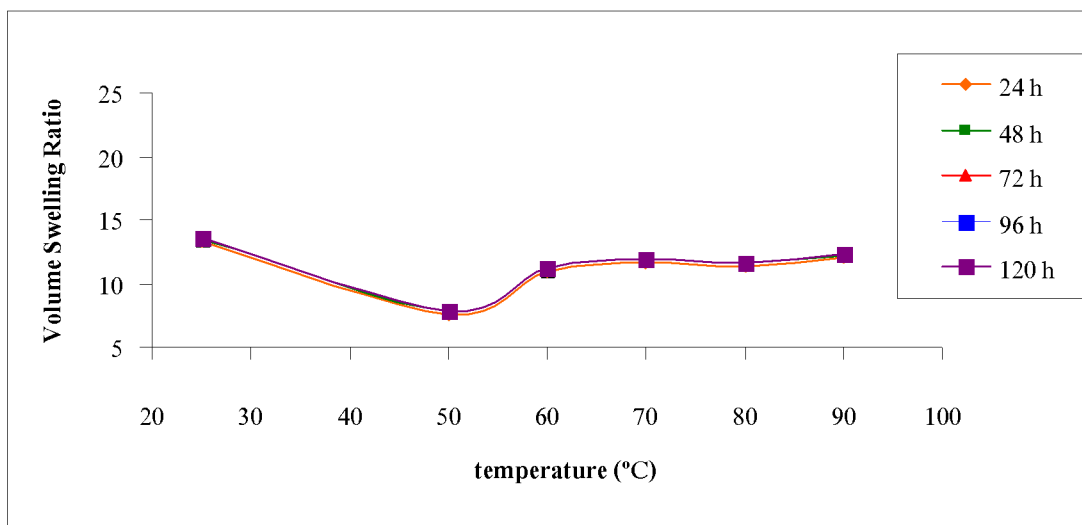
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.8519

กรณีที่ 19 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.8724

กรณีที่ 20 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.8802



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.15

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.5912

วิจารณ์ผลการทดลองสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร พบว่า ค่าการบวมพอง (Swelling) ที่ลดลงเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณสารเซนซิไทเซอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 - 120 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.10

กรณีที่ 16 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 16.1000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 17 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 15.4000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 18 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

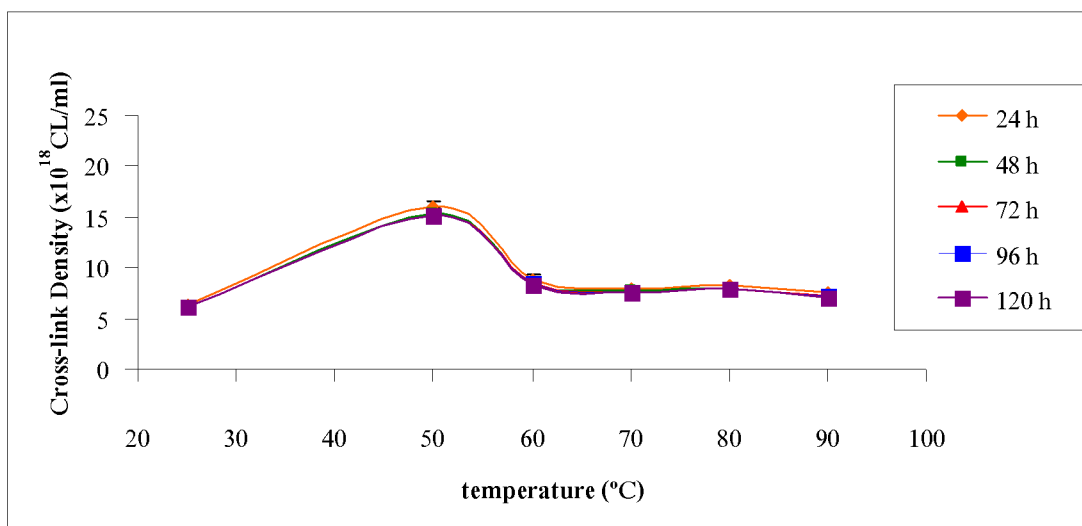
นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 15.2000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 19 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 15.1000×10^{18} CL/ml

กรณีที่ 20 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_{10}$ โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 15.1000×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAP_{n10} โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีนรวมทั้งหมด เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAP_{n10} ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25 (อุณหภูมิห้อง), 50, 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง รวมทั้งหมดเป็นเวลา 5 วัน ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามรูปที่ 4.16

นั่นคือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 16.1000×10^{18} CL/ml

วิจารณ์ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร พบว่า ค่าความหนาแน่นของ

การเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณสารเซนซิไทเซอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

4.2 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา

เพื่อหาปริมาณรังสีแกมมาที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง

4.2.1 น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA)

ตารางที่ 4.11 สูตรน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมา

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	LAPn ₅	LAPn ₅ C ₅	LAPn ₅ CH ₅	LAPn ₅ C ₅ CH ₅
60% LA-Latex	100	100	100	100
n-BA	5	5	5	5
C ₂ Cl ₄	-	5	-	5
CHCl ₃	-	-	5	5

ตารางที่ 4.12 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร

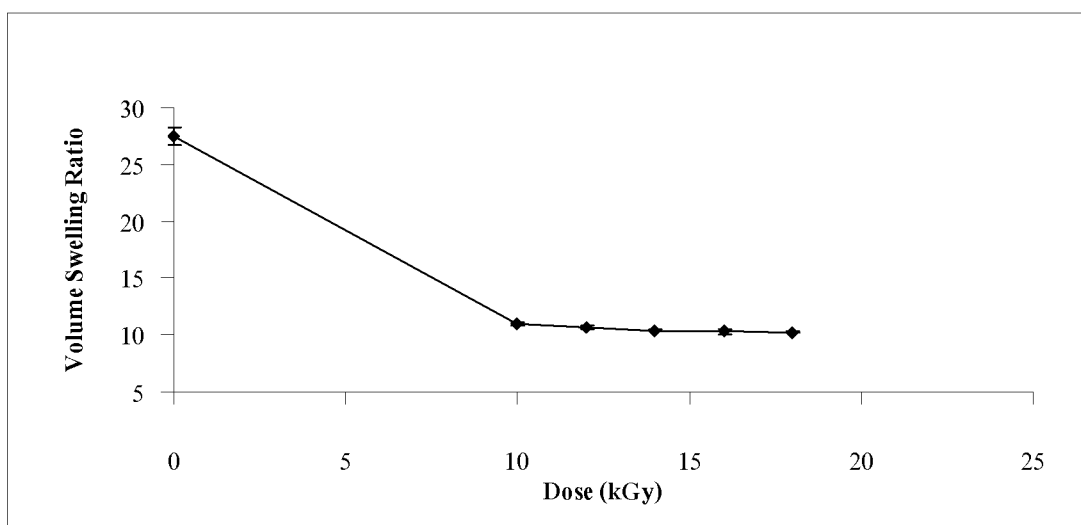
		Dose (kGy)							
		0	10	12	14	16	18	20	22
LAPn ₅	Swelling	27.5200	10.9600	10.6100	10.3700	10.2800	10.2200	-	-
	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)	1.8800	8.7100	9.2000	9.5600	9.6900	9.7900	-	-
LAPn ₅ C ₅	Swelling	27.1000	-	-	11.4700	10.8500	10.4100	9.9500	9.6200
	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)	1.9300	-	-	8.0700	8.8600	9.4800	10.2000	10.8000
LAPn ₅ CH ₅	Swelling	19.6300	-	-	11.0300	9.4000	8.0300	7.3800	7.2000
	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)	3.3000	-	-	8.6100	11.3000	14.6000	16.8000	17.6000
LAPn ₅ C ₅ CH ₅	Swelling	27.2300	-	-	12.8600	11.7700	10.6000	10.0400	8.7000
	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)	1.9100	-	-	6.6700	7.7400	9.2100	10.1000	12.8000

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 10, 12, 14, 16 และ 18 kGy ตามลำดับ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะหึ่ง ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.12

กรณีที่ 1 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 18 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 10.2200



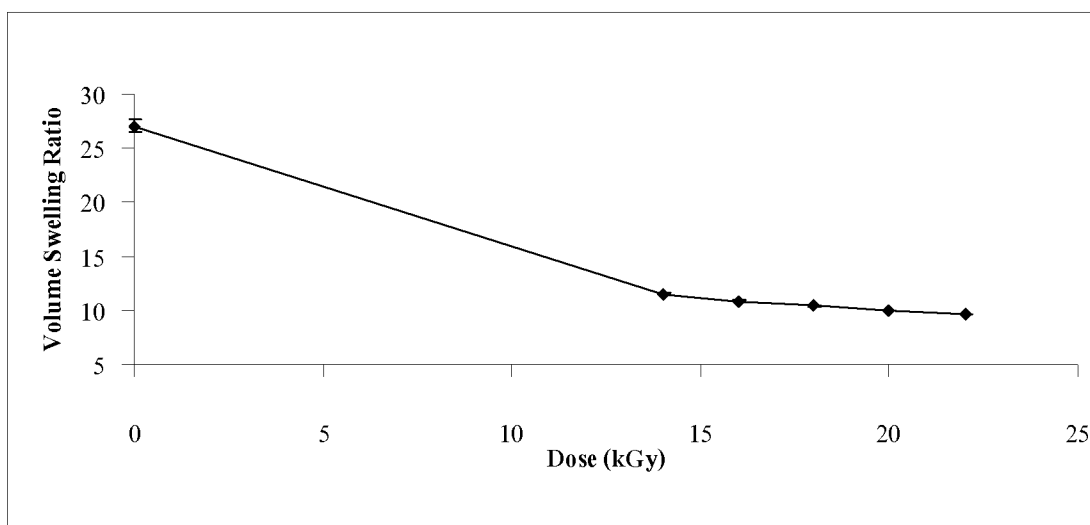
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้ปริมาณรังสีคือ 0, 10, 12, 14, 16 และ 18 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.17

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 18 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 10.2200 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 27.5200 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 37.1400 %

กรณีที่ 2 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.6200



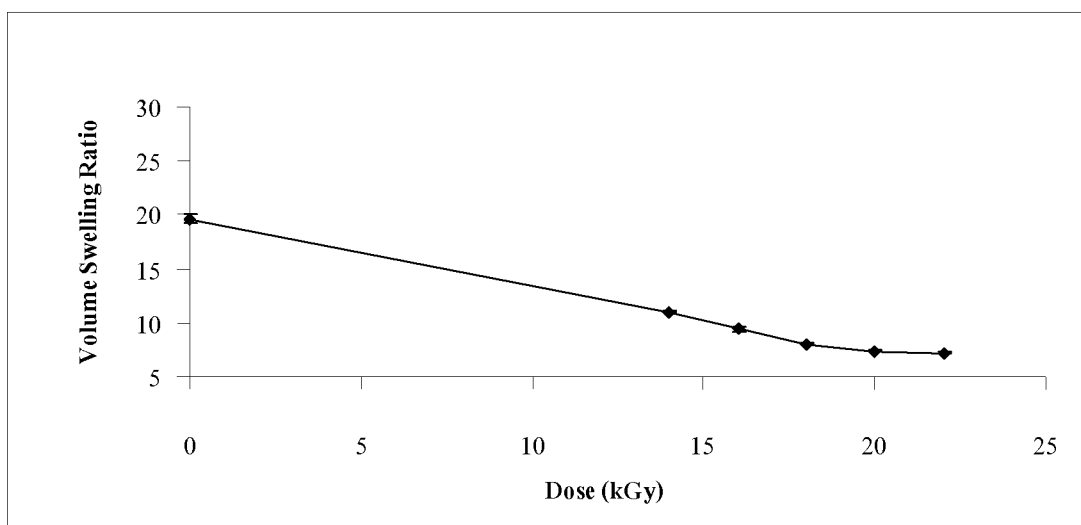
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5$

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้ปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.18

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 9.6200 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 27.10 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5$ สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 35.4982 %

กรณีที่ 3 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.2000



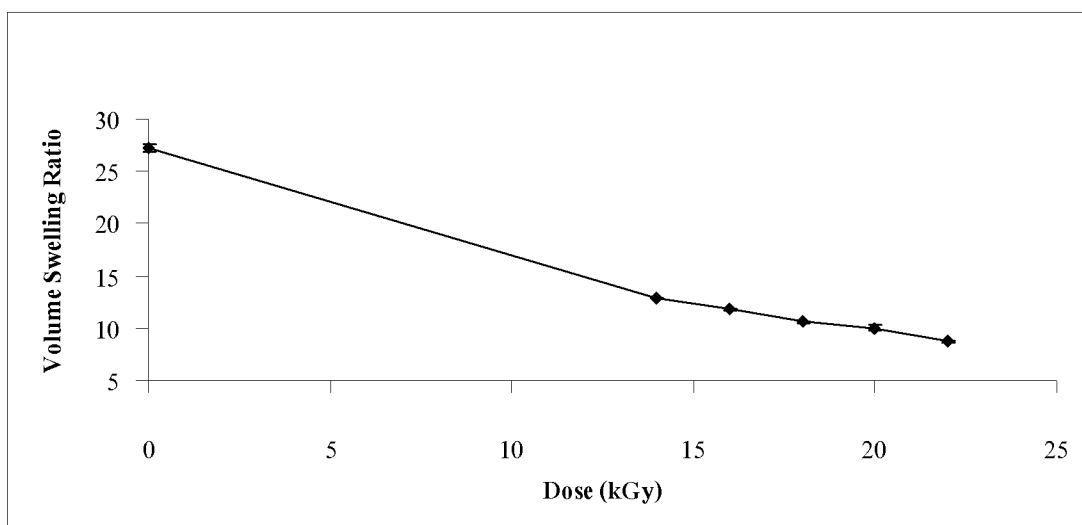
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมา กับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมา ให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.19

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.2000 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 19.6300 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$ สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 36.6786 %

กรณีที่ 4 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$

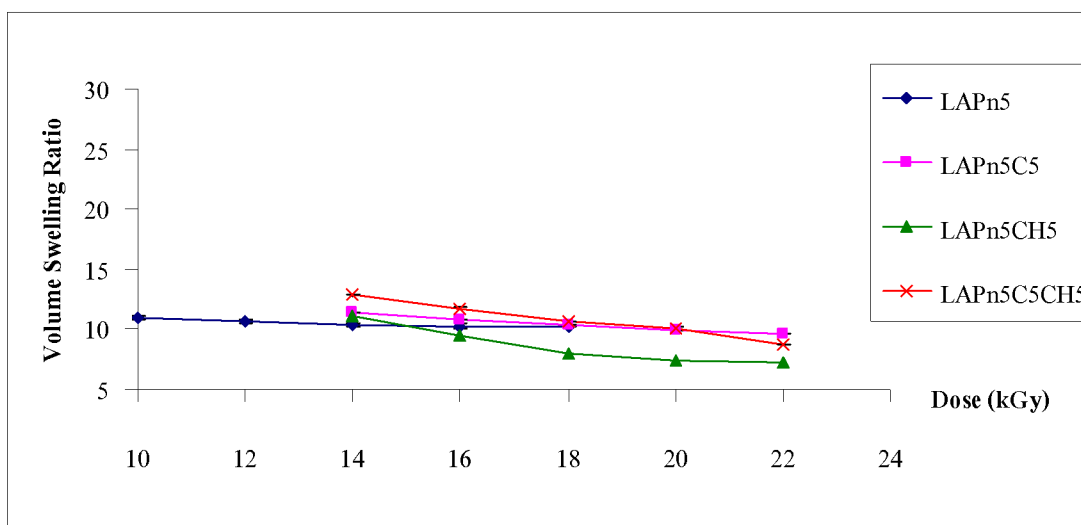
นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 8.7000



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมา กับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้ปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.20

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 8.7000 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 27.23 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$ สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 31.9501 %



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมา กับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

วิจารณ์ผลการทดลองสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร พบว่า ค่าการบวมพอง (Swelling) ที่ลดลงเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

แต่สำหรับกรณีน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) พบว่า สูตรที่มีสารเตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) ผสมอยู่ จะมีคุณสมบัติเพิ่มค่าการบวมพอง (Swelling) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) มีค่าลดลง ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารเตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) กับสารที่เอมที่ดี 0.013% และสารซิงค์ออกไซด์ 0.013% ซึ่งใช้เป็นสารรักษาสภาพในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ร่วมกับแอมโมเนีย 0.2% โดยศัพท์วิชาการทางการแพทย์ว่า LA – TZ ย่อมาจาก Low Ammonia – Tetramethyl – thiuram disulphide/Zinc oxide

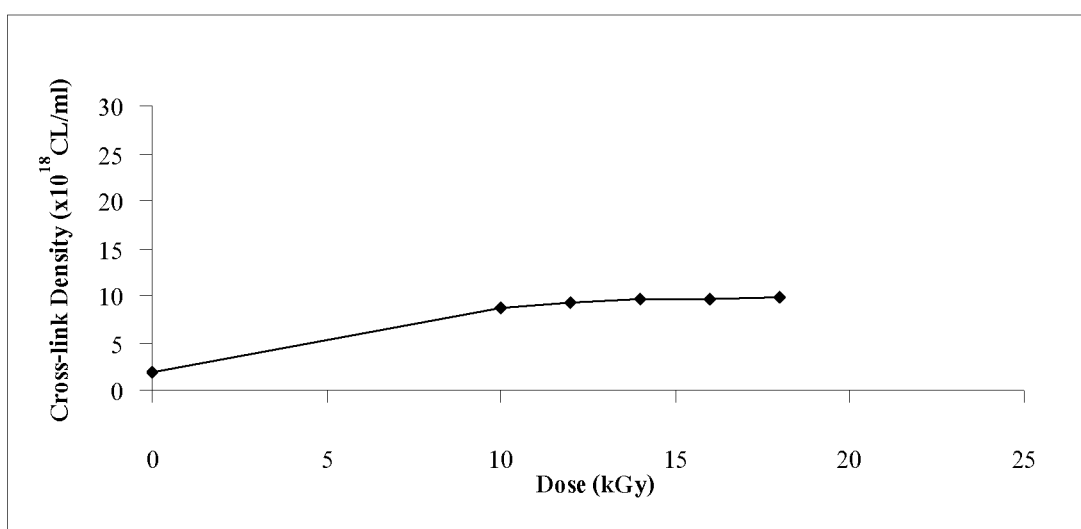
- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากการทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 10, 12, 14, 16 และ 18 kGy ตามลำดับ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็น

เวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.12

กรณีที่ 1 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 18 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 9.7600×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅

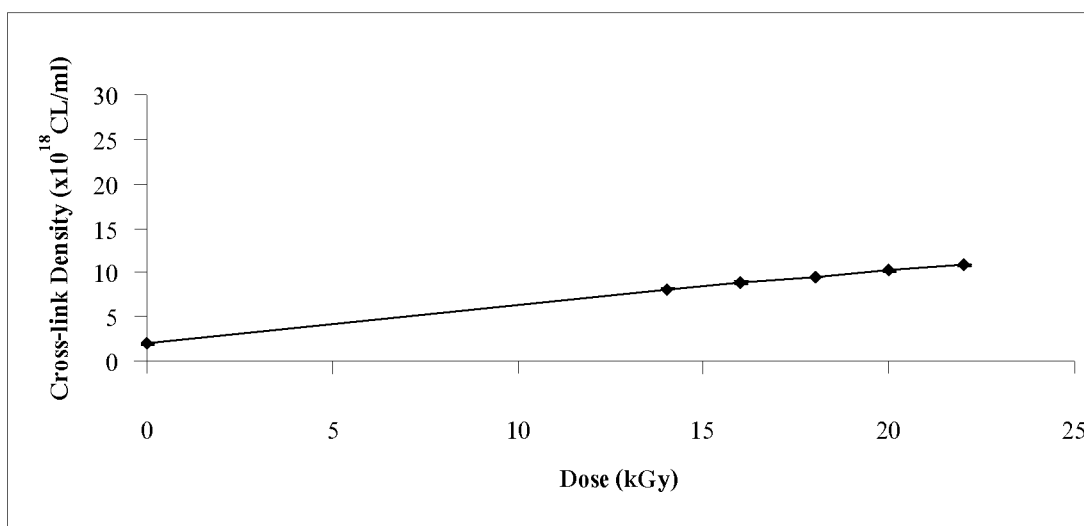
จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 10, 12, 14, 16 และ 18 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.22

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 18 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 9.7600×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของ

การเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่ามีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 1.8800×10^{18} CL/ml ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 519.1500 %

กรณีที่ 2 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.8000×10^{18} CL/ml



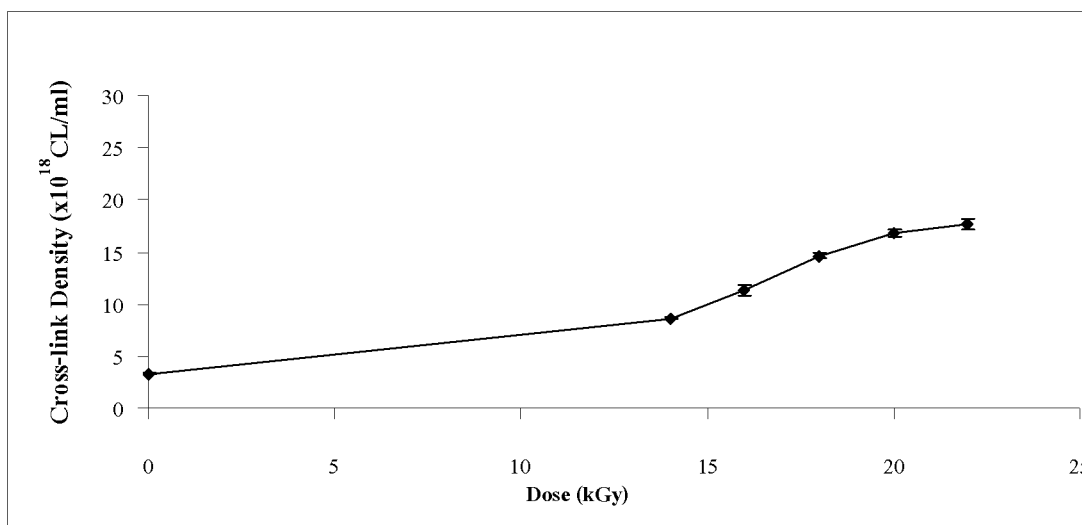
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.23

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 10.8000×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่ามีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 1.9300×10^{18} CL/ml ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5$ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 559.5855 %

กรณีที่ 3 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 17.6000×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$

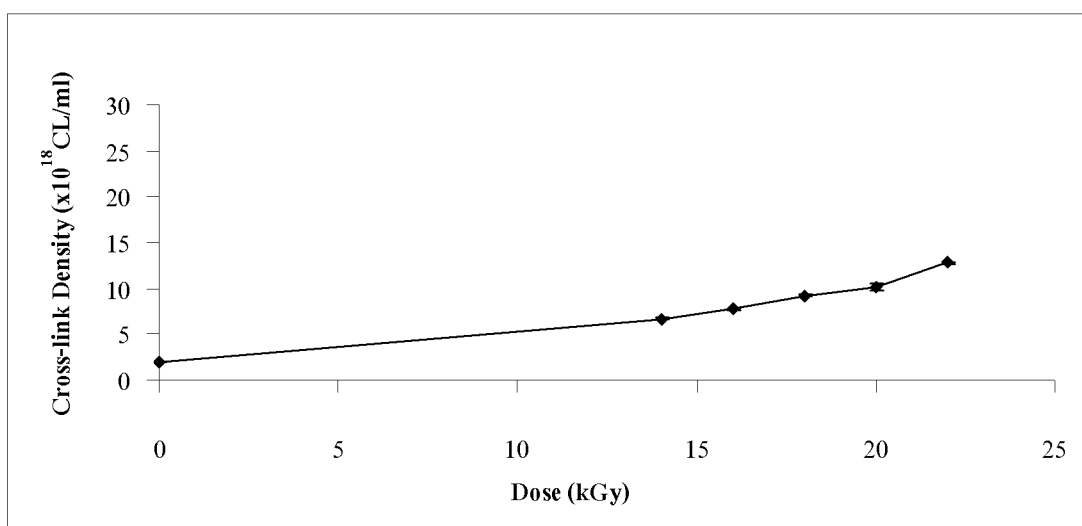
จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสี

แกมมาที่ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.24

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 17.6000×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่ามีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 3.3000×10^{18} CL/ml ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 533.3333 %

กรณีที่ 4 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

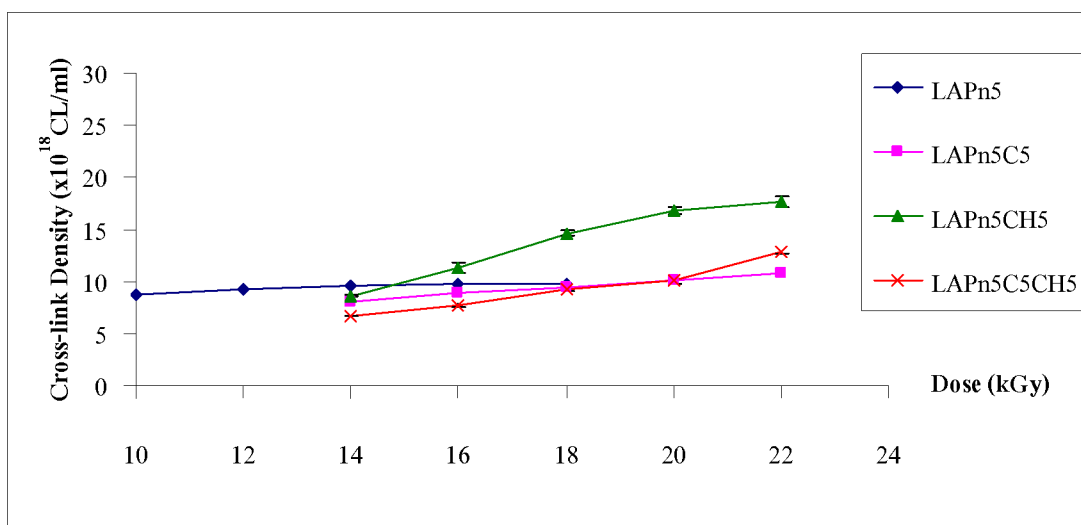
นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 12.8000×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅CH₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้ปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.25

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 12.8000×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 1.9100×10^{18} CL/ml ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅CH₅ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 670.1571 %



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

วิจารณ์ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร พบว่า ค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณรังสีแกมมาที่

เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

แต่สำหรับกรณีน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) พบว่า สูตรที่มีสารเตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) ผสมอยู่ จะมีคุณสมบัติเพิ่มค่าการบวมพอง (Swelling) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) มีค่าลดลง ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจาก การทำปฏิกิริยากันระหว่างสารสารเตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) กับสารที่เอมที่ตี 0.013% และสารซิงค์ออกไซด์ 0.013% ซึ่งใช้เป็นสารรักษาสภาพในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ร่วมกับแอมโมเนีย 0.2% โดยศัพท์วิชาการยางพาราใช้กันว่า LA – TZ ย่อมาจาก Low Ammonia – Tetramethyl – thiuram disulphide/Zinc oxide

4.2.2 น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)

ตารางที่ 4.13 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยการฉายรังสีแกมมา

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	HAPn ₅	HAPn ₅ C ₅	HAPn ₅ CH ₅	HAPn ₅ C ₅ CH ₅
60% HA-Latex	100	100	100	100
n-BA	5	5	5	5
C ₂ Cl ₄	-	5	-	5
CHCl ₃	-	-	5	5

ตารางที่ 4.14 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร

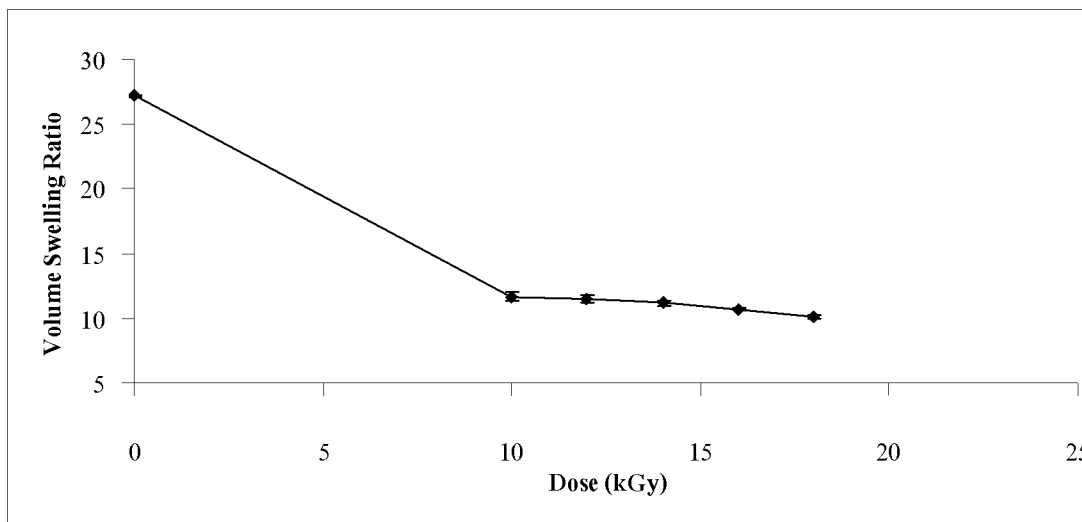
		Dose (kGy)							
		0	10	12	14	16	18	20	22
HAPn ₅	Swelling	27.1700	11.6900	11.4800	11.1500	10.7200	10.1200	-	-
	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)	1.9200	7.8300	8.0700	8.4700	9.0300	9.9500	-	-
HAPn ₅ C ₅	Swelling	26.4200	-	-	10.5400	9.6900	9.1500	8.7000	8.3400
	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)	2.0100	-	-	9.2900	10.7000	11.8000	12.8000	13.7000
HAPn ₅ CH ₅	Swelling	25.5800	-	-	7.7300	7.6400	7.5700	7.5200	7.4100
	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)	2.1200	-	-	15.6000	15.9000	16.1000	16.3000	16.7000
HAPn ₅ C ₅ CH ₅	Swelling	16.2400	-	-	7.4000	7.0200	6.4100	6.2200	5.4300
	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)	4.5700	-	-	16.8000	18.3000	21.3000	22.5000	28.1000

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้ปริมาณรังสี คือ 0, 10, 12, 14, 16 และ 18 kGy ตามลำดับ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.14

กรณีที่ 1 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 18 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 10.1200



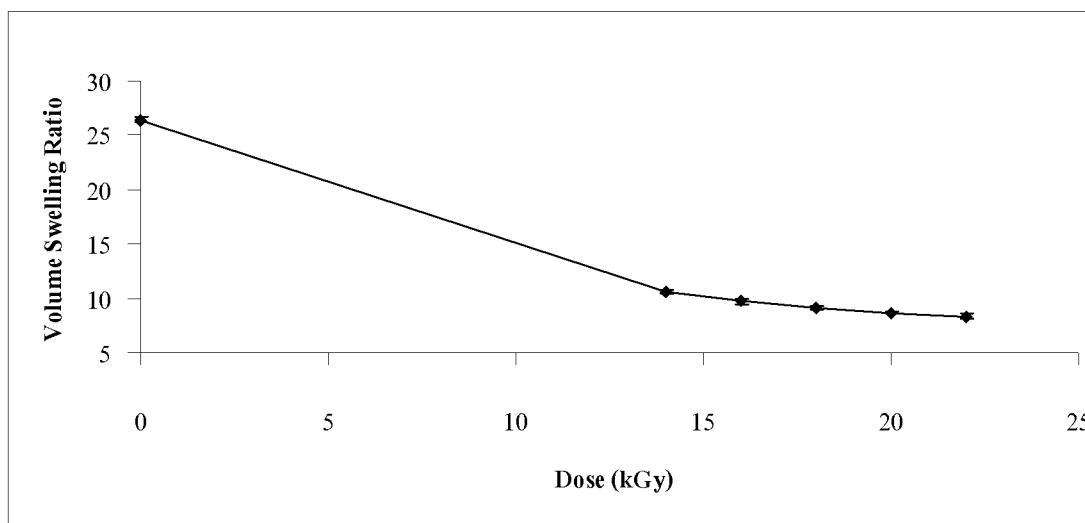
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5 ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ได้รับปริมาณรังสีคือ 0, 10, 12, 14, 16 และ 18 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.27

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 18 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 10.1200 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 27.1700 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5 สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 37.2500 %

กรณีที่ 2 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 8.3400



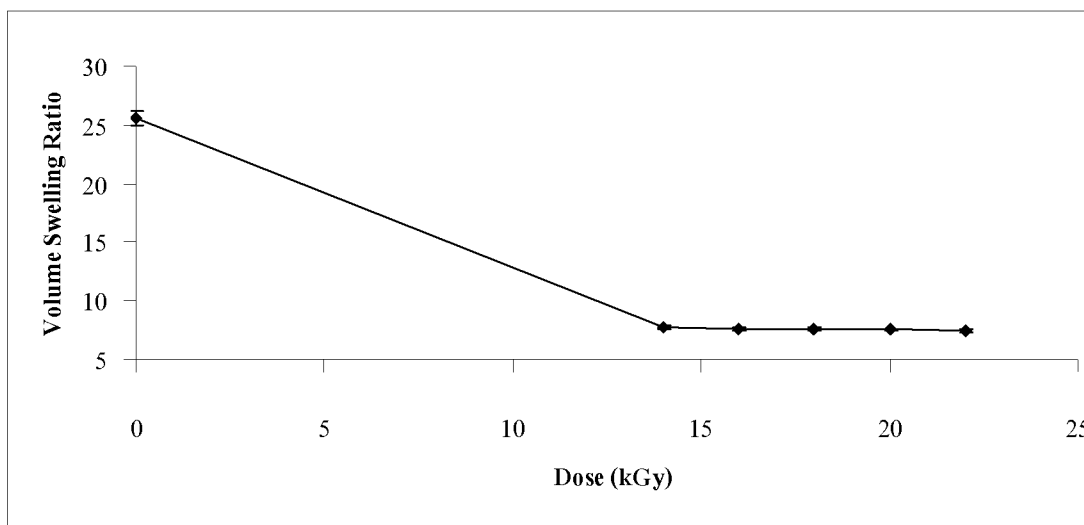
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมา กับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5 ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมา ให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.28

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 8.3400 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่ามีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 26.4200 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5 สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 31.5700 %

กรณีที่ 3 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.4100



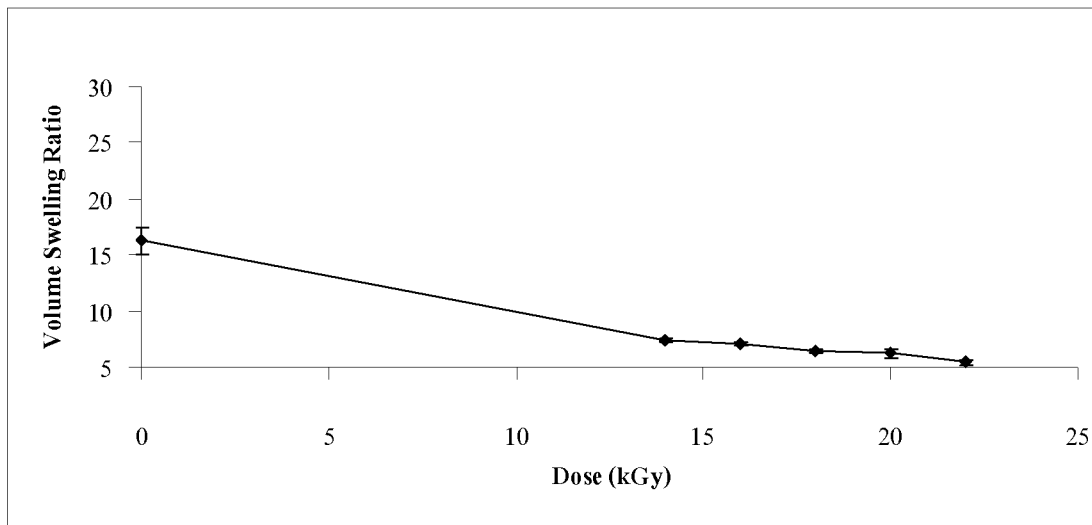
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5 ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.29

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 7.4100 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 25.5800 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5 สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 28.9700 %

กรณีที่ 4 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

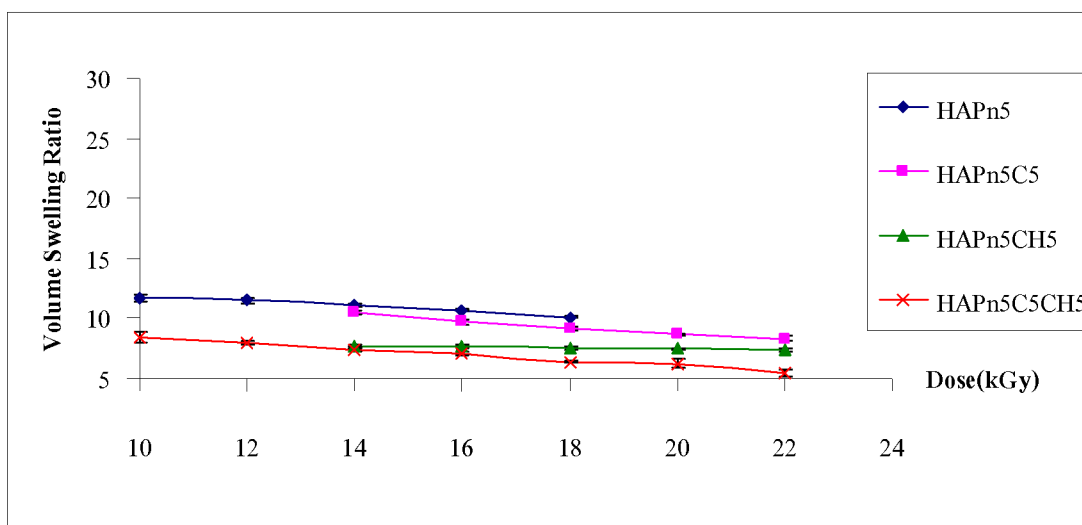
นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 5.4300



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้ปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.30

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 5.4300 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 16.2400 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 33.4300 %



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

วิจารณ์ผลการทดลองสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร พบว่า ค่าการบวมพอง (Swelling) ที่ลดลงเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

สำหรับกรณีน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) พบว่า ไม่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารเตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) กับสารทีเอ็มทีดี 0.013% และสารซิงค์ออกไซด์ 0.013% เนื่องจากในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ไม่มีสารทีเอ็มทีดี 0.013% และสารซิงค์ออกไซด์ 0.013% เป็นสารรักษาสภาพในน้ำยางธรรมชาติเหมือนน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA)

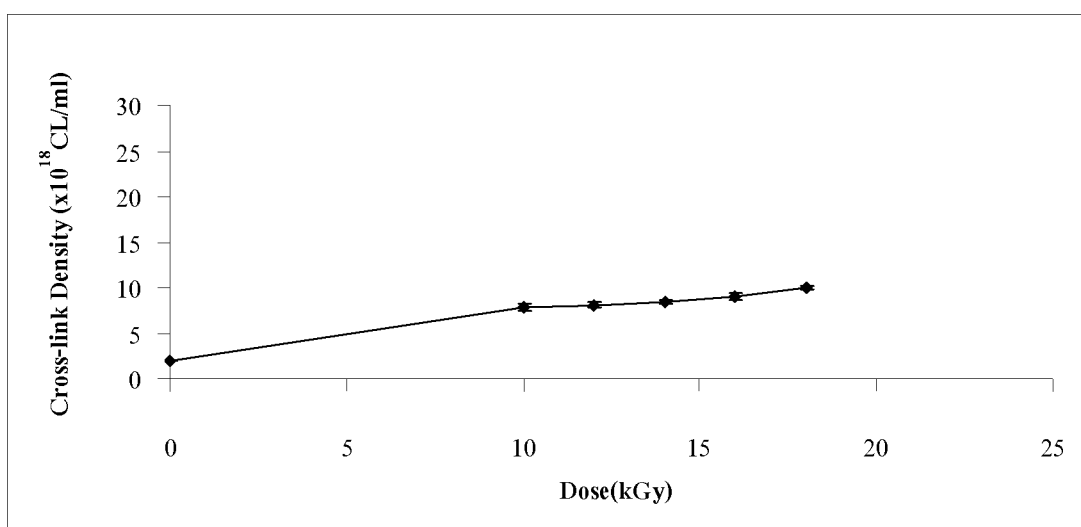
- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากการทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 10, 12, 14, 16 และ 18 kGy ตามลำดับ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง

(20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.14

กรณีที่ 1 : นำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 18 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 9.9500×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅

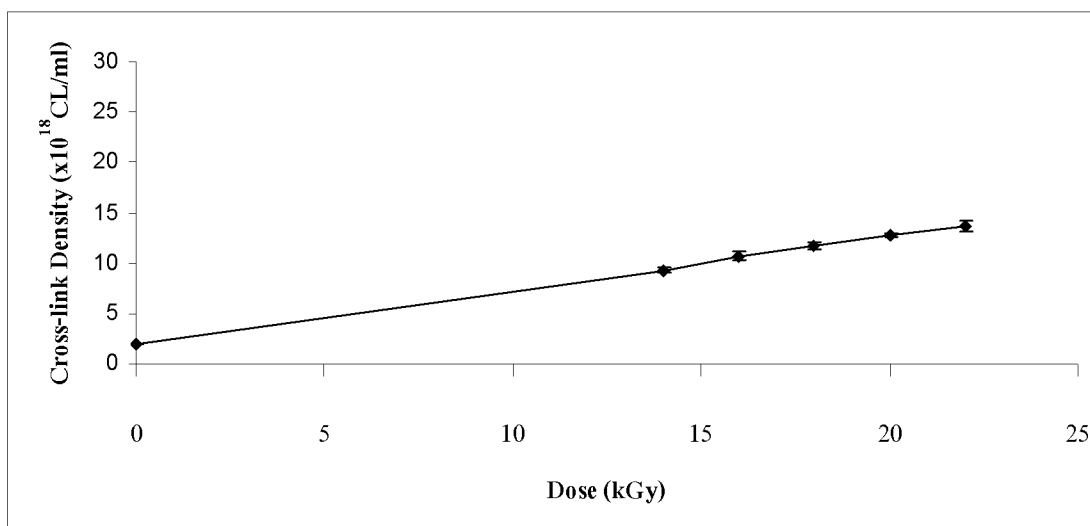
จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 10, 12, 14, 16 และ 18 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.32

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 18 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 9.9500×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของ

การเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่ามีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 1.9200×10^{18} CL/ml ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5 สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 518.2300 %

กรณีที่ 2 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 13.7000×10^{18} CL/ml



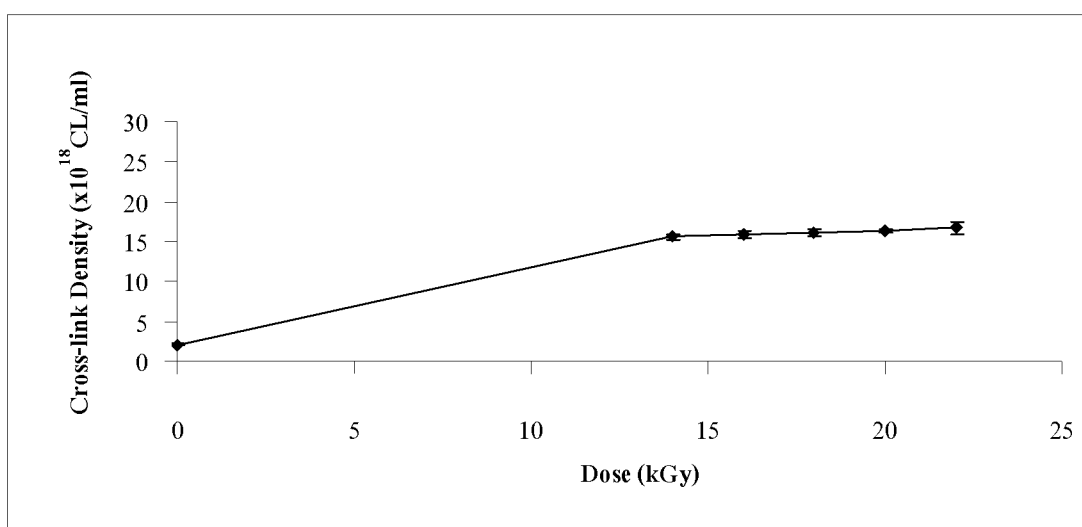
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5 ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.33

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 13.7000×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 2.0100×10^{18} CL/ml ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5 สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 681.5900 %

กรณีที่ 3 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 16.7000×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5

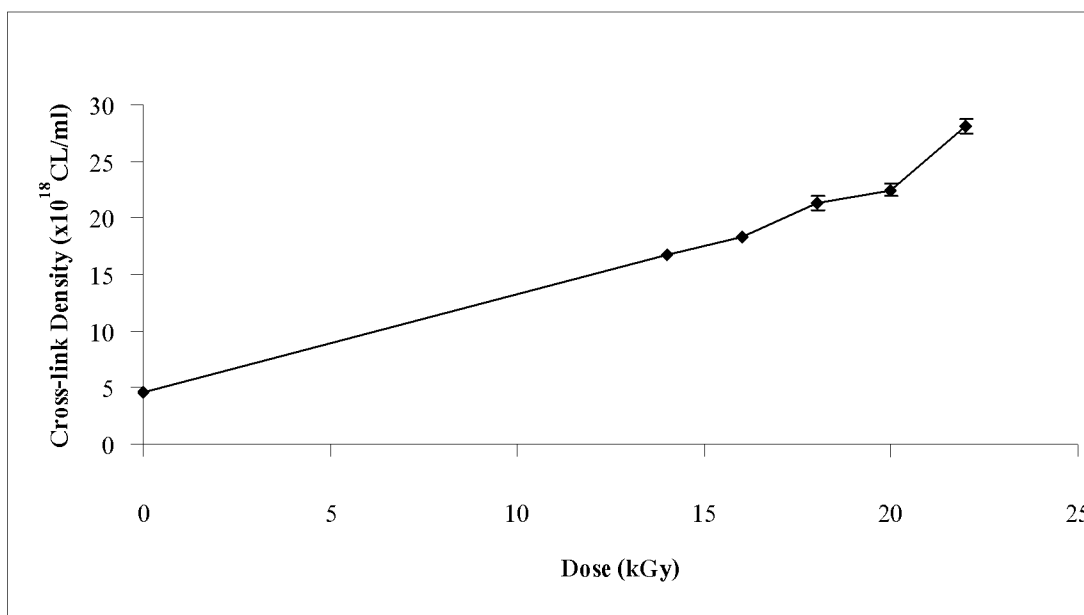
จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5 ซึ่งผ่านการฉาย

รังสีแกมมาที่ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.34

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 16.7000×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่ามีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 2.1200×10^{18} CL/ml ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 787.7400 %

กรณีที่ 4 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

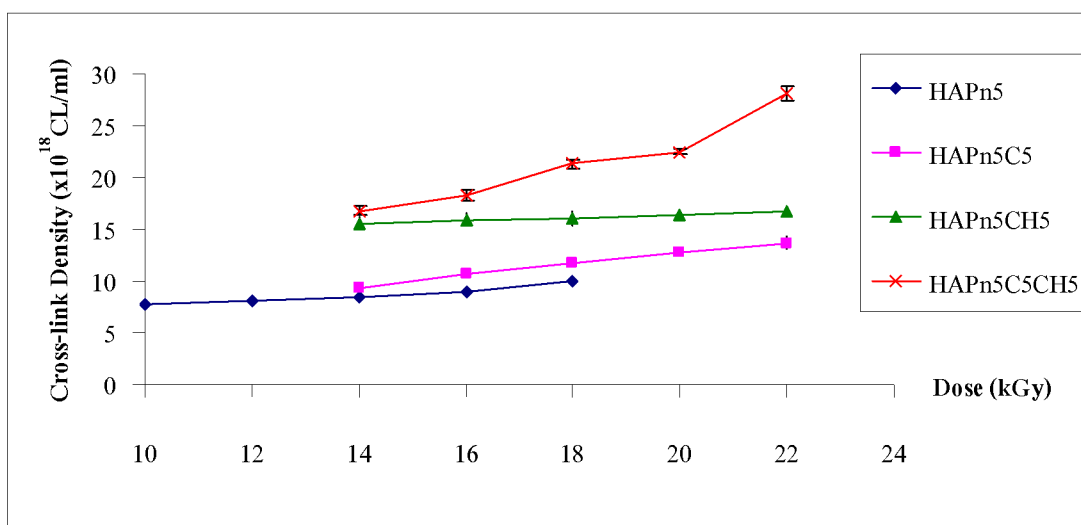
นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 28.1000×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.35

นั่นคือ การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 22 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 28.1000×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 4.5700×10^{18} CL/ml ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 614.8800 %



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

วิจารณ์ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตร พบว่า ค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณรังสีแกมมาที่

เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

สำหรับกรณีน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) พบว่า ไม่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารสารเตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) กับสารทีเอ็มทีดี 0.013% และสารซิงค์ออกไซด์ 0.013% เนื่องจากในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ไม่มีสารทีเอ็มทีดี 0.013% และสารซิงค์ออกไซด์ 0.013% เป็นสารรักษาสภาพในน้ำยางธรรมชาติเหมือนน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA)

4.3 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอน

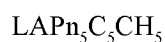
เพื่อหาปริมาณแสงซินโครตรอนที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง

4.3.1 น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA)

ตารางที่ 4.15 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์ในเซชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน

ส่วนผสม (phr)	สูตร
	$LAPn_5C_5CH_5$
60% LA-Latex	100
n-BA	5
C_2Cl_4	5
$CHCl_3$	5

ตารางที่ 4.16 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร



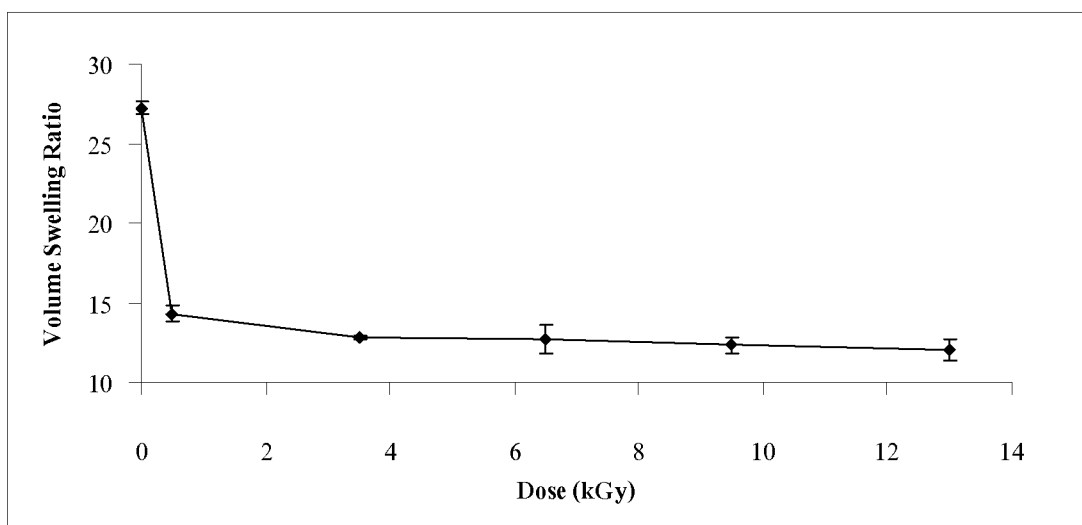
		Dose (kGy)					
		0	0.5	3.5	6.5	9.5	13
$\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$	Swelling	27.2300	14.3200	12.7700	12.6900	12.3100	12.0500
	Cross-link density ($\times 10^{18}$ CL/ml)	1.9100	5.5900	6.7500	6.8900	7.2000	7.4800

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉายแสงซินโครตรอนให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.16

กรณีที่ 1 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

นั่นคือ การฉายแสงซินโครตรอนที่ปริมาณรังสี 13 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.0500



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$ ซึ่งผ่านการฉายแสงซินโครตรอนให้ได้ปริมาณรังสี คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.37

นั่นคือ การฉายแสงซินโครตรอนที่ปริมาณรังสี 13 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 12.0500 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีสมบัติการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 27.2300 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัดคาบไชนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอนของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$ สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 44.2500 %

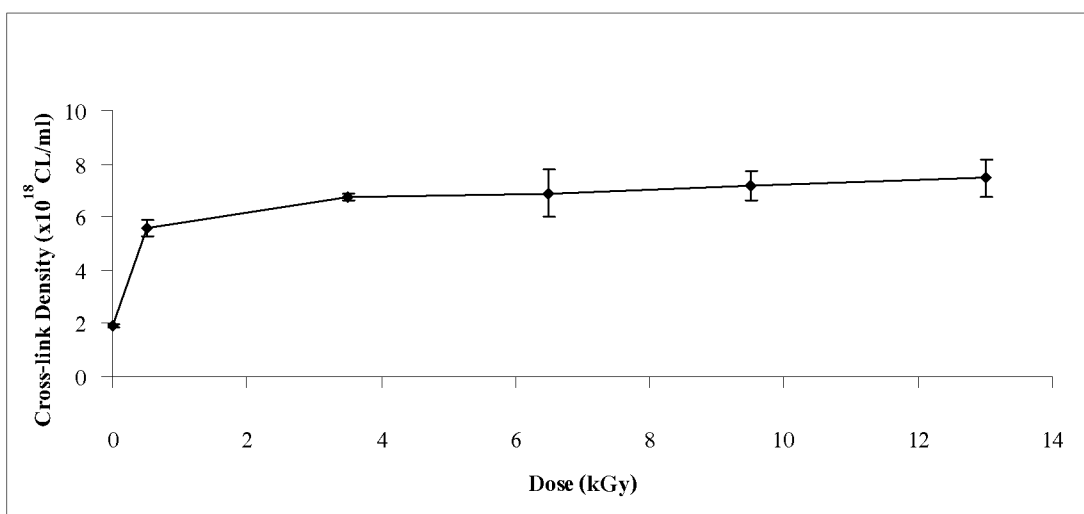
วิจารณ์ผลการทดลองสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) พบว่า ค่าการบวมพอง (Swelling) ที่ลดลงเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณแสงซินโครตรอนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากการทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$ ซึ่งผ่านการฉายแสงซินโครตรอนให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิดที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง ($20 - 25^\circ C$) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.16

กรณีที่ 1 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$

นั่นคือ การฉายแสงซินโครตรอนที่ปริมาณรังสี 13 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.4800×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมา กับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$ ซึ่งผ่านการฉาย

แสงซินโครตรอนให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.38

นั่นคือ การฉายแสงซินโครตรอนที่ปริมาณรังสี 13 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.4800×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 1.9100×10^{18} CL/ml ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอนของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 391.6200 %

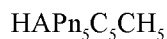
วิจารณ์ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) พบว่า ค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณแสงซินโครตรอนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 80 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

4.3.2 น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)

ตารางที่ 4.17 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์ชันด้วยการฉายแสงซินโครตรอน

ส่วนผสม (phr)	สูตร
	$\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$
60% HA-Latex	100
n-BA	5
C_2Cl_4	5
CHCl_3	5

ตารางที่ 4.18 สมบัติการบวมพอง (Swelling) และค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร



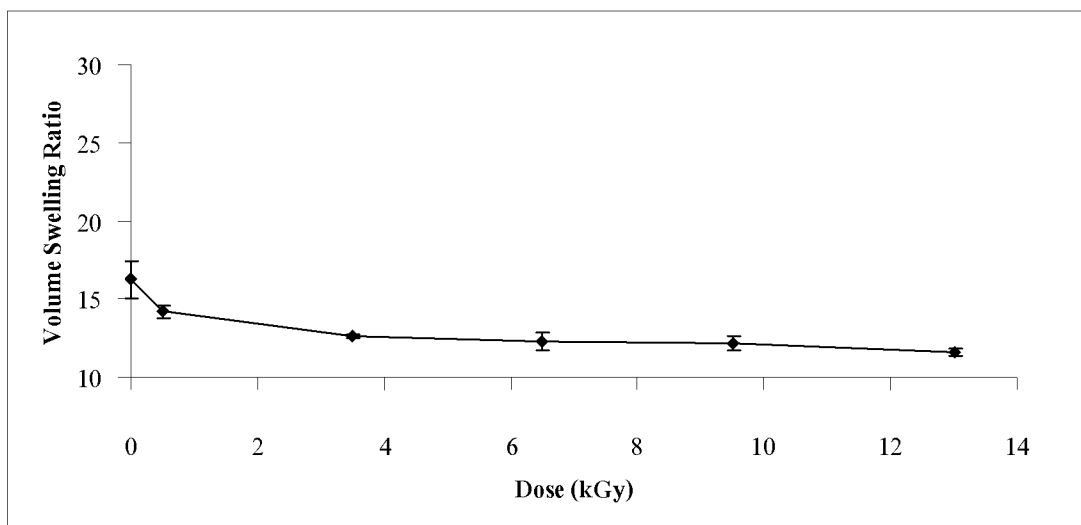
		Dose (kGy)					
		0	0.5	3.5	6.5	9.5	13
HAPn ₅ C ₅ CH ₅	Swelling	16.2400	14.2100	12.6400	12.3200	12.1800	11.5700
	Cross-link density (x 10 ¹⁸ CL/ml)	4.5700	5.6600	6.8600	7.2100	7.3300	7.9700

- สมบัติการบวมพอง (Swelling)

จากการศึกษาสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅C₅CH₅ ซึ่งผ่านการฉายแสงซินโครตรอนให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาชนะปิด ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20 - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.18

กรณีที่ 1 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅C₅CH₅

นั่นคือ การฉายแสงซินโครตรอนที่ปริมาณรังสี 13 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 11.5700



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมากับสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

จากผลการทดลอง พบว่าสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉายแสงซินโครตรอนให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.39

นั่นคือ การฉายแสงซินโครตรอนที่ปริมาณรังสี 13 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) บวมตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 11.5700 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการบวมพอง (Swelling) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีสมบัติการบวมพอง (Swelling) ประมาณ 16.2400 ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัดคาบไชนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอนของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ สามารถลดการบวมพอง (Swelling) ได้ประมาณ 71.2400 %

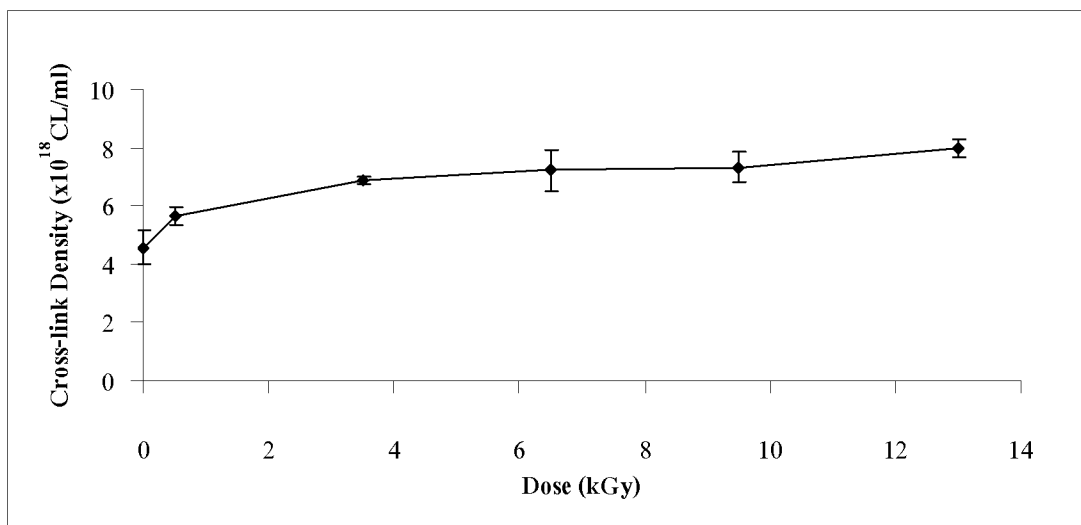
วิจารณ์ผลการทดลองสมบัติการบวมพอง (Swelling) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) พบว่า ค่าการบวมพอง (Swelling) ที่ลดลงเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณแสงซินโครตรอนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

- การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

จากการทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉายแสงซินโครตรอนให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เวลาในการแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิดที่ไว้ที่อุณหภูมิห้อง ($20 - 25^\circ\text{C}$) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง ทำให้ทราบผลการทดลองตามตารางที่ 4.18

กรณีที่ 1 : น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

นั่นคือ การฉายแสงซินโครตรอนที่ปริมาณรังสี 13 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.9700×10^{18} CL/ml



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีแกมมา กับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉาย

แสงซินโครตรอนให้ได้รับปริมาณรังสี คือ 0, 0.5, 3.5, 6.5, 9.5 และ 13 kGy ตามลำดับ โดยแสดงผลการทดลองตามรูปที่ 4.40

นั่นคือ การฉายแสงซินโครตรอนที่ปริมาณรังสี 13 kGy จะทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เกิดสารเชื่อมโยงมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 7.9700×10^{18} CL/ml ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ในการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 0 kGy (ไม่ถูกฉายรังสี) พบว่า มีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ประมาณ 4.5700×10^{18} CL/ml (ข้อมูลจากตารางที่ 4.14) ทำให้ทราบว่า จากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอนของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ประมาณ 174.4000 %

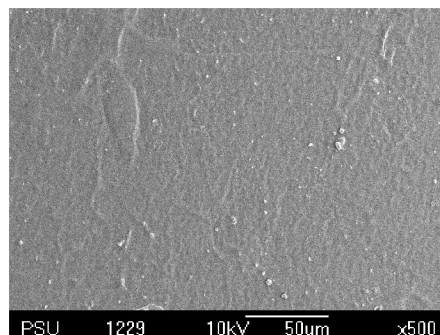
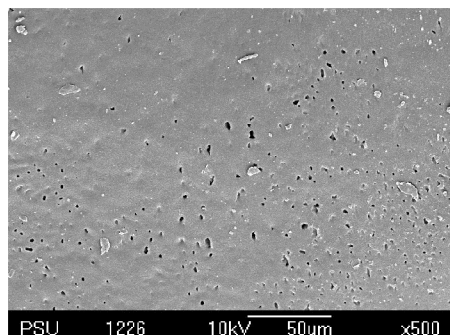
วิจารณ์ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) พบว่า ค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณแสงซินโครตรอนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง คือ การอบที่อุณหภูมิ 50 °C และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

- การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

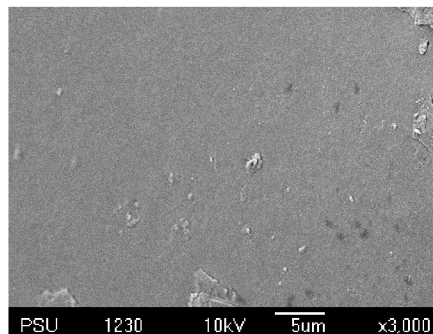
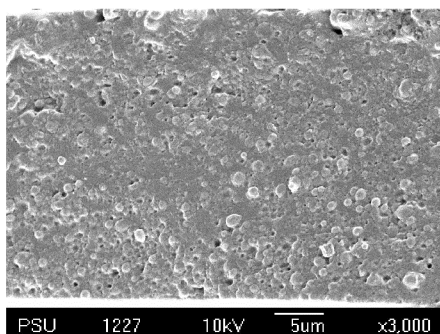
(เฉพาะยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอนเท่านั้น)

นำแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางที่เตรียมได้ ทดสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM เตรียมชิ้นตัวอย่างโดย ตัดแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางเป็นชิ้นเล็กๆ แช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นทำให้แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบางขาดจากกัน หลังจากนั้นติดบนแท่งทองเหลือง ฉาบด้วยไอทองคำ แล้วถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-5200 L

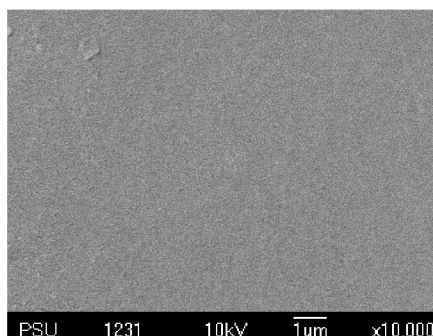
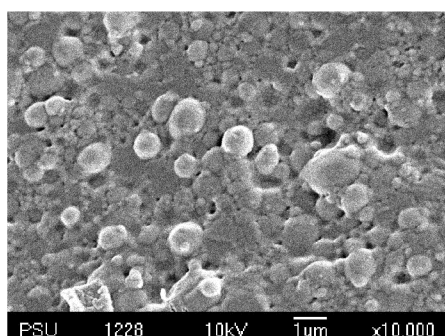
วิจารณ์ผลการทดลองจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เนื่องจากกรณีน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) พบว่า มีลักษณะผิวขรุขระ ไม่เรียบ จึงสันนิษฐานว่า เป็นผลมาจาก สารที่เอมที่ดี 0.013% และสารซิงค์ออกไซด์ 0.013% ซึ่งใช้เป็นสารรักษาสภาพในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ร่วมกับแอมโมเนีย 0.2% ซึ่งต่างจากกรณีน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) พบว่า ไม่มีสารที่เอมที่ดี 0.013% และสารซิงค์ออกไซด์ 0.013% เจือปนอยู่ แต่ใช้แอมโมเนีย 0.6% เพียงชนิดเดียว



ก. น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ข. น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)
รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยายขนาด 500 เท่า



ก. น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ข. น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)
รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
กำลังขยายขนาด 3,000 เท่า



ก. น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ข. น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)
รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
กำลังขยายขนาด 10,000 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการเติมสารเซนซิไทเซอร์และความร้อน

1. การอบแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ซึ่งผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยรังสีแกมมา ที่อุณหภูมิ 80 °C เหมาะสมที่สุด เนื่องจากทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) มีค่าการบวมพอง (Swelling) น้อย ส่งผลให้มีความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) มาก ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เต็มที่ (Fully vulcanized)

2. การอบแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ซึ่งผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยรังสีแกมมา ที่อุณหภูมิ 50 °C เหมาะสมที่สุด เนื่องจากทำให้น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) มีค่าการบวมพอง (Swelling) น้อย ส่งผลให้มีความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) มาก ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์เต็มที่ (Fully vulcanized)

3. ในกรณีที่เพิ่มปริมาณสารเซนซิไทเซอร์ ส่งผลให้ค่าการบวมพอง (Swelling) ลดลง เป็นผลมาจากการใช้ปริมาณสารเซนซิไทเซอร์ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด และเวลาที่เหมาะสมในการแช่แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในสารละลายโทลูอีน คือ เวลา 24 ชั่วโมง

4. เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) และน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) พบว่าในสูตรที่มีการผสมสารเคมีชนิดเดียวกัน น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) มีค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) มากกว่าน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)

5.1.2 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา

1. สารเซนซิไทเซอร์สามารถเพิ่มความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ได้ โดยที่ไม่ต้องผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันด้วยความร้อนหรือรังสี

2. สำหรับกรณีน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) เมื่อใช้สารเซนซิไทเซอร์หลายชนิดผสมกัน เพื่อกระบวนการวัลคาไนเซชัน ทำให้ทราบว่า ค่าการบวมพอง (Swelling) ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น

แต่เฉพาะสูตรที่มีสารเตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) ผสมอยู่จะมีคุณสมบัติเพิ่มค่าการบวมพอง (Swelling) ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) มีค่าลดลง ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากัน ระหว่างสารเตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) กับสารที่เอ็มทีดี 0.013% และสารซิงค์ออกไซด์ 0.013% ซึ่งใช้เป็นสารรักษาสภาพในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ร่วมกับแอมโมเนีย 0.2% โดยศัพท์วิชาการยางพาราใช้กันว่า LA – TZ ย่อมาจาก Low Ammonia – Tetramethyl – thiuram disulphide/Zinc oxide

3. สำหรับกรณีน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) เมื่อใช้สารเซนซิไทเซอร์หลายชนิดผสมกัน เพื่อกระบวนการวัลคาไนเซชัน ทำให้ทราบว่า ค่าการบวมพอง (Swelling) ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น

4. เมื่อเพิ่มกระบวนการวัลคาไนเซชัน ทำให้ทราบว่า ค่าการบวมพอง (Swelling) ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น

5.1.3 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอน

1. การฉายแสงซินโครตรอนสามารถทำให้น้ำยางธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด เกิดกระบวนการวัลคาไนเซชันได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในส่วนของกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายแสงซินโครตรอน อาจใช้กล้องจุลทรรศน์แบบความละเอียดสูง หรือ AFM (Atomic Force Microscope) แทนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อให้เห็นรายละเอียดของสารตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ได้ละเอียดมากขึ้น

บรรณานุกรม

- นิตยา รัตนโสม และคณะ. 2546. ผลของปริมาณ โครงสร้างร่างแหต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติบริสุทธิ์และยางสังเคราะห์โพลีไอโซพรีนที่วัลคาไนซ์. รายงานวิจัย. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- บุญธรรม นิชอุทัย และ พรพรรณ นิชอุทัย. 2534. สารเคมีสำหรับยางและเทคนิคการออกสูตร. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์. 2547. การศึกษาปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์และเปอร์ออกไซด์ในอนุภาคยางธรรมชาติ. รายงานวิจัย. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ปรีเปรม จงรักษ์. 2537. ผลของสารป้องกันออกซิเดชันต่อน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย สาขาวิชาเคมีเชิงฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ผลชิต บัวแก้ว. 2531. สารเคมีผสมน้ำยาง. ศูนย์วิจัยยางสงขลา: สงขลา.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. สารเคมีสำหรับยาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). กรุงเทพฯ.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค): กรุงเทพฯ.
- พรพรรณ นิชอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: ปัตตานี.
- พรพรรณ นิชอุทัย. 2540. ยาง: เทคนิคการออกสูตร. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พัถุทีนา สาขา. 2546. การวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยพอลิเอมีนร่วมกับโมโนเมอร์อะไครลิก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย สาขาวิชาเคมีเชิงฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- โยธิน ชิงค์. 2537. การเตรียมและสมบัติของยางโปรตีนต่ำจากน้ำยางธรรมชาติ. โครงการระดับปริญญาตรี
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2525. น้ำยาง. งานอุตสาหกรรมยาง ศูนย์วิจัยการยางหาดใหญ่: สงขลา.
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2549. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว): กรุงเทพฯ.
- สถาบันวิจัยยาง. 2540. ข้อมูลทางวิชาการยางพารา. กรมวิชาการเกษตร.

- สถาบันวิจัยยาง. 2542. ข้อมูลทางวิชาการยางพารา. กรมวิชาการเกษตร: สงขลา.
- สิริธร แก้วกล้า. 2549. กาวผสมของน้ำยางธรรมชาติกับกาวพอลิยูรีเทนเพื่อใช้ในการติดยางวัลคาไนซ์กับหนังสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. 2540. ยางธรรมชาติเบื้องต้น. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. 2546. การผลิตยางธรรมชาติ. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: สงขลา.
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสีและ ไพโรจน์ กลิ่นพิทักษ์. 2540. การดัดแปลงยางธรรมชาติโปรตีนต่ำและสมบัติความเสียดทาน . ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ. 2549. การใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ. สมบูรณ์การพิมพ์. กรุงเทพมหานคร.
- อารีชา มาลากาญจน์. 2548. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการวัลคาไนซ์ชั้นของยางธรรมชาติคอมเปาต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- “ASTM D 412-98 Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastics Elastomers-Tension” Annual Book of ASTM Standards. Section9: 444-57
- Abad L.V., Rellve L.S., Aranilla C.T., Aliganga A.K., San Diego C.M., Rosa dela A.M. 2006. Characterization of Irradiation-Induced Crosslink of Epoxidised Natural Rubber/Ethylene Vinyl Acetate (ENR-50/EVA) Blend. Polymer Degradation and Stability. 91, 2723-2730
- Abi, S.A., Kuruvilla, J., Thomas, M., Volker, A. and Sabu, T. 2003. Studies on Accelerated Sulphur Vulcanization of Natural Rubber Using 1-phenyl-2, 4-dithiobiuret/tertiary butyl benzothiazole sulphenamide. European Polymer Journal. 39, 1451-1460.
- Agarwal, K., Setua, D.K. and Sekhar, K. 2005. Scanning Electron Microscopy Study on the Influence of Temperature on Tear Strength and Failure Mechanism of Natural Rubber Vulcanizates. Polymer testing. 24, 781-789

- Abd El-Salam, F., Abd El-Salam, M.H. and Mohamed, M.I., 2006. Vulcanizing System Dependence of the Rubbery Swelling, Dielectric and Doppler Shift Characteristics of IIR/EPDM Blends. *Egypt. J. Solids.*, 29(1), 181-192
- Andrzej G.Chmielewski , Mohammad Haji-Saeid and Shamshad Ahmed. 2005. Progress in radiation processing of polymers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 236 :44-54.
- Boochathum,P.and Prajudtake,W. 2001. Vulcanization of Cis- and Trans-polyisoprene and Their Blends: Cure Characteristics and Crosslink Distribution. *Europ. Polym.J.* 37, 417-427.
- Boochathum, P. and Chiewnawin, S. 2001. Vulcanization of Cis- and Trans-Polyisoprene and Their Blends: Crystallization Characteristics and Properties. *European Polymer Journal.* 37, 429-434.
- Choi S.S. 1999. Correlation of Crosslink Density with Pyrolysis Pattern of Natural Rubber Vulcanizates with Efficient Vulcanizing Cure System. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.* 52,105–112.
- Enabe, E.E. and Farid, S.A. 2001. Chemical Kinetics of Vulcanisation and Compression Set. *European Polymer Journal.* 37, 329- 334.
- Gwaily, S.E. Badawy, M.M. Hassan, H.H. and Madani, M. 2003. Influence of Electron Beam Irradiation and Step-Crosslinking Process on Solvent Penetration and Thermal Properties of Natural Rubber Vulcanizates. *Polymer testing.* 22, 3-7.
- H.Chirinos , F.Yoshii , K.Makuuchi and A.Lugao. 2003. Radiation vulcanization of natural rubber latex using 250 keV electron beam machine. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 208 :256-259.
- http://library.car.chula.ac.th:82/search*thx?/dLarning/dlarning/1%2C-1%2C0%2CE/frameset&FF=dlatex&1%2C4%2C accessed January 31, 2008.
- http://pikul.lib.ku.ac.th/cgi-bin/agdb1.exe?rec_id=051016&database=agdb1&search_type=link&table=mona&back_path=/agdb1/mona&lang=thai&format_name=TFMON . Retrieved accessed January 31, 2008.
- http://web.technicchan.ac.th/~polymer/index.php?option=com_content&task=view&id=37&Itemid=55 . Retrieved accessed January 31, 2008.

http://www.en.mahidol.ac.th/EI/ipb_eco/index.php?act=Print&client=printer&f=10&t=26.

Retrieved accessed January 31, 2008.

<http://www.igetweb.com/www/polymer/index.php?mo=3&art=4158> . Retrieved accessed January 31, 2008.

<http://www.kkw.ac.th/kkwweb/DL/agri/papaya/t6.htm> . Retrieved accessed January 31, 2008.

<http://www.sat.psu.ac.th/polymer/standard/4.5.1%202540.htm> . Retrieved accessed January 31, 2008.

<http://www.vcharkarn.com/varticle/33548/1> . Retrieved accessed January 31, 2008.

<http://southnfe.go.th/LearnSquare/courses/59/paraproduc01.htm> . Retrieved accessed January 31, 2008.

K.Makuuchi , A.Parinya. 1990. Hydroperoxides as Co-Sensitizer with n-Butyl acrylate for radiation vulcanization of natural rubber latex. Songklanakarin Journal of Science and Technology (Thailand) v. 16(3) p. 263-268.

Klysuban, W., Thanawan, S., Thamasinunt, P., Radabutra, S., and Sombunchoo, P. 2007. Determination of chlorine content in chlorinated, vulcanized natural rubber by XANES. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 58, 2242-244.

Lynn C. Y. 1989. Effect of Crosslink Type on the Fracture of Natural Rubber Vulcanizates. International Journal of Fracture. 39, 103-110.

Lewan,M.V. Crosslink Density Distribution in NR/nitrile Rubber Blend. Ph.D. Thesis. Loughborough University of Technology. 1996.

M.E.Haque , N.C.Dafader , F.Akhtar and M.U. Ahmad. 1996. Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. Radiat. Phys. Chem. Vol. 48 No. 4. pp :505-510.

M.M.Jayasuriya , K.Makuuchi and F.Yoshi. 2001. Radiation vulcanization of natural rubber latex using TMPTMA and PEA. European Polymer Journal 37 : 93-98.

Porter, M., Skinner, T.D. and Wheelans, M.A. 1967. Structural Characterization of Vulcanizates. Part viii. The N-Cyclohexylbenzothiazole-2-Sulfenamide-Accelerated Sulfur Vulcanization of Natural Rubber at 140-180°C. And of synthetic cis-1,4-polyisoprene at 140°C, Journal of Applied Polymer Science 11, 2271.

- Salgueiro, W., Somoza, A., Marzocca, A.J., Consolati, G. and Quasso, F. 2007. Evolution of the Crosslink Structure in the Elastomers NR and SBR, *Radiation Physics and Chemistry*. 76, 142–145.
- Stephen, R., Jose, S., Joseph, K., Thomas, Sabu. And Oommen, Z. 2006. Thermal stability and ageing properties of sulphur and gamma radiation vulcanized natural rubber (NR) and carboxylated styrene butadiene rubber (XSBR) lattices and their blends membranes. *Polymer Degradation and Stability*. 91: 1717–1725.
- Travas-Sejdic, J., Jelencic, J., Bravar, M. and Frbe, Z. 1996. Characterization of the Natural Rubber Vulcanizates Obtained by Different Accelerators. *European Polymer Journal*. 32, 1395-1401.
- Wonmun C. 2006. The Main Mechanism and Cross-Linking Structure for Accelerated Sulfur Vulcanization. *e-Journal of Soft Materials*. 2, 47–55.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ระบบการวัดปริมาณรังสี
(DOSIMETRY SYSTEM)

ระดับชั้นของเครื่องวัดปริมาณรังสี (DOSIMETER CLASS)

1. Primary Standard Dosimeter

ห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติ หรือนานาชาติ จะปรับเทียบสภาพแวดล้อมทางรังสี และเครื่องวัดปริมาณรังสีระดับชั้นอื่นๆ เช่น ionization chamber , calorimeter

2. Reference Standard Dosimeter

เพื่อปรับเทียบสภาพแวดล้อมทางรังสี และเครื่องวัดปริมาณรังสีสำหรับงานประจำ (Routine Dosimeter)

TABLE 1 Examples of Reference-Standard Dosimeters

Dosimeter	Readout System	Useful Absorbed Dose, Gy	References ^A
Ionization chamber	Electrometer	10^{-4} to 10	(11,12)
Calorimeter	Thermometer	10^2 to 10^5	(13)
Alanine	EPR spectrometer	1 to 10^5	(14)
Ceric cerous sulfate solution	UV spectrophotometer or electrochemical potentiometer	10^3 to 10^5	(15,16)
Ethanol chlorobenzene solution	Spectrophotometer, color titration, high frequency conductivity	10 to 2×10^6	(17, 18)
Ferrous sulfate solution	UV spectrophotometer	20 to 4×10^2	(19)
Potassium/silver dichromate	UV/visible spectrophotometer	10^3 to 10^5	(20)

^AThese references are not exhaustive; others may be found in the literature.

3. Transfer Standard Dosimeter

ใช้ในการขนส่งข้อมูลปริมาณรังสีจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ได้รับการรับรองหรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติผู้โรงงานฉายรังสี เพื่อสอบย้อนกับค่าวัดปริมาณรังสีของโรงงานฉายรังสีนั้น โดยคัดเลือกรุ่นจากเครื่องวัดปริมาณรังสีอ้างอิงหรือเครื่องวัดปริมาณรังสีที่ใช้ในงานประจำ เช่น Alanine Dosimeter , Fricke

4. Routine Dosimeter

เพื่อการควบคุมคุณภาพของกระบวนการฉายรังสี ติดตามวัดปริมาณรังสีและการสร้างแผนที่การกระจายของรังสี (Dose mapping)

TABLE 2 Examples of Routine Dosimeters

Dosimeter	Readout System	Useful Absorbed Dose, Gy	References ^A
Alanine	EPR spectrometer	1 to 10 ⁵	(14)
Dyed polymethyl-methacrylate	Visible spectrophotometer	10 ² to 10 ⁵	(21,22,23)
Clear polymethyl-methacrylate	UV spectrophotometer	10 ³ to 10 ⁵	(21,24)
Cellulose acetate	Spectrophotometer	10 ⁴ to 4 × 10 ⁵	(25)
Lithium borate, lithium fluoride	Thermoluminescence reader	10 ⁻⁴ to 10 ³	(26)
Lithium fluoride (optical grade)	UV/Visible spectrophotometer	10 ² to 10 ⁶	(27)
Radiochromic dye films, solutions, optical wave guide	Visible spectrophotometer	1 to 10 ⁵	(6,8,28)
Ceric cerous sulfate solution	Potentiometer or UV spectrophotometer	10 ³ to 10 ⁵	(15)
Ferrous cupric sulfate solution	UV spectrophotometer	10 ³ to 5 × 10 ³	(29)
Ethanol chlorobenzene solution	Spectrophotometer, color titration, high-frequency conductivity	10 to 2 × 10 ⁶	(18)
Amino acids	Lyoluminescence reader	10 ⁻⁵ to 10 ⁴	(30)
MOSFET	Voltmeter	1 to 2 × 10 ²	(31)

^AThese references are not exhaustive; others may be found in the literature.

การเทียบระบบวัดปริมาณรังสี (Dosimetry System Calibration System)

ขั้นตอนที่สำคัญคือการฉายรังสี Dosimeter เพื่อการเทียบ

•Primary Standard Dosimeter

ไม่ต้องเปรียบเทียบกับมาตรฐานอื่นๆเนื่องจากการวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องวัดปริมาณรังสี
เป็นไปตามทฤษฎีพื้นฐานทางฟิสิกส์

•Reference Standard Dosimeter และ Transfer Standard Dosimeter

ฉายรังสีเพื่อการเทียบที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติหรือห้องปฏิบัติการ
มาตรฐานที่ได้รับการรับรอง

•Routine Dosimeter

ฉายรังสีเพื่อการเทียบได้ 3 วิธี

การเทียบระบบวัดปริมาณรังสี

(Dosimetry System Calibration Routine Dosimeter)

1. ห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติหรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ได้รับการรับรอง
2. หน่วยงานเทียบที่มีภายในโรงงานฉายรังสี โดยสอบย้อน Dose rate ไปยัง
ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแห่งชาติ หรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานนานาชาติ
3. เครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงาน ฉายพร้อมกับเครื่องวัดปริมาณรังสีชนิดมาตรฐาน
อ้างอิง หรือมาตรฐานการขนส่งที่สามารถสอบย้อนกลับไปยังห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติ
หรือนานาชาติ

การเทียบโดยห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ

เทียบ Routine Dosimeter สำหรับรังสีแกมมา อิเล็กตรอน หรือรังสีเอกซ์

ข้อดี

ปริมาณรังสีถูกต้อง ควบคุมสภาวะขณะฉายรังสีได้ดี

ข้อเสีย

1. เกิดความแตกต่างของสภาวะแวดล้อมขณะฉายรังสีระหว่างเครื่องของห้องปฏิบัติการ
มาตรฐานฯ กับเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงาน (เกิดความไม่แน่นอน-uncertainty)
2. การขนส่งเครื่องวัดปริมาณรังสีไป-กลับห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ สภาพแวดล้อมขณะ
ทำการขนส่งอาจมีผลต่อ Dosimeter

ข้อควรปฏิบัติ

1. สภาวะขณะฉายรังสีภายในห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ ควรจะใกล้เคียงกับสภาวะขณะฉายรังสีโดยเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงาน และปัจจัยอื่นๆ เช่น

- พลังงานของรังสี
- Dose rate (ควรปรับเทียบที่ค่าระหว่าง Dose rate เฉลี่ยและ Dose rate สูงสุดของเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงาน)
- อุณหภูมิขณะฉายรังสี (การปรับเทียบควรทำที่อุณหภูมิคงที่ระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดของอุณหภูมิระหว่างที่ทำการฉายผลิตภัณฑ์)

2. สภาวะแวดล้อมที่มีความแตกต่างกันมาก เช่น อุณหภูมิสูง-ต่ำ และความชื้น ระหว่างที่ทำการขนส่ง Dosimeter ไป-กลับจากโรงงานฉายรังสีอาจมีผลต่อค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้ ดังนั้น

- ภาชนะบรรจุเครื่องวัดปริมาณรังสีควรจะช่วยลดผลของสภาพแวดล้อมระหว่างที่ทำการขนส่ง
- มี indicator ที่จะแสดงอุณหภูมิสูงสุดภายในภาชนะบรรจุเครื่องวัดปริมาณรังสีระหว่างที่ทำการขนส่งเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ (กรณีผลที่ได้จากการปรับเทียบไม่สามารถนำมาใช้ได้)
- เพื่อสร้างความมั่นใจว่าสภาวะแวดล้อมในการขนส่งนั้นไม่ได้ทำให้ผลที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณรังสีเปลี่ยน ซึ่งอาจทำได้โดยการส่ง Dosimeter ที่ทราบปริมาณรังสีอยู่แล้วไปกับ Dosimeter ที่ส่งไปปรับเทียบ แล้วอ่านค่าจาก Dosimeter ทั้ง 2 ชุดเปรียบเทียบกัน

การปรับเทียบโดยหน่วยงานปรับเทียบภายในของโรงงานฉายรังสี

ข้อดี

1. สภาวะแวดล้อมขณะฉายรังสี และการเก็บรักษาเครื่องวัดปริมาณรังสีทั้งก่อนและหลังฉายรังสีสามารถควบคุมให้เหมือนกับการฉายรังสีในงาน routine
2. ช่วยลดความเปลี่ยนแปลงของผลที่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างของสภาวะระหว่างการขนส่งเครื่องวัดปริมาณรังสี หลังจากทำการฉายรังสี

ข้อเสีย

ห้องปฏิบัติการปรับเทียบภายในโรงงานอาจไม่ปฏิบัติตามมาตรฐาน (ISO/ASTM 51400)

ข้อควรปฏิบัติ

ควรจะสอบย้อน Dose rate ในการปรับเทียบไปยังห้องปฏิบัติการมาตรฐานแห่งชาติ หรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานนานาชาติที่ได้รับการรับรอง โดยการวัดโดยตรงแล้วทำการเปรียบเทียบหรือปรับเทียบโดยใช้ Transfer Standard Dosimeter จากห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ

• การสอบย้อน Dose rate ของส่วนปฏิบัติการปรับเทียบภายในของโรงงานควรจะทำอย่างน้อย 3 ปี ทำ 1 ครั้ง และหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงความแรงของต้นกำเนิดรังสี หรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดวาง(Geometry)ใหม่

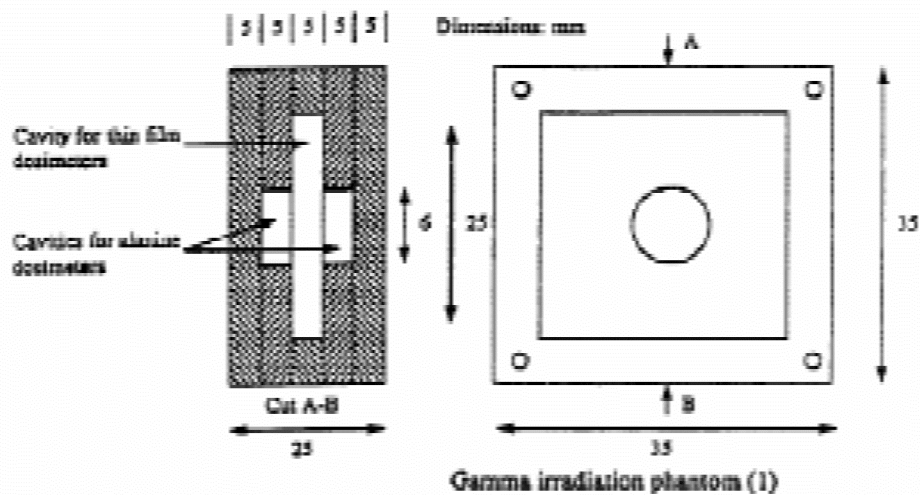
การปรับเทียบโดยเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงาน

การปรับเทียบ Routine Dosimeter โดยการฉายรังสีพร้อมๆกับ Reference Standard Dosimeter หรือ Transfer Standard Dosimeter โดยเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ (Standard Dosimeter มาจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ และส่งกลับไปวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ)

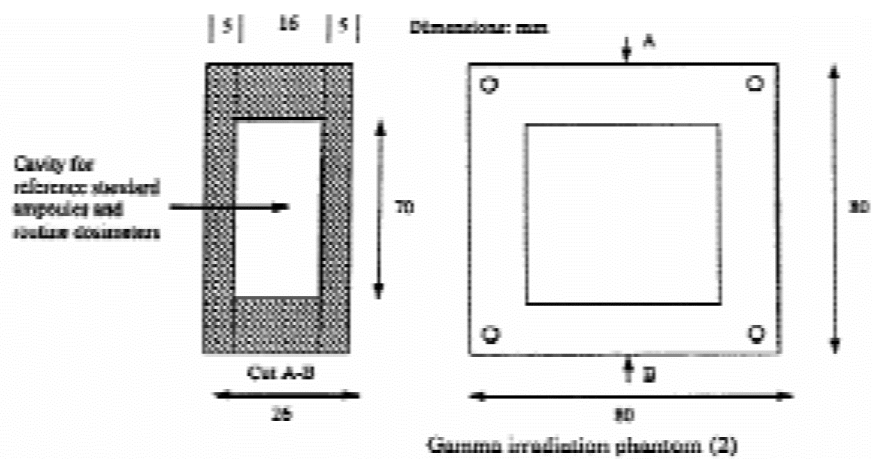
ข้อดี

1. สภาพแวดล้อมเหมือนกับการฉายรังสีผลิตภัณฑ์จริงในงานประจำ
2. ได้กราฟปรับเทียบปริมาณรังสี (calibration curve) ที่ถูกต้องสำหรับสภาวะระหว่างที่ปรับเทียบเครื่องวัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างการจัดรวม Routine Dosimeter และ Reference Standard Dosimeter หรือ Transfer Standard Dosimeter ในการฉายรังสีเพื่อการปรับเทียบ



รูปแสดงตัวอย่างการจัดรวม alanine dosimeter ซึ่งวางประกบทั้งสองข้างของ Thin film ซึ่งเป็น Routine dosimeter



รูปแสดงตัวอย่างการจัดรวมเครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิงซึ่งบรรจุอยู่ใน ampoule และ Routine dosimeter

ภาคผนวก ข
เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. การประชุมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 11 (วทน. 11)

**อิทธิพลของโครงสร้างสีแกมมาและสารเซนซิไทเซอร์ ต่อสมบัติทางฟิสิกส์
ของน้ำยางธรรมชาติฉายรังสี**

* คมกฤษ ฤทธิรงค์¹ รศ.ดร.วิช ชิตตระกูล² รศ.ดร.ไทรภพ ผ่องสุวรรณ³ และดร.วิรัช ทวีปรีดา⁴

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โทรศัพท์ 087-3917911 E-Mail: komgrit_mastersci@windowslive.com

² ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โทรศัพท์ 0 81-9900374 E-Mail: tawat.c@psu.ac.th

³ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โทรศัพท์ 0 89-7328670 E-Mail: tripop.b@psu.ac.th

⁴ หลักสูตรวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โทรศัพท์ 0 86-7785004 E-Mail: twirach@yahoo.com

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาปริมาณรังสีแกมมาและผลของสารเซนซิไทเซอร์ต่อการวัลคาไนซ์ในน้ำยางธรรมชาติ สารตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติที่ผสมด้วยสารเซนซิไทเซอร์ n-butyl acrylate (n-BA) , tetrachloroethylene (C₂Cl₄) , trichloromethane (CHCl₃) ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดผสมกันถูกฉายด้วยรังสีแกมมาปริมาณ 14 ถึง 22 kGy สมบัติทางฟิสิกส์ ของน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ ถูกวิเคราะห์ด้วยการคำนวณค่าสัดส่วนการขยายตัวของสารตัวอย่าง ความหนาแน่นของโครงสร้างตาข่าย และสมบัติทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลง ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าน้ำยางธรรมชาติที่ผสมสารเซนซิไทเซอร์ทั้งสามชนิดของ n-BA, C₂Cl₄ และ CHCl₃ มีความหนาแน่นของ โครงสร้างตาข่ายที่เพิ่มขึ้น และแปรผันตามสัดส่วนของปริมาณการฉายรังสีแกมมา

PC04: อิทธิพลของโดสรังสีแกมมาและสารเซนซิไทเซอร์

ต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยางธรรมชาติฉายรังสี

กมลฤช ฤทธิรงค์¹ รศ.ดร.รัชช ชิตตระการ²

รศ.ดร.ไศรภพ ผ่องสุวรรณ³ และ ดร.วิรัช ทวีปรีดา⁴

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โทรศัพท์ 087-3917911 E-Mail: komgrit_mastersci@windowslive.com

² โทรศัพท์ 081-9900374 E-Mail: tawat.c@psu.ac.th

³ โทรศัพท์ 089-7328670 E-Mail: tripop.b@psu.ac.th

⁴หลักสูตรวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โทรศัพท์ 086-7785004 E-Mail: twirach@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาปริมาณรังสีแกมมาและผลของสารเซนซิไทเซอร์ต่อการวัลคาไนซ์ในน้ำยางธรรมชาติ สารตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติที่ผสมด้วยสารเซนซิไทเซอร์ n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene (C₂Cl₄), trichloromethane (CHCl₃) ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดผสมกันถูกฉายด้วยรังสีแกมมาปริมาณ 14 ถึง 22 kGy คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ถูกวิเคราะห์ด้วยการคำนวณค่าสัดส่วนการขยายตัวของสารตัวอย่าง ความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย และสมบัติทางกายภาพของน้ำยางธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำยางธรรมชาติที่ผสมสารเซนซิไทเซอร์ทั้งสามชนิดของ n-BA, C₂Cl₄ และ CHCl₃ มีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายที่เพิ่มขึ้นและแปรผันตามสัดส่วนของปริมาณการฉายรังสีแกมมา

คำหลัก: ยางธรรมชาติ กระบวนการวัลคาไนซ์ โดสรังสีแกมมา ตัวเซนซิไทเซอร์

Effect of gamma radiation dose and sensitizer on the physical properties of irradiated natural rubber latex

*R.Komgrit¹, C.Thawat², B.Tripob³ and T.Wirach⁴

¹Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University

Phone: 087-3917911 E-Mail: komgrit_mastersci@windowslive.com

²Phone: 081-9900374 E-Mail: tawat.c@psu.ac.th

³Phone: 089-7328670 E-Mail: tripob.b@psu.ac.th

⁴ Polymer Science program, Faculty of Science, Prince of Songkla University

Phone: 086-7785004 E-Mail: twirach@yahoo.com

Abstract

The vulcanization of natural rubber latex can be induced by gamma radiation, which enhances cross-linking within the rubber matrix. The purpose of this research is to investigate the effect of gamma radiation dose and sensitizers on the physical properties of irradiated natural rubber. Three sensitizers n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene (C₂Cl₄) and trichloromethane (CHCl₃) were mixed with natural rubber latex before irradiation with gamma ray dose varied from 14 to 22 kGy. Results showed that the mixture of three sensitizers with specific ratios effectively induced the cross-linking of natural rubber latex. The cross-linking ratio and improved physical properties increased with increasing gamma dose. Therefore, the mixture ratios of n-BA, C₂Cl₄ and CHCl₃ have shown to be a critical parameter in the vulcanization of natural rubber latex by gamma radiation.

Key words : Natural rubber, vulcanization, gamma dose, sensitizer

1. บทนำ

ประเทศไทยผลิตยางพารามากที่สุดอันดับหนึ่งของโลก คือประมาณปีละ 2.5 ล้านตัน คิดเป็น 1 ใน 3 ของผลผลิตทั่วโลก เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศมาเลเซีย ประเทศไทยมีผลผลิตยางมากกว่ามาเลเซียถึง 4 เท่า แต่กลับมีรายได้เข้าประเทศจากยางพาราน้อยกว่ามาเลเซียถึงปีละประมาณ 2,000 ล้านบาท (สถิติปี 2544) ตัวเลขของประเทศไทยเมื่อปี 2544 ประเทศไทยส่งออกยางดิบแปรรูปเบื้องต้นถึง 90% ของผลผลิต สร้างรายได้ 46,700 ล้านบาท [ที่มา วารสาร ประชาคมวิจัย ฉบับที่ 54 เดือน มี.ค.-เม.ย. 2547] จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น เห็นได้ว่ายางพารานับเป็นสินค้าเศรษฐกิจของประเทศ โดยแนวทางสำคัญที่จะเพิ่มมูลค่าให้แกยางพาราได้แก่การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบการใช้งานที่หลากหลาย

ในการแปรรูปยางดิบเป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้น จำเป็นจะต้องมีการนำยางมาผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน อันเป็นกระบวนการที่จะเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางจากเส้นตรง (linear) ไปเป็นร่างแหเชื่อมโยง (cross-link) เพื่อทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในกระบวนการวัลคาไนเซชันนั้น โมเลกุลของยางจะต้องมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเชื่อมโยง (vulcanizing agent) โดยจะต้องมีการใช้ความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยา และในกระบวนการวัลคาไนเซชันนี้เอง เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาและพลังงานมาก ในขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งถ้ามีการพัฒนากระบวนการวัลคาไนเซชันให้มีระยะเวลาที่สั้นลง น่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการผลิตผลิตภัณฑ์จากยาง ตลอดจนลดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต อันจะส่งผลให้มีส่วนในการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีส่วนในการเพิ่มศักยภาพของอุตสาหกรรมในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทยในการแข่งขันกับนานาประเทศมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้เป็นที่ทราบกันดีว่า สมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนเซชันขึ้นกับ สภาวะของกระบวนการวัลคาไนซ์เป็นอย่างมาก ทั้งในเรื่องของ เวลา อุณหภูมิ สูตรของสารเคมีที่ใช้ อัตราเร็วในการเกิดการวัลคาไนซ์ และระบบของการวัลคาไนซ์ที่เลือกใช้ มีงานวิจัยที่พบว่า อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาในการวัลคาไนซ์ส่งผลต่อ ชนิดของพันธะเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของยาง อันมีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ ด้วยปัญหาเรื่องของเวลาและพลังงานนี้ จึงเห็นถึงประโยชน์ของการเพิ่มอัตราเร็วและลดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต

นอกจากการใช้สารเคมีแล้ว การฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา ก็สามารถทำให้ยางคงรูปได้เช่นกัน ถือเป็นกระบวนการวัลคาไนเซชันอีกหนึ่งวิธี โดยเมื่อถูกรังสีโมเลกุลของยางจะแตกตัวให้เรดิคัล และจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอนทำให้ยางที่ได้มีความเสถียรต่อความร้อน มีความบริสุทธิ์สูงเพราะไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน จึงเหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนทางการแพทย์ ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่ควรจะมีสารเคมีเจือปนน้อยที่สุด

รวมถึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของยางในด้านต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น เช่น สมบัติเชิงกล ความต้านแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงด้านการฉีกขาด (tear resistance) ความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) และความยืดหยุ่น (elasticity)

2. วัสดุอุปกรณ์

เครื่องมือ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. ในส่วนของการเตรียมน้ำยางธรรมชาติและสารเคมีสำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์
 - 1.1 บีกเกอร์
 - 1.2 แท่งแก้วคน
 - 1.3 เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง
2. ในส่วนของการฉายรังสีแกมมา
 - 2.1 เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่นGammacell 220 Excel ที่ศูนย์ฉายรังสีแกมมา สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.)
 - 2.2 กระจุกพลาสติกสำหรับใส่ตัวอย่างขนาดเล็ก
3. ในส่วนของการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง
 - 3.1 แผ่นกระจก
 - 3.2 คูือบ
4. ในส่วนของการทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง
 - 4.1 กรรไกร
 - 4.2 เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง
 - 4.3 ขวดแก้วขนาดเล็กพร้อมฝาปิด

น้ำยางและสารเคมี

1. น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง
2. n-BA (สารเคมี เพื่อเป็นตัว sensitizer)
3. C_2Cl_4 (สารเคมี เพื่อเป็นตัว sensitizer)
4. $CHCl_3$ (สารเคมี เพื่อเป็นตัว sensitizer)
5. $C_6H_5CH_3$ (สารเคมี เพื่อทดสอบสัดส่วนการขยายตัว หรือ Swelling ratio)

3. วิธีการ

ในกระบวนการเตรียมน้ำยางธรรมชาติ การฉายรังสีแกมมาและการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง นั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 : เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของ แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง

1. การเตรียมน้ำยางธรรมชาติและสารเคมีสำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์

นำน้ำยางเข้มข้น 60% ปริมาณ 100 phr (parts per hundred rubber) มาผสมกับ n-BA 5 phr เพื่อเป็นตัว sensitizer สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์

2. การฉายรังสีแกมมา

นำน้ำยางธรรมชาติที่ผสมตัว sensitizer ตามสูตรที่ได้กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว (สูตร HAPn) ไปฉายรังสีแกมมาให้ได้ปริมาณรังสี 10 kGy

3. การขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง

นำน้ำยางฉายรังสีที่ได้ มาทำเป็นแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง โดยเทลงบนกระจกขนาด 12 x 18 cm² ที่มีขอบสูง 2 mm ใช้น้ำยางประมาณ 20 g ทิ้งไว้ให้แห้งจนใสที่อุณหภูมิห้อง (20°C - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นลอกแผ่นฟิล์มยางออก แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้งก่อน นำ ไปตากที่อุณหภูมิห้อง และอบต่อที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25(อุณหภูมิห้อง) , 50 , 60 , 70 , 80 และ 90 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ส่วนที่ 2 : เพื่อหาค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของ แผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในกรณีที่ใช้สาร sensitizer ชนิดเดียวและหลายชนิดผสมกัน สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์

1. การเตรียมน้ำยางธรรมชาติและสารเคมีสำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์

นำน้ำยางเข้มข้น 60% ปริมาณ 100 phr มาผสมกับสาร sensitizer สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์ ตามสูตร ดังนี้

การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระดับมัธยมศึกษา ครั้งที่ 11
วันที่ 2-3 กรกฎาคม 2552 ณ หอประชุมมหิศร ไทยพาณิชย์ปาร์ค พลาซ่า กรุงเทพฯ

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	HAPn ₅	HAPn ₅ C ₅	HAPn ₅ CH ₅	HAPn ₅ C ₅ CH ₅
น้ำยางเข้มข้น 60%	100	100	100	100
n-BA	5	5	5	5
C ₂ Cl ₄	-	5	-	5
CHCl ₃	-	-	5	5

2. การฉายรังสีแกมมา

นำน้ำยางธรรมชาติที่ผสมตัว sensitizer ตามสูตรที่ได้กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว สำหรับกรณี sensitizer ชนิดเดียว นำไปฉายรังสีแกมมาให้ได้ปริมาณรังสี 10, 12, 14, 16 และ 18 kGy ส่วนกรณี sensitizer หลายชนิด นำไปฉายรังสีแกมมาให้ได้ปริมาณรังสี 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy

3. การขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง

นำน้ำยางฉายรังสีที่ได้ มาทำเป็นแผ่นฟิล์มบางในลักษณะฟิล์มบาง เช่นเดียวกับวิธีการในส่วนที่ 1 แต่อบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ภายหลังจากผ่านกระบวนการเตรียมน้ำยางธรรมชาติ การฉายรังสีแกมมาและการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางทั้ง 2 ส่วนนั้น จะนำแผ่นฟิล์มบางในลักษณะฟิล์มบาง มาทดสอบสมบัติทางกายภาพต่อไป คือ

4. ทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางในลักษณะฟิล์มบาง

4.1 การทดสอบสัดส่วนการขยายตัว (Swelling ratio)

นำแผ่นฟิล์มบางในลักษณะฟิล์มบางมาตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยตัดให้มีขนาด 2 x 2 cm² หลังจากนั้นนำมาแช่ในสารละลายโทลูอีน ภายใต้ภาวะปิด ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20°C - 25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดลองซ้ำ โดยจะศึกษากรณีละ 5 ตัวอย่าง หลังจากนั้นนำสารตัวอย่างมาคำนวณตามสมการ ดังนี้

$$SwellingRatio = 1 + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)\left(\frac{w_2}{w_1}\right) - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)$$

โดยที่ค่า

- d₁ คือ ความหนาแน่นของยาง
- d₂ คือ ความหนาแน่นของสารละลายโทลูอีน
- w₁ คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างตอนเริ่มต้น
- w₂ คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างหลังจากแช่สารละลายโทลูอีน

4.2 การทดสอบความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density)

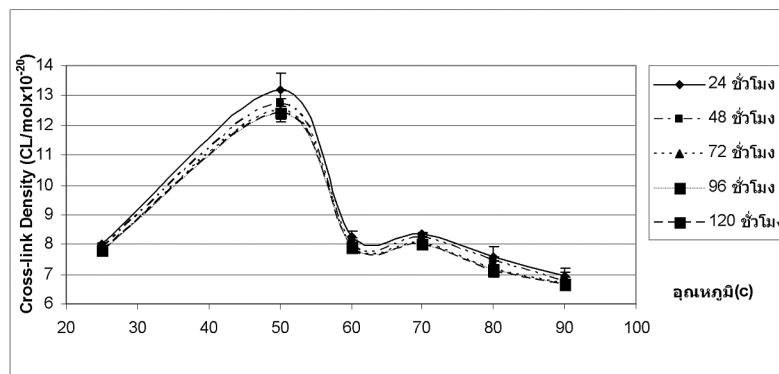
เมื่อได้ค่าสัดส่วนการขยายตัว (Swelling ratio) จากการทดสอบสัดส่วนการขยายตัวแล้ว จึงนำค่ามาแทนในสมการ เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของการเกิดสารเชื่อมโยง (Cross-link density) ต่อไป โดยอาศัยสมการ ดังนี้

$$\text{การคำนวณ} \quad \text{Cross-link density} = K \times Q^{-5/3}$$

$$\text{เมื่อค่า} \quad K = 7.93 \times 10^{-18}$$

4. ผลการทดลองและวิจารณ์

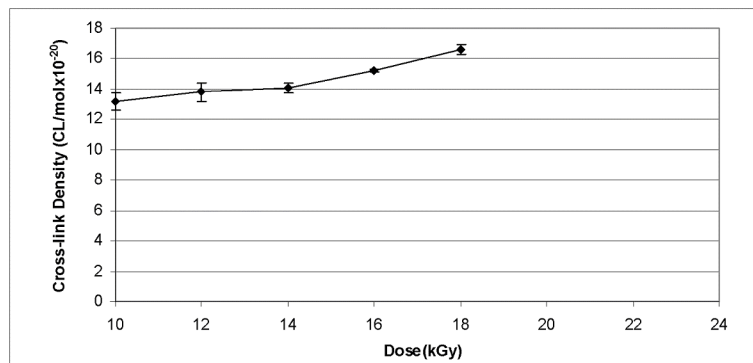
ส่วนที่ 1 : เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิต่างๆ กับ Cross-link Density ของน้ำยางสูตร HAPn₃

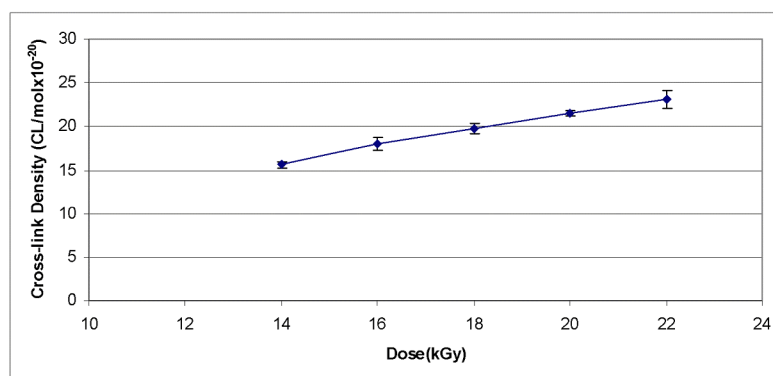
จากการทดลองพบว่า เมื่อนำน้ำยางฉายรังสีที่ได้ มาทำเป็นแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง โดยการอบที่อุณหภูมิต่างกัน ทำให้ทราบค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ให้ค่า Cross-link Density มากที่สุดคือ 50 °C ซึ่งได้ค่าประมาณ 13.2×10^{-20} CL/mol (จากรูปที่ 1) และนอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบค่า Cross-link Density โดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกัน ในการแช่สารตัวอย่างในสารละลายโทลูอีน ทำให้เราทราบค่าเวลาที่เหมาะสมที่ให้ค่า Cross-link Density มากที่สุดเช่นกัน คือ 24 ชั่วโมง (จากรูปที่ 1)

ส่วนที่ 2 : เพื่อหาค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในกรณีที่ใช้สาร sensitizer ชนิดเดียวและหลายชนิดผสมกัน สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dose กับ Cross-link Density ของน้ำยางสูตร HAPn₅

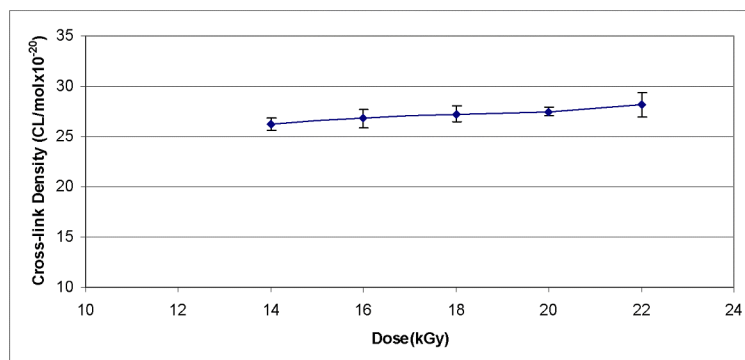
จากการทดลองพบว่า เมื่อนำน้ำยางสูตร HAPn₅ มาฉายรังสีแกมมา โดยใช้ปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน ทำให้เราทราบค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่ให้ค่า Cross-link Density มากที่สุดคือ 18 kGy ซึ่งได้ค่าประมาณ 16.6×10^{-20} CL/mol (จากรูปที่ 2) และนอกจากนั้น เมื่อสังเกตค่าทั้งหมด ทำให้ทราบว่าค่า Cross-link Density มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและแปรผันกับปริมาณรังสีที่ได้รับ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dose กับ Cross-link Density ของน้ำยางสูตร HAPn₅C₅

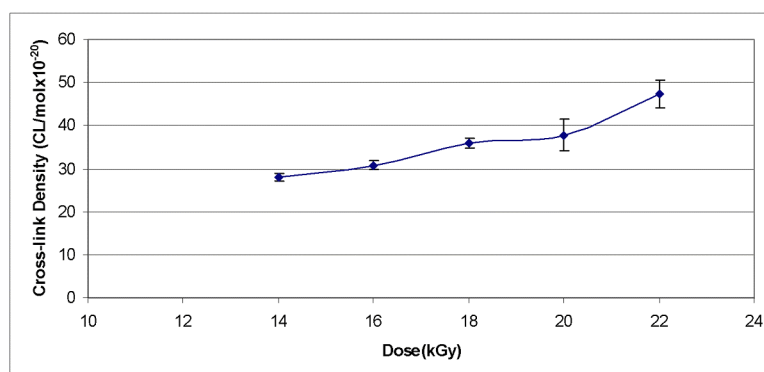
จากการทดลองพบว่า เมื่อนำน้ำยางสูตร HAPn₅C₅ มาฉายรังสีแกมมา โดยใช้ปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน ทำให้เราทราบค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่ให้ค่า Cross-link Density มากที่สุดคือ 22 kGy ซึ่งได้ค่าประมาณ 23.1×10^{-20} CL/mol (จากรูปที่ 3) และนอกจากนั้น เมื่อสังเกตค่าทั้งหมด ทำให้ทราบว่าค่า Cross-link Density มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและแปรผันกับปริมาณรังสีที่ได้รับ

การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 11
วันที่ 2-3 กรกฎาคม 2552 ณ หอประชุมมหิศร ไทยพาณิชย์ปาร์ค พลaza กรุงเทพฯ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dose กับ Cross-link Density ของน้ำยางสูตร HAP_nCH₅

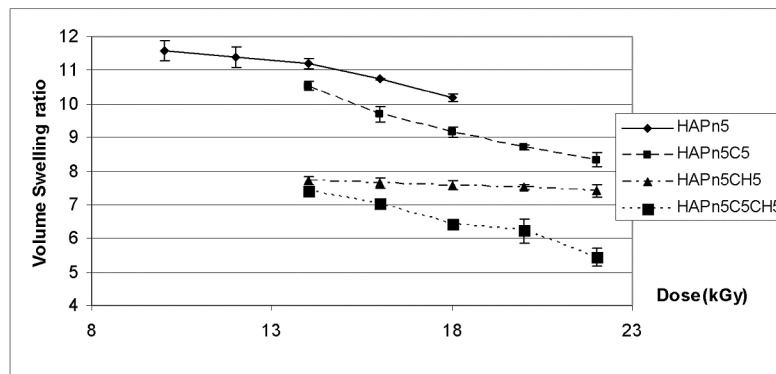
จากการทดลองพบว่า เมื่อนำน้ำยางสูตร HAP_nCH₅ มาฉายรังสีแกมมา โดยใช้ปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน ทำให้เราทราบค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่ให้ค่า Cross-link Density มากที่สุดคือ 22 kGy ซึ่งได้ค่าประมาณ 28.2×10^{-20} CL/mol (จากรูปที่ 4) และนอกจากนั้น เมื่อสังเกตค่าทั้งหมด ทำให้ทราบว่าค่า Cross-link Density มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและแปรผันกับปริมาณรังสีที่ได้รับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dose กับ Cross-link Density ของน้ำยางสูตร HAP_nC₅CH₅

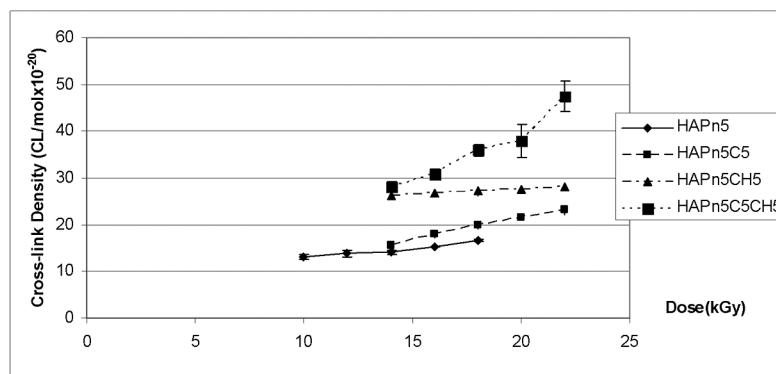
จากการทดลองพบว่า เมื่อนำน้ำยางสูตร HAP_nC₅CH₅ มาฉายรังสีแกมมา โดยใช้ปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน ทำให้เราทราบค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่ให้ค่า Cross-link Density มากที่สุดคือ 22 kGy ซึ่งได้ค่าประมาณ 47.4×10^{-20} CL/mol (จากรูปที่ 5) และนอกจากนั้น เมื่อสังเกตค่าทั้งหมด ทำให้ทราบว่าค่า Cross-link Density มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและแปรผันกับปริมาณรังสีที่ได้รับ

การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 11
วันที่ 2-3 กรกฎาคม 2552 ณ หอประชุมมหิศร ไทยพาณิชย์ปาร์ค พลาซ่า กรุงเทพฯ



รูปที่6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dose กับ Swelling ratio ของน้ำยางทั้ง 4 สูตร

จากการทดลองพบว่า เมื่อนำน้ำยางทั้ง 4 สูตร มาฉายรังสีแกมมา ทำให้เราทราบค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่ทำให้ค่า Swelling ratio มากที่สุดคือ 10 kGy ซึ่งทำให้ได้ค่าประมาณ 11.58 (จากรูปที่ 6) ซึ่งเป็นค่า Swelling ratio ของน้ำยางสูตร HAPn₅ และนอกจากนั้น เมื่อสังเกตค่าทั้งหมด ทำให้ทราบว่าค่า Swelling ratio มีแนวโน้มลดลงและแปรผกผันกับปริมาณรังสีที่ได้รับ รวมถึงสาร sensitizer ทั้ง 3 ชนิดด้วย โดยที่สาร sensitizer ทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเสริมกันด้วย สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์ (จากรูปที่6)



รูปที่7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Dose กับ Cross-link Density ของน้ำยางทั้ง 4 สูตร

จากการทดลองพบว่า เมื่อนำน้ำยางทั้ง 4 สูตร มาฉายรังสีแกมมา ทำให้เราทราบค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่ค่า Cross-link Density มากที่สุดคือ 22 kGy ซึ่งทำให้ได้ค่าประมาณ 47.4×10^{-20} CL/mol (จากรูปที่ 7) ซึ่งเป็นค่า Cross-link Density ของน้ำยางสูตร HAPn₅C₅ CH₃ และนอกจากนั้นเมื่อสังเกตค่าทั้งหมด ทำให้ทราบว่าค่า Cross-link Density มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและแปรผันกับปริมาณรังสีที่ได้รับ รวมถึงสาร sensitizer ทั้ง 3 ชนิดด้วย โดยที่สาร sensitizer ทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเสริมกันด้วย สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์ (จากรูปที่ 7)

5. สรุป

ส่วนที่ 1 : เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง

1. อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 50 °C ซึ่งทำให้ได้ค่า Cross-link Density มากที่สุดคือ ประมาณ 13.2×10^{-20} CL/mol
2. ค่า Cross-link Density มีค่าไม่แตกต่างกันมาก เมื่อใช้เวลาที่แตกต่างกันในการแช่สารตัวอย่างในสารละลายโทลูอีน แต่เวลาที่เหมาะสมที่สุดคือ 24 ชั่วโมง

ส่วนที่ 2 : เพื่อหาค่าปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง ในกรณีที่ใช้สาร sensitizer ชนิดเดียวและหลายชนิดผสมกัน สำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์

1. ปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มจำนวนค่า Cross-link Density ได้
2. เมื่อเพิ่มชนิดของตัว sensitizer ในปริมาณที่เท่ากัน สามารถเพิ่มจำนวน Cross-link Density ได้
3. เมื่อเปรียบเทียบความสามารถของตัว sensitizer 2 ตัว คือ C₂Cl₄ กับ CHCl₃ ในการเพิ่มจำนวน Crosslink Density พบว่า CHCl₃ มีประสิทธิภาพมากกว่า C₂Cl₄

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย วิทยานิพนธ์ชั้นนี้ ขอขอบคุณหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือของห้องปฏิบัติการยาง ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องฉายรังสีแกมมา ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่สนับสนุนเงินทุน และอนุญาตให้ใช้อุปกรณ์วิจัยที่จำเป็นและห้องปฏิบัติการ

7. เอกสารอ้างอิง

1. ปรีเปรม จงรักษ์. 2537. ผลของสารป้องกันออกซิเดชันต่อน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเชิงฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
2. พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
3. พรพรรณ นิธิอุทัย. 2540. ยาง: เทคนิคการออกสูตร. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
4. พิฎลีนา สาบา. 2546. การวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยพอลิเอมีนร่วมกับโมโนเมอร์อะโครลิก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเชิงฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
5. โยธิน ชีรงศ์. 2537. การเตรียมและสมบัติของยางโปรตีนค้ำจากน้ำยางธรรมชาติ. โครงการระดับปริญญาตรี
6. สิริธร แก้วกล้า. 2549. กาวผสมของน้ำยางธรรมชาติกับกาวพอลิยูรีเทนเพื่อใช้ในการติดยางวัลคาไนซ์กับหนังสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
7. เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. 2540. ยางธรรมชาติเบื้องต้น. ภาควิชาเทคโนโลยียางละพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
8. เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. 2543. การผลิตยางธรรมชาติ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
9. เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสีและ ไพโรจน์ กลิ่นพิทักษ์. 2540. การดัดแปลงยางธรรมชาติโปรตีนค้ำและสมบัติความเสียดทาน . ภาควิชาเทคโนโลยียางละพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
10. อารีษา มาลากาญจน์. 2548. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการวัลคาไนซ์เซชันของยางธรรมชาติคอมเปาเวค. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
11. Andrzej G.Chmielewski , Mohammad Haji-Saeid and Shamshad Ahmed. 2005. Progress in radiation processing of polymers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 236 :44-54.
12. H.Chirinos , F.Yoshii , K.Makuuchi and A.Lugao. 2003. Radiation vulcanization of natural rubber latex using 250 keV electron beam machine. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 208 :256-259.
13. M.E.Haque , N.C.Dafader , F.Akhtar and M.U. Ahmad. 1996. Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. Radiat. Phys. Chem. Vol. 48 No. 4. pp :505-510.
14. M.M.Jayasuriya , K.Makuuchi and F.Yoshi. 2001. Radiation vulcanization of natural rubber latex using TMPMA and PEA. European Polymer Journal 37 : 93-98.

Effect of gamma radiation dose and sensitizer on the physical properties of irradiated natural rubber latex

*R.Komgrit¹, C.Thawat², B.Tripob³ and T.Wirach⁴

¹Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University

E-Mail: komgrit_mastersci@windowslive.com

² E-Mail: tawat.c@psu.ac.th

³ E-Mail: tripob.b@psu.ac.th

⁴ Polymer Science program, Faculty of Science, Prince of Songkla University

E-Mail: twirach@yahoo.com



Abstract

The vulcanization of natural rubber latex can be induced by gamma radiation, which enhances cross-linking within the rubber matrix. The purpose of this research is to investigate the effect of gamma radiation dose and sensitizers on the physical properties of irradiated natural rubber. Three sensitizers n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene (C_2Cl_4) and trichloromethane ($CHCl_3$) were mixed with natural rubber latex before irradiation with gamma ray dose varied from 14 to 22 kGy. Results showed that the mixture of three sensitizers with specific ratios effectively induced the cross-linking of natural rubber latex. The cross-linking ratio and improved physical properties increased with increasing gamma dose. Therefore, the mixture ratios of n-BA, C_2Cl_4 and $CHCl_3$ have shown to be a critical parameter in the vulcanization of natural rubber latex by gamma radiation.

Introduction

Natural rubber latex is conventionally cured by a reaction with sulfur, zinc oxide and accelerators. As accelerators dithiocarbamates are mostles used. And these compounds are potentially allergic. This is a problem, especially in under examination, for surgical uses and household gloves. All these difficulties and problems could be avoided by changing from sulfur-heat cross-linking to radiation vulcanization of NR latex (RVNRL). Radiation was applied on latex for vulcanization (cross-linking) without sensitizing agent. So, higher radiation dose was needed for sufficient cross-linking between the rubber molecules. The several kinds of sensitizers were used to reduce the radiation dose required for vulcanization. The purpose of this work is to require radiation doses for vulcanization of natural rubber latex with different sensitizing systems are determined. The other conditions such as effect of mixing time of sensitizer with latex, concentration of sensitizer, standing time of latex after mixing with sensitizer on the properties of irradiated latex film are also investigated.

Methodology

In this study, 60% DRC latex was used throughout the study except under certain conditions. Then, 5 phr of three sensitizers n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene (C_2Cl_4) and trichloromethane ($CHCl_3$) were mixed with natural rubber latex from the 4 formulation.

Irradiation of latex was carried out using γ -rays from ^{60}Co source, available at Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT), Thailand, by varying the radiation dose at a dose rate 10 kGy/h. In addition, irradiation of latex was carried out at a dose varied from 14 to 22 kGy, to evaluate the effect of dose on physical properties.

Results and Discussion

From Fig 2 the optimum dose is 10 kGy for maximum volume swell ratio from HAPn₃ formulation (11.58). From this fig it is seen that with the increase of radiation dose and sensitizers, the volume swell ratio decreases. By the swelling ratio measurement, the cross-link densities were calculated at various radiation doses. Fig 3 shows the cross-link densities of the latex film at various radiation doses. It is also evident that although the optimum dose is 22 kGy for maximum cross-link density from HAPn₃C₂CH₃ formulation (47.4×10^{-20} CL/mol). From this fig it is seen that with the increase of radiation dose and sensitizers, the cross-link density increases.

Conclusions

From both fig it is seen that with the increase of radiation dose and sensitizers, the cross-link density increases. Volume swell ratio of C_2Cl_4 and $CHCl_3$ treated RVNRL is shown in Fig. 2. Compared to the C_2Cl_4 treated samples, the volume swell ratio of $CHCl_3$ treated RVNRL is lower. These results suggest that cross-link density of $CHCl_3$ treated samples were comparatively higher, and it is further proved with cross-link density results which are shown in Fig. 3

Acknowledgements

The authors would like to thank the Graduate School and the Prince of Songkla University (PSU) Thailand for research grants and funding, the Department of Physics, Polymer Science Program and Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT) for supporting facilities.

References

1. Andrzej G.Chmielewski, Mohammad Haji-Saeid and Shamshad Ahmed. 2005. Progress in radiation processing of polymers. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 236 :44-54.
2. H.Chirinos, F.Yoshii, K.Makuuchi and A.Lugao. 2003. Radiation vulcanization of natural rubber latex using 250 keV electron beam machine. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 208 :256-259.
3. M.E.Haque, N.C.Dafader, F.Akhtar and M.U. Ahmad. 1996. Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. Radiat. Phys. Chem. Vol. 48 No. 4, pp :505-510.
4. M.M.Jayasuriya, K.Makuuchi and F.Yoshi. 2001. Radiation vulcanization of natural rubber latex using TMPTMA and PEA. European Polymer Journal 37 : 93-98.

Ingredients (phr)	Formulation			
	HAPn ₃	HAPn ₃ C ₂	HAPn ₃ CH ₃	HAPn ₃ C ₂ CH ₃
Latex	100	100	100	100
n-BA	5	5	5	5
C ₂ Cl ₄	-	5	-	5
CHCl ₃	-	-	5	5

Table 1 Formulation of compound ingredients.



Fig. 1. Rubber plantation and it is product.

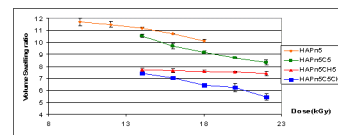


Fig. 2. Variation of volume swell ratio with radiation dose.

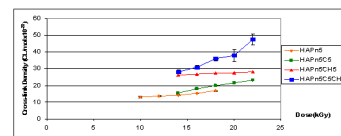


Fig. 3. Variation of cross-link density of RVNRL with radiation dose.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายคมกฤษ ฤทธิรงค์
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5010220015
 วุฒิกการศึกษา
 วุฒิ ชื่อสถาบัน ปีที่สำเร็จการศึกษา
 วิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2549
 (ฟิสิกส์)

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

คมกฤษ ฤทธิรงค์ , รศ.ดร.ธวัช ชิตตระการ , รศ.ดร.ไศรภพ ผ่องสุวรรณและดร.วิรัช ทวีปรีดา ,2552. “อิทธิพลของโครงสร้างสีแกมมาและสารเซนซิไทเซอร์ ต่อสมบัติทางฟิสิกส์ ของน้ำยางธรรมชาติฉายรังสี” การประชุมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวมคดียร์ ครั้งที่ 11 (วทน. 11), 2-3 กรกฎาคม 2552, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.