



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ทุนวิจัย  
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน  
ที่เตรียมจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
โดย

เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรร์

กันยายน ๒๕๔๗

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินที่เตรียม  
จากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

**Reinforcement of Natural Rubber with Cardanol-Formaldehyde Resins  
Prepared from Cashew Nut Shell Liquid**

สถาบันวิทยบริการ  
โดย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุดจิตร

กันยายน 2547

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนและช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้จัดสรรเงินทุนวิจัยกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2546 (ครั้งที่ 5) เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคคล และหน่วยงานต่างๆ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้ความร่วมมือ และความอนุเคราะห์สารเคมี วัสดุดิบ เครื่องมือสำหรับการขึ้นรูป การวิเคราะห์ และการทดสอบ ตลอดจนสถานที่ทำงานวิจัย ดังรายนามต่อไปนี้

1. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องทดสอบ และสารเคมีบางชนิด รวมทั้งนักวิจัยและเจ้าหน้าที่ของสถาบัน
2. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องทดสอบ
3. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้อนุเคราะห์สถานที่ซึ่งใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมผลงานตลอดระยะเวลาของการทำวิจัย
4. ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง และรองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่

เลขทะเบียน ๑๑๒.๖๕๘

วัน, เดือน, ปี ๒๙.๗๘.๔๖

ชื่อโครงการวิจัย                      การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนอล-ฟอรั่มลดีไฮด์เรซินที่เตรียม  
จากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์  
ชื่อผู้วิจัย                                รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร  
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ            สิงหาคม 2547

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ยางธรรมชาติได้ถูกเสริมแรงด้วยคาร์บอนอล-ฟอรั่มลดีไฮด์เรซินที่เตรียมจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยคาร์บอนอล-ฟอรั่มลดีไฮด์เรซินทั้งชนิดรีโซลและโนโวแลคถูกสังเคราะห์จากคาร์บอนอลที่สกัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ การสังเคราะห์เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นของคาร์บอนอลและฟอรั่มลดีไฮด์โดยมีเบสและกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุดของรีโซลเรซิน คือ 75.37% โดยการใช้อัตราส่วนโดยโมลของฟอรั่มลดีไฮด์/คาร์บอนอลเท่ากับ 2.0 ภายใต้อุณหภูมิ 8.0 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุดของโนโวแลคเรซิน คือ 79.68% โดยการใช้อัตราส่วนโดยโมลของฟอรั่มลดีไฮด์/คาร์บอนอลเท่ากับ 0.8 ภายใต้อุณหภูมิ 8.0 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง และใช้เทคนิคทางสเปกโตรสโคปี (FT-IR และ  $^{13}\text{C}$  NMR) เพื่อหาลักษณะเฉพาะโครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนอล-ฟอรั่มลดีไฮด์เรซินที่เตรียมได้

เมื่อนำเรซินผสมกับยางธรรมชาติ พบว่า สามารถเข้ากันได้ดีที่อัตราส่วนต่างๆ และผลจากการตรวจสอบพฤติกรรมการบวมของยางผสมรีโซลและโนโวแลค แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีพฤติกรรมการบวมแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลจากเรซินทั้งสองมีความว่องไวทางเคมีที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การใส่คาร์บอนอล-ฟอรั่มลดีไฮด์เรซินเข้าไปในยางธรรมชาติทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง ความทนแรงดึง โมดูลัสที่ความเครียด 100% และ 300% เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม ระยะยืดที่จุดขาด และการคืนตัวลดลงตามที่ได้คาดไว้



Project Title	Reinforcement of Natural Rubber with Cardanol-Formaldehyde Resins Prepared from Cashew Nut Shell Liquid
Name of the Investigator	Associate Professor Saowaroj Chuayjuljit
Year	2004

### **Abstract**

In this research, natural rubber was reinforced with cardanol-formaldehyde resin prepared from cashew nut shell liquid. Cardanol-formaldehyde resins both resole and novolak were synthesized from cardanol which extracted from cashew nut shell. These were done via a condensation polymerization of cardanol and formaldehyde in the presence of base and acid catalysts. CF-resole with highest yield of 75.37% was prepared by using a molar ratio of 2.0 formaldehyde/cardanol at pH 8.0 and 90°C for 8 h. CF-novolak with highest yield of 79.68% was prepared by using a molar ratio of 0.8 formaldehyde/cardanol at pH 2.2 with 100°C for 7 h. Spectroscopic techniques, FT-IR and <sup>13</sup>C NMR were employed to characterize the chemical structure of the obtained cardanol-formaldehyde resins.

The resins were found to be compatible with natural rubber in various formulations. The cured behavior of natural rubber blended with either the CF resole or novolak was investigated. It was found that the cured behaviors of CF-resole and CF-novolak samples were quite different, reflecting differences in chemical reactivities. Furthermore, the incorporation of cardanol-formaldehyde resins into natural rubber gave significant improvements in mechanical properties such as hardness, tensile strength, modulus at 100% and 300% elongation and abrasion resistance. However, elongation at break and compression set of the blends were decreased as expected.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อภาษาไทย	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iii
สารบัญ	iv
รายการตารางประกอบ	v
รายการรูปภาพประกอบ	vii
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ความรู้ทางวิชาการและวารสารปริทรรศน์	3
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	14
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	67
ภาคผนวก	69

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะเฉพาะของ CNSL มาตรฐาน	7
ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางแท่ง STR XL	22
ตารางที่ 3.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ทำสารประกอบยางสูตรต่างๆ	23
ตารางที่ 4.1 หมูฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ CNSL	32
ตารางที่ 4.2 หมูฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของคาร์ดานอล	34
ตารางที่ 4.3 คาร์บอน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของคาร์ดานอล	35
ตารางที่ 4.4 หมูฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล	37
ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อัตราส่วน โดยโมล [F]/[C] ต่างๆ กัน	38
ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล	39
ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้ pH ของปฏิกิริยาต่างๆ กัน	39
ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนของเรซิน	39
ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่อุณหภูมิต่างๆ กัน	40
ตารางที่ 4.10 สมบัติทางความร้อนของเรซิน	40
ตารางที่ 4.11 หมูฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิด โน โวแลค	42
ตารางที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อัตราส่วน โดยโมล [F]/[C] ต่างๆ กัน	43
ตารางที่ 4.13 สมบัติทางความร้อนของเรซิน	43
ตารางที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้ pH ของปฏิกิริยาต่างๆ กัน	44
ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของเรซิน	44
ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่อุณหภูมิต่างๆ กัน	45
ตารางที่ 4.17 สมบัติทางความร้อนของเรซิน	45
ตารางที่ 4.18 เวลาที่ยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงเริ่มวัลคาไนซ์	46
ตารางที่ 4.19 เวลาที่ยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงเกิดการวัลคาไนซ์	47
ตารางที่ 4.20 ความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	48
ตารางที่ 4.21 ความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน	50
ตารางที่ 4.22 ความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	51
ตารางที่ 4.23 ความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน	52
ตารางที่ 4.24 ระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	54
ตารางที่ 4.25 ระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน	55



	หน้า
ตารางที่ 4.26 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	56
ตารางที่ 4.27 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อน	58
ตารางที่ 4.28 ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง	60
ตารางที่ 4.29 การกินตัวของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง	62
ตาราง ก. ค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงก่อน อบเร่งด้วยความร้อน	69
ตาราง ข. ค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงหลัง อบเร่งด้วยความร้อน	69
ตาราง ค. ค่าความทนแรงดึงของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วย ความร้อน	70
ตาราง ง. ค่าความทนแรงดึงของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วย ความร้อน	70
ตาราง จ. ระยะยืดที่จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วย ความร้อน	71
ตาราง ฉ. ระยะยืดที่จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วย ความร้อน	71
ตาราง ช. มอดูลัสที่ความเครียด 100% ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	72
ตาราง ซ. มอดูลัสที่ความเครียด 100% ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อน	72
ตาราง ฌ. มอดูลัสที่ความเครียด 300% ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	73
ตาราง ฎ. มอดูลัสที่ความเครียด 300% ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อน	73
ตาราง ฏ. ความต้านทานการสึกหรอของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรง	74
ตาราง ฐ. การกินตัวของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรง	75



## รายการรูปภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ไอโซเมอร์ของพอลิไอโซพรีน	3
รูปที่ 2.2 ผลและเปลือกของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	6
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์	7
รูปที่ 2.4 กระบวนการดีคาร์บอซิเลชัน	7
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของรีโซล	8
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเมทิลลอลคาร์ดานอลที่เกิดขึ้นได้	9
รูปที่ 2.7 พันธะเมทิลีน	9
รูปที่ 2.8 พันธะอีเทอร์	9
รูปที่ 2.9 โครงสร้างเชื่อมขวางที่เกิดในรีโซล	10
รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของ โนโวแลค	10
รูปที่ 2.11 โครงสร้างเชื่อมขวางที่เกิดใน โนโวแลค	11
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง	17
รูปที่ 3.2 เครื่อง BUCHI Rotavapour R-205	18
รูปที่ 3.3 (ก) อุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์เรซิน และ (ข) ตู้อบสูญญากาศ	19
รูปที่ 3.4 เครื่องบดแบบบอลมิลล์	21
รูปที่ 3.5 เครื่อง Micromeritics Sedigraph 5100 Particle Size Analyzer	22
รูปที่ 3.6 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง	24
รูปที่ 3.7 เครื่อง Monsanto Oscillating Disk Rheometer	25
รูปที่ 3.8 เครื่อง Instron Testing Machine Model 1101	26
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนทดสอบรูปดัมเบลล์สำหรับหาค่าความทนแรงดึง	27
รูปที่ 3.10 เครื่อง Model 917 Maximum Hardness Indicator แบบ Shore A	27
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Akron Abrasion Tester) Model APH-40	28
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนทดสอบสำหรับหาค่าความต้านทานการสึกหรอ	28
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบการคั้นตัว (compression Set Tester Milano/Italia)	29
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนทดสอบการคั้นตัว	30
รูปที่ 3.15 การบ่มเร่งด้วยความร้อนในตู้อบ	30
รูปที่ 4.1 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL)	31
รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของ CNSL	32

	หน้า
รูปที่ 4.3 คาร์ดานอล	33
รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล	34
รูปที่ 4.5 $^{13}\text{C}$ NMR สเปกตรัมของคาร์ดานอลใน $\text{CDCl}_3$	35
รูปที่ 4.6 คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่ผ่านการบดด้วยบอลมิลล์แล้ว	36
รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล	37
รูปที่ 4.8 คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่ผ่านการบดด้วยบอลมิลล์แล้ว	41
รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก	42
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง	46
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง	48
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	49
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อน	50
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	51
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อน	53
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยึดที่จุดขาดกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	54
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยึดที่จุดขาดกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อน	56
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยึด 100% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	57
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยึด 300% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน	58
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยึด 100% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อน	59
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสที่ระยะยึด 300% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังอบเร่งด้วยความร้อน	59
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการสึกหรอกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง	61



## บทที่ 1

### บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ที่สุดของโลก จึงทำให้ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่ทำรายได้เข้าประเทศปีละกว่าแสนล้านบาท ซึ่งส่วนใหญ่ถูกส่งไปจำหน่ายยังต่างประเทศในรูปของวัตถุดิบ โดยผลิตยางส่งออกทั้งในรูปของน้ำยางข้น (concentrated latex) และยางดิบแห้งชนิดต่างๆ เช่น ยางแท่ง STR (Standard Thai Rubber) ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet) และยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheet) เป็นต้น ซึ่งในยามที่ราคายางตกต่ำก็จะมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมของชุมชนชาวสวนยางพารา ซึ่งมีอยู่ประมาณ 7 ล้านคน ดังนั้นมาตรการหนึ่งที่จะช่วยลดผลกระทบดังกล่าว คือ มาตรการสร้างความเข้มแข็งให้แก่อุตสาหกรรมยางพาราในประเทศ โดยเฉพาะในด้านการวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ที่จะนำไปสู่การพัฒนาตลอดจนการสร้างนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยางพาราในประเทศให้สามารถเกิดผลลัพธ์ทำให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางความรู้ด้านยางธรรมชาติในอนาคต ซึ่งรัฐบาลได้พยายามส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปจากยางธรรมชาติในประเทศให้เพิ่มมากขึ้นแทนการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ และเพื่อเพิ่มรายได้ของการส่งออกในรูปของผลิตภัณฑ์ยาง ตลอดจนเป็นการสร้างงานให้กับประชากรในประเทศ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ผลิตจากยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ยางรัดของ ท่อยาง เบาะและที่นอนฟองน้ำ รองเท้ายาง ถุงมือยาง ยางรองเครื่องจักร และยางรองคอสพาน เป็นต้น ซึ่งการทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีความแข็งแรงทนทาน จำเป็นต้องใส่สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers) เข้าไปผสมกับยางธรรมชาติร่วมกับสารเติมแต่งประเภทอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล และพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางให้เหมาะกับการใช้งาน ดังนั้น สารตัวเติมเสริมแรงจึงเป็นสารเติมแต่งที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมยางเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะงานด้านวิศวกรรม สารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก (carbon black) และซิลิกา (silica) ซึ่งการใช้ เรซินจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงแทนคาร์บอนแบล็กและซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากการใส่คาร์บอนแบล็กและซิลิกาในปริมาณที่มากเกินไปอาจมีผลทำให้ยางแข็งและมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นมากในขณะทำการผสม จึงได้มีการเลือกใช้เรซินเป็นสารตัวเติมเสริมแรงเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งได้แก่ ฟีนอลิกเรซิน (phenolic resin) และสไตรีนเรซิน (styrene resin) เป็นต้น

โดยทั่วไปฟีนอลิกเรซินสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) และฟีนอล (phenol) ซึ่งเหมาะที่จะใช้เป็นส่วนตัวเติมเสริมแรงให้กับยางสังเคราะห์ที่มีขั้ว เช่น ยางไนไตรล์ (nitrile rubber) แต่ถ้านำไปใช้เป็นส่วนเสริมแรงในยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ จะพบปัญหาความเข้ากันไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว จากการที่มีสภาพขั้ว (polarity) ต่างกันจะทำให้ไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอในเนื้อยาง ซึ่งจะส่งผลให้การเชื่อมขวาง (crosslinking) ระหว่างโมเลกุลเกิดไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (cardanol-formaldehyde resins) จากคาร์ดานอลซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลิกประเภทหนึ่งที่มีความเป็นไฮโดรคาร์บอนมากกว่าฟีนอล และสามารถสกัดได้จากน้ำมันของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เพื่อแก้ปัญหาความไม่เข้ากันระหว่างเรซินและยางธรรมชาติ

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่งที่ปลูกกันมากทางภาคใต้ของประเทศไทย โดยเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีเป็นจำนวนมากและมีราคาถูก และสามารถนำมาสกัดให้น้ำมันฟีนอลิกสีน้ำตาลเข้ม ที่เรียกว่า ‘น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์’ (cashew nut shell liquid, CNSL) ซึ่งได้มีการนำไปใช้งานทั้งในทางอุตสาหกรรมและวิศวกรรม โดย CNSL เป็นของผสมระหว่างสารประกอบฟีนอลิกต่างๆ ที่ได้จากธรรมชาติ การใช้งานของ CNSL ได้แก่ ใช้ทำสีและวาร์นิชที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อน และใช้ทำวัสดุเชิงประกอบ (composite materials) เป็นต้น

CNSL ในรูปของน้ำมันดิบประกอบด้วยกรดอะนาคาร์ดิก (anacardic acid) คาร์ดอล (cardol) และคาร์ดานอล (cardanol) โดยประกอบด้วยกรดอะนาคาร์ดิกประมาณร้อยละ 70-80 ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นคาร์ดานอลได้ด้วยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) โดยการให้ความร้อน กับ CNSL และสามารถนำคาร์ดานอลที่ได้ไปเตรียมเป็นคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินต่อไป ซึ่ง เรซินที่เตรียมได้จะมีสมบัติที่สำคัญ คือ ทนความร้อนได้ดี ทนต่อสารเคมีและสารซักฟอก มีพื้นผิวที่แข็ง และราคาถูก ดังนั้น การเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อใช้เป็นส่วนตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำไปสู่การพัฒนาในเชิง อุตสาหกรรม และเพื่อเป็นการใช้สารปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีค่าอย่างประหยัด จึงควรรหาแนวทางที่จะนำวัตถุดิบจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ทดแทน นอกจากนี้ ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

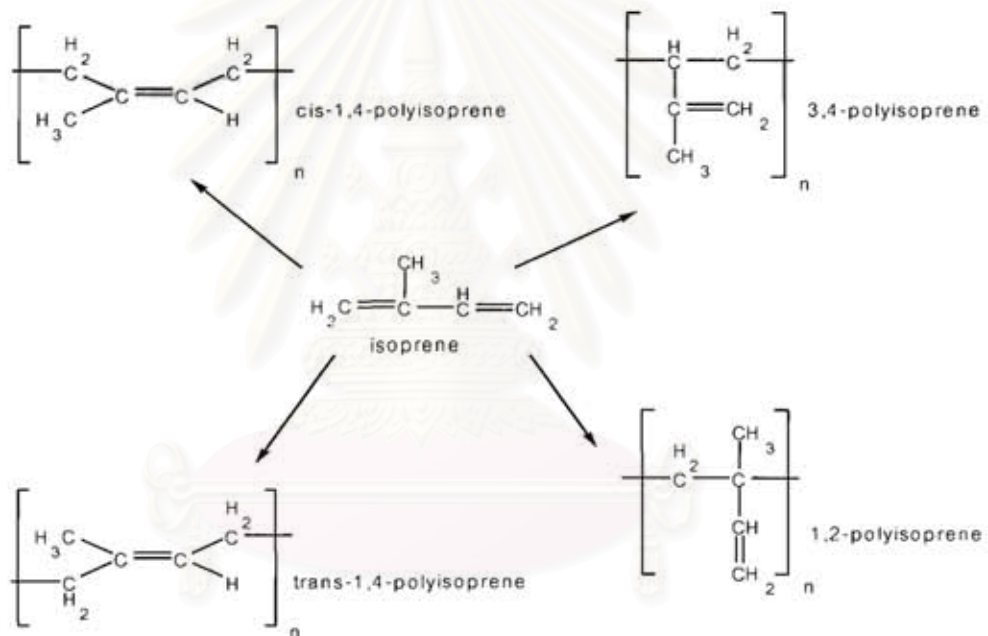


## บทที่ 2

### ความรู้ทางวิชาการและวารสารปริทรรศน์

#### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติประกอบด้วยหน่วยของ 'ไอโซพรีน' (isoprene) ต่อกันแบบหัวต่อหาง (head to tail) ได้เป็น 'พอลิไอโซพรีน' (polyisoprene) ซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ  $-(CH)_n-$  โดย n มีค่าตั้งแต่ 15,000 และสามารถเกิดเป็นไอโซเมอร์ (isomers) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ไอโซเมอร์ของพอลิไอโซพรีน

ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ในทางการค้าได้จากต้นยางพาราซึ่งมีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า 'Hevea brasiliensis' ที่มีโครงสร้างเป็น cis-1,4 polyisoprene ประมาณ 97% โดยยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ  $1.85 \times 10^6$

ปัจจุบันประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในรูปแบบต่างๆ ทั้งที่เป็นยางดิบแห้ง ซึ่งได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง STR ยางแผ่นผึ่งแห้ง และยางเครพ เป็นต้น รวมทั้งยางเหลว เช่น น้ำยางข้น เป็นต้น ประเทศไทยส่งยางเป็นสินค้าออกไปยัง 66 ประเทศทั่วโลก โดยส่งออกไปยัง

ประเทศญี่ปุ่น จีน ประเทศประชาคมยุโรป (EU) สหรัฐอเมริกา มาเลเซีย และเกาหลีใต้ ขางธรรมชาติที่ส่งออกส่วนใหญ่เป็นยางแผ่นรมควัน รองลงมาได้แก่ ขางแท่ง และน้ำยางข้น (60% DRC) อุตสาหกรรมหลักที่สำคัญที่สุดของยาง คือ ขางรถยนต์ (มากกว่า 60%) นอกนั้นใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมและในครัวเรือน เช่น รองเท้ายาง ท่อยาง ชิ้นส่วนรถยนต์ สายพานลำเลียง ถุงมือยาง พื้นพรม ผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำ และยางยืด เป็นต้น การที่ขางเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในงานต่างๆ มากมาย เนื่องจากขางมีสมบัติพิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่นๆ คือ มีสภาพยืดหยุ่น (elasticity) และมีความยืดหยุ่น (flexibility) สูง นอกจากนี้ ยังมีเนื้อหีบ สามารถกันน้ำและอากาศไม่ให้ซึมผ่านได้ง่าย อีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้น ขางจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และมีคุณค่ามาก

ขางธรรมชาติเป็นขางซึ่งเหมาะที่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปทั่วไปที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษ เช่น การทนน้ำมัน หรือทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีการผลิตขางสังเคราะห์ขึ้นหลายชนิด แต่ปริมาณการใช้ขางธรรมชาติเพื่อทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปก็ยังคงสูงอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากขางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีความทนแรงดึง (tensile strength) ความทนการฉีกขาด (tear strength) และความสามารถในการคืนตัวหรือการกระดอน (resilience) สูง มีสมบัติเหนียวติดกันเอง (tackiness) ดีมาก มีความต้านทานการสึกหรอ (abrasion resistance) ดีมาก แต่ด้อยกว่าขาง SBR เล็กน้อย สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี และมีความร้อนสะสมต่ำ เป็นต้น

## 2.2 สารเติมแต่งสำหรับขางธรรมชาติ (Additives for Rubber)

สารเติมแต่งต่างๆ ที่ใส่เข้าไปในขางจะช่วยทำให้ขางมีสมบัติตามต้องการ ทั้งในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป การวัลคาไนซ์ และการใช้งาน ขางที่ใส่สารเติมแต่งแล้วยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้จนกว่าจะเกิดการวัลคาไนซ์เสียก่อน ขางที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ เรียกว่า 'ขางดิบหรือขางไม่คงรูป' (green rubber หรือ uncured rubber) ส่วนขางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว เรียกว่า 'ขางคงรูป' (vulcanized rubber หรือ cured rubber) ซึ่งปกตินิยมบอกปริมาณสารเติมแต่งทุกชนิดที่ใส่เข้าไปในขางเทียบกับขาง 100 ส่วน จึงมีหน่วยเป็น phr (parts per hundred of rubber) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบสูตรของผสมสารเคมีที่มีปริมาณสารเคมีแตกต่างกันว่ามีผลต่อกระบวนการผลิตและสมบัติของขางอย่างไร และการเขียนสูตรส่วนผสมของขางมักเขียนเรียงลำดับสารที่ใส่เข้าไปในขางก่อน-หลัง เพื่อช่วยให้ผู้ผลิตจัดตารางการผสมสารเติมแต่งได้ง่ายขึ้น

สารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในขางมีหลายประเภท และทำหน้าที่ต่างๆ กัน ซึ่งได้แก่



สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids) : เป็นสารเคมีที่ใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อยเพื่อปรับปรุงความสามารถในการผลิตทั้งในขั้นตอนการผสมและการแปรรูป เช่น ในระหว่างการอัดรีด (extrusion) การรีดแผ่น (calendering) หรือการฉีดแบบ (injection molding) โดยจะเป็นส่วนสำคัญในการลดต้นทุนการผลิต การปรับปรุงคุณภาพ และเพิ่มปริมาณการผลิต ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับอุตสาหกรรมการทำผลิตภัณฑ์ยาง

สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agents) : เป็นสารที่มีความสำคัญในกระบวนการวัลคาไนเซชัน ช่วยทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล เพราะถ้าไม่มีการเชื่อมขวางก็จะไม่มีการปรับปรุงทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

สารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerators) : ใช้ร่วมกับสารวัลคาไนซ์เพื่อลดเวลาของการวัลคาไนซ์หรือการบ่ม (vulcanization time หรือ cured time) โดยเพิ่มอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ ยังอาจช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพบางอย่างของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (activators) : เป็นสารที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารเร่งวัลคาไนซ์ให้ทำหน้าที่ได้ดีขึ้น โดยเข้าทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารเร่งวัลคาไนซ์ ช่วยให้การวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น และยังปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (ageing resistors) : ซึ่งได้แก่ สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidants) สารแอนติโอโซนแนนท์ (antiozonant) และสารอื่นๆ ที่ป้องกันยางจากการเสื่อมสภาพขณะใช้งานหรือถูกตั้งทิ้งไว้ โดยมีออกซิเจน โอโซน แสง ความร้อน และอื่นๆ เร่งให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

สารตัวเติมหรือฟิลเลอร์ (fillers) : เป็นสารเติมแต่งซึ่งเป็นของแข็งที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความทนแรงดึง) ให้กับพอลิเมอร์ จะเรียกว่า 'สารตัวเติมเสริมแรงหรือฟิลเลอร์เสริมแรง' (reinforcing fillers) สารที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก และซิลิกา เพราะจะช่วยเสริมแรงให้กับผลิตภัณฑ์ยางได้ แต่ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไปจนเนื้อหรือเมทริกซ์ของยางไม่สามารถยึดสารตัวเติมเข้าด้วยกัน จะทำให้ยางมีความแข็งกระด้างและเปราะในที่สุด ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์จะเสียไป

สารเติมแต่งอื่นๆ (miscellaneous ingredients) : เป็นสารที่มีการใช้งานจำเพาะ ไม่ใช่สารที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งได้แก่ สารหน่วงไฟ (flame retardant) สารขัดถู (abrasive) สารฟู (blowing agent) สารสี (colorant) และสารก่อกลิ่น (odorant) เป็นต้น

### 2.3 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew Nut Shell Liquid, CNSL)

มะม่วงหิมพานต์เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย<sup>1</sup> โดยได้รับการส่งเสริมให้เป็นพืชอุตสาหกรรมในช่วงแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติที่ผ่านมา มีแหล่งปลูกดั้งเดิมในภาคใต้และได้มีการขยายการปลูกอย่างกว้างขวางไปยังภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับสภาพความต้องการบริโภคในปัจจุบันนับว่ามีมากขึ้นตลอดเวลา ปริมาณการผลิตของไทยและของโลกยังมีไม่เพียงพอ ทั้งนี้เพราะตลาดโลกมีความต้องการบริโภคถึง 160,000 ตันต่อปี แต่ผลผลิตรวมทั่วโลกได้ประมาณ 110,000 ตันต่อปี เท่านั้น<sup>2</sup>

ลักษณะของผลมะม่วงหิมพานต์จะคล้ายผลแอปเปิ้ล เมื่อนำเนื้อออกจะเหลือแต่เมล็ดที่มีลักษณะคล้ายไตหรือเมล็ดถั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กระบวนการแปรรูปเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ประกอบด้วยขั้นตอน คือ การเตรียมเมล็ด การกะเทาะเปลือก การอบเมล็ดเนื้อใน การลอกเชื้อ การคัดเกรด และการบรรจุเพื่อจำหน่าย โดยเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่มีเป็นจำนวนมากจะเป็นส่วนเหลือทิ้งหลังจากเอาเมล็ดเนื้อในออกแล้ว ซึ่งจะเป็นปัญหาต่อเกษตรกร ตลอดจนผู้ประกอบการในการกำจัดอีกทั้งยังส่งผลต่อสภาพแวดล้อม

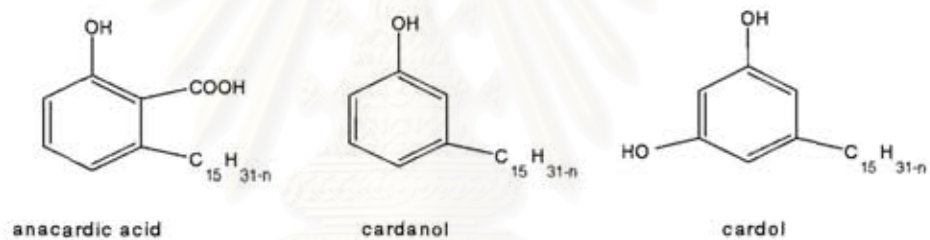


รูปที่ 2.2 ผลและเปลือกของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

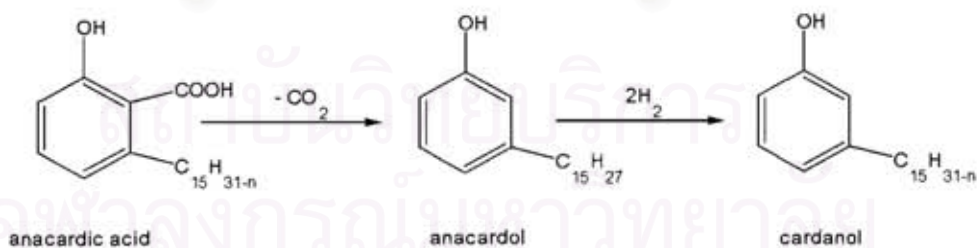


เปลือกของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สามารถนำมาสกัดให้น้ำมันฟีนอลิกสีน้ำตาลเข้มที่เรียกว่า 'น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์' (cashew nut shell liquid, CNSL) ซึ่งมีการนำไปใช้งานกันบ้างแล้วในทางอุตสาหกรรมและวิศวกรรม โดย CNSL เป็นของผสมระหว่างสารประกอบฟีนอลิกต่างๆ ที่ได้จากธรรมชาติ การใช้งานของ CNSL ได้แก่ ใช้ทำสี และวาร์นิช ที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำวัสดุเชิงประกอบ (composite materials)<sup>3</sup> เป็นต้น

CNSL ในรูปของน้ำมันดิบประกอบด้วยกรดอะนาคาร์ดิก (anacardic acid), คาร์ดอล (cardol) และคาร์ดานอล (cardanol) ซึ่งมีสูตร โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.3 ส่วนประกอบหลักของ CNSL ได้แก่ กรดอะนาคาร์ดิก ซึ่งมีอยู่ประมาณ 70-80% และสามารถเปลี่ยนกรดอะนาคาร์ดิกให้เป็นคาร์ดานอลได้ด้วยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation)<sup>4</sup> โดยการให้ความร้อนกับ CNSL ดังปฏิกิริยาที่แสดงในรูปที่ 2.4 และลักษณะเฉพาะของ CNSL แสดงไว้ในตารางที่ 2.1<sup>5</sup>



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์<sup>4</sup>



รูปที่ 2.4 กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน<sup>4</sup>

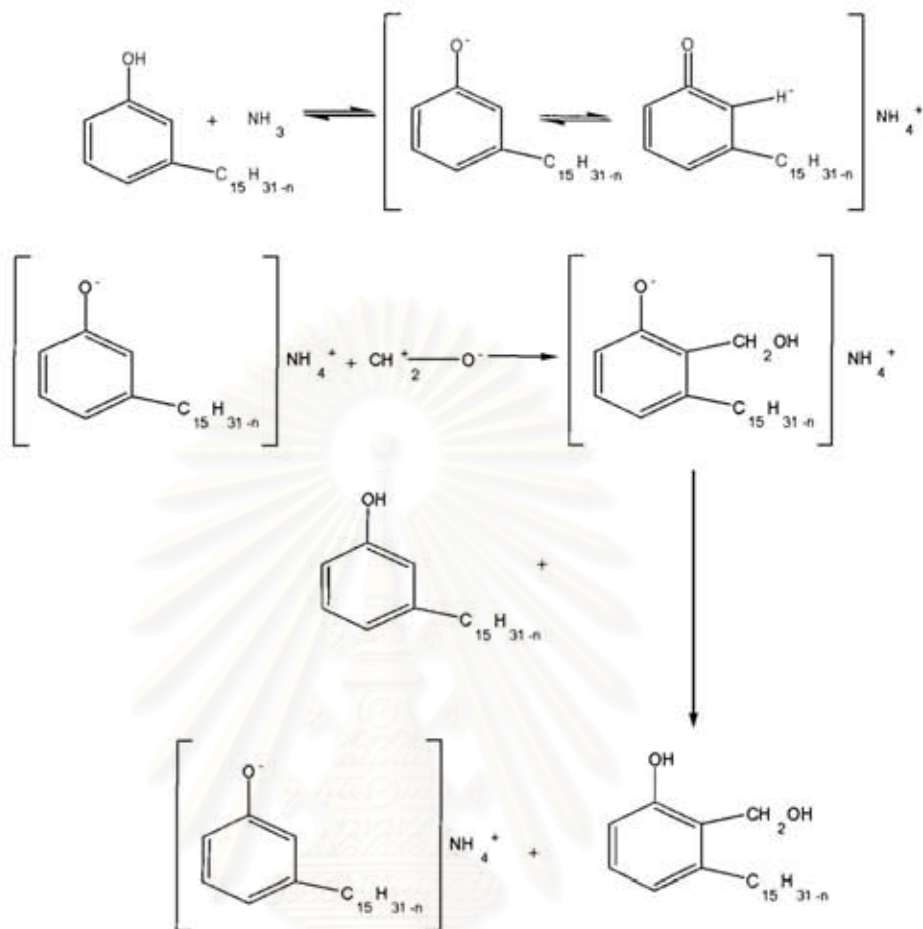
### ตารางที่ 2.1 ลักษณะเฉพาะของ CNSL มาตรฐาน<sup>5</sup>

Characteristic	Requirement
Specific gravity,30/30 °C	0.95 – 0.97
Viscosity, cP	550
Moisture, % by wt	1.0
Matter insoluble in toluene,% by wt	1.0
Loss in wt on heating,% by wt	2.0
Ash,% by wt	1.0
Iodine value	
a) Wij's method	250
b) Catalytic method	375
Polymerization	
a) time,min	4
b) Viscosity,cP	30
c) Viscosity after acid washing,cP	200

เมื่อนำคาร์ดานอลไปเตรียมเป็นคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน จะได้เรซินที่มีสมบัติสำคัญ ได้แก่ ทนความร้อน ทนสารเคมีและสารซักฟอกได้ดี มีพื้นผิวที่แข็ง และราคาถูก ซึ่งกลไกการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินจะคล้ายกับของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน กล่าวคือ สามารถเกิดได้ทั้งชนิดรีโซลเรซิน (resole resin) และ โนวแลกเรซิน (novolak resin)

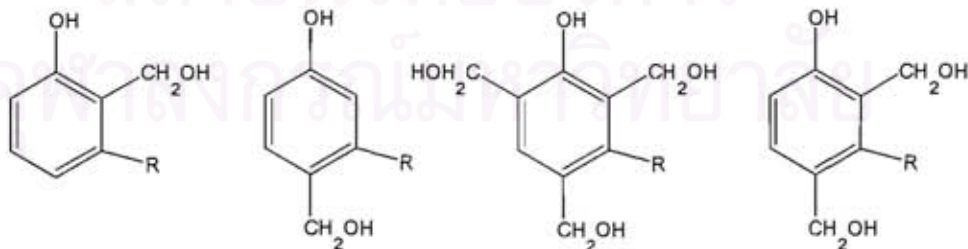
#### คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

เรซินชนิดนี้เกิดได้เมื่อใช้ฟอร์มัลดีไฮด์มากเกินไป (excess) ในภาวะปฏิกิริยาที่เป็นค่าอัตราส่วนโดยโมลอยู่ในช่วง 1.2–3.0 : 1 (ฟอร์มัลดีไฮด์ : คาร์ดานอล)<sup>6,7</sup> ซึ่งฟอร์มัลดีไฮด์นี้จะอยู่ในรูปของสารละลาย (ฟอร์มาลิน) ประมาณ 36–50% ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) ที่อุณหภูมิ 70–100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6–9 ชั่วโมง จึงได้เป็นเมทิลอลคาร์ดานอลพรีพอลิเมอร์ (methylol cardanol prepolymer) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



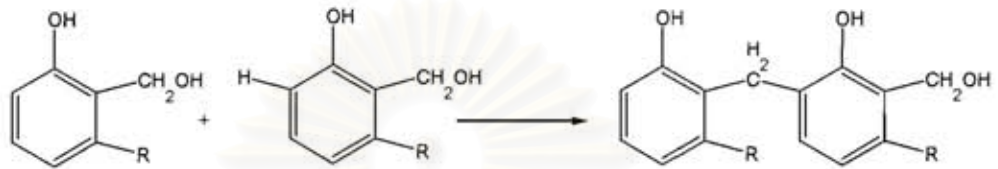
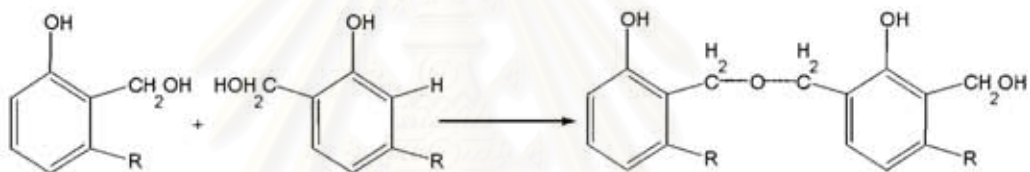
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของรีโซลเรซิน<sup>7,8</sup>

เนื่องจากมีฟอร์มัลดีไฮด์ที่มากเกินไป จึงสามารถเกิดเมทิลอลคาร์ดานอลได้หลายรูปแบบ ดังนี้ :

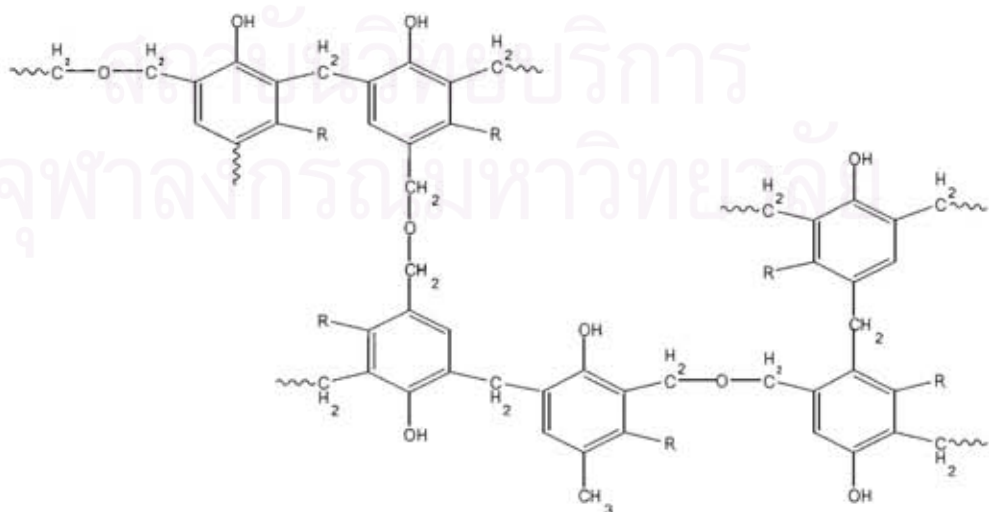


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเมทิลอลคาร์ดานอลที่เกิดขึ้นได้<sup>7,8</sup>

เมทิลอลคาร์ดานอลนี้ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากและสามารถทำปฏิกิริยาได้ 2 ทาง คือ หมู่ไฮดรอกซิลของเมทิลอลคาร์ดานอลเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนของเมทิลอลคาร์ดานอลของอีก โมเลกุลหนึ่งเกิดพันธะเมทิลีน (methylene bridge) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และหมู่ไฮดรอกซิลของ เมทิลอลคาร์ดานอลเข้าทำปฏิกิริยากันเองเกิดพันธะอีเทอร์ (ether bridge) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.7 พันธะเมทิลีน<sup>7,8</sup>รูปที่ 2.8 พันธะอีเทอร์<sup>7,8</sup>

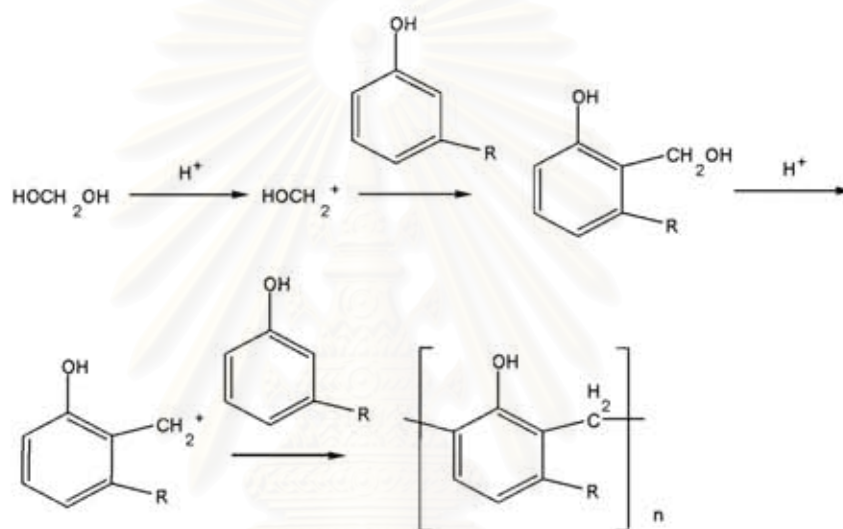
เนื่องจากคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลมีหมู่เมทิลอลที่มากเกินไป ดังนั้น เมื่อให้ความร้อนต่อไปจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมรีโซลจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (crosslink) เกิดเป็นเทอร์โมเซตพลาสติกได้เองโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.9

รูปที่ 2.9 โครงสร้างเชื่อมขวางที่เกิดในรีโซลเรซิน<sup>7,8</sup>



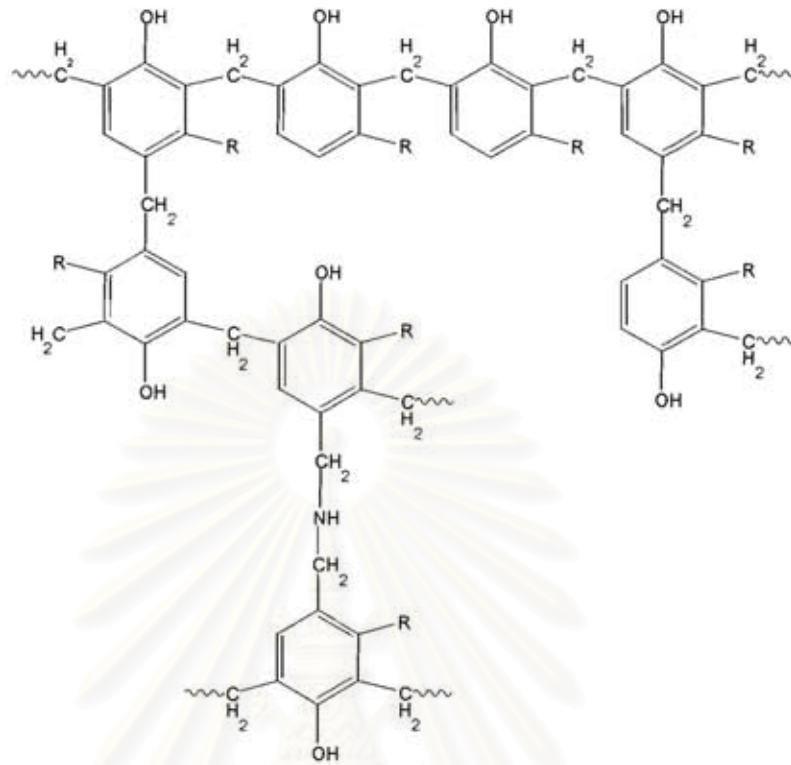
### คาร์คานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลคเรซิน

เรซินชนิดนี้เกิดได้เมื่อใช้คาร์คานอลปริมาณมากเกินไป ในภาวะปฏิกิริยาที่เป็นกรด อัตราส่วนโดยโมลอยู่ในช่วง 0.75–0.85 : 1 (ฟอร์มัลดีไฮด์ : คาร์คานอล) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ กรดซัลฟิวริกเข้มข้นหรือกรดออกซาลิกประมาณ 1–2 หรือน้อยกว่า 1 ส่วนต่อ คาร์คานอล 100 ส่วน ที่อุณหภูมิ 80–110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6–9 ชั่วโมง<sup>6,8</sup> เนื่องจากโนโวแลคใช้ฟอร์มัลดีไฮด์น้อย ดังนั้น โอกาสที่จะเกิดพันธะอีเทอร์จึงมีน้อยมาก มีเพียงพันธะเมทิลีนเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของโนโวแลคเรซิน<sup>7,8</sup>

เนื่องจากโนโวแลคมีหมู่เมทิลลอยู่ น้อยมาก ดังนั้น การให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้โนโวแลคเกิดโครงสร้างเชื่อมขวางได้สมบูรณ์ จึงต้องมีการใส่สารบ่ม (curing agent) เพื่อช่วยให้เกิดการเชื่อมขวาง เช่น เฮกซะเมทิลีนเตตระมีน (hexamethylene tetramine, HMTA) ประมาณ 5–15% ลงไปแล้วให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเชื่อมขวาง โดยพันธะที่เกิดขึ้นจะมีทั้งพันธะเมทิลีนและพันธะเบนซิลเอมีน (benzylamine crosslink bridge) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างเชื่อมขวางที่เกิดในโนโวแลค<sup>7,8</sup>

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mahanwar และคณะ<sup>8</sup> ได้ทดลองเตรียมฟีนอลิกเรซินจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งเป็นน้ำมันฟีนอลิกที่ได้จากธรรมชาติ แทนการใช้ฟีนอลบางส่วนหรือทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มีราคาถูกกว่าฟีนอลมาก เขาทั้งสองได้ศึกษาผลของการแทนที่ฟีนอลด้วย CNSL ในการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินทั้งชนิดรีโซลและโนโวแลค ซึ่งเขาพบว่าเวลาในการเกิดคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินจะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CNSL มีความไวต่อปฏิกิริยาต่ำ เพราะมี steric hindrance ที่เกิดจากหมู่ที่อยู่ด้านข้าง นอกจากนี้ ยังพบว่า การเติม CNSL ทำให้ความทนแรงดึง (tensile strength) ของผลิตภัณฑ์ลดลง แต่เพิ่มสมบัติความทนแรงกระแทก (impact strength) และสมบัติทางไฟฟ้าของผลิตภัณฑ์ขึ้น นอกจากนี้ เขายังพบว่า CNSL ที่มีค่าความเป็นกรด (acid value) มากกว่า 10 ไม่สามารถใช้เตรียมเรซินได้ ผลที่ได้จะเป็นเพียงของไหลหนืดที่มีปริมาณเรซินน้อยมาก ซึ่งเขาแนะนำว่า CNSL ที่มีค่าความเป็นกรดน้อยกว่า 10 เท่านั้น จึงจะเหมาะสมในการนำมาใช้เตรียมเรซิน

Maria และคณะ<sup>9</sup> ได้หาแนวทางการใช้ประโยชน์ของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารประกอบต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นแหล่งกำเนิดทางธรรมชาติของ non-isoprenoid phenolic lipids เช่น กรดอะนาคาร์ดิก คาร์คอล คาร์คานอล และเมทิลคาร์คอลที่สำคัญและราคาถูกที่สุด โดยเขาได้แยกเอาคาร์คอลลอก จาก CNSL เพื่อนำไปสังเคราะห์ lasiodiphodin ซึ่งมีสมบัติแอนติลูคีเมีย (anti-leukemic properties) จากการนำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 500 กรัม มาสกัดด้วยเอทานอลปริมาณ 2 ลิตร จะได้ CNSL 157 กรัม (31% โดยน้ำหนัก) และเมื่อนำ CNSL 25 กรัม ไปแยกส่วนจะได้กรดอะนาคาร์ดิก (17.28 กรัม, 69.1%) คาร์คอล (6.15 กรัม, 24.6%) คาร์คานอล (1.2 กรัม, 4.8%) และเมทิลคาร์คอล (0.37 กรัม, 1.5%)

Vu และคณะ<sup>10</sup> ได้สังเคราะห์คาร์คานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน โดยนำ CNSL ไปต้มที่อุณหภูมิ 130-140 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนกรดอะนาคาร์ดิกให้เป็นคาร์คานอล จากนั้นจึงนำคาร์คานอลไปสังเคราะห์เป็นคาร์คานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินทั้งชนิดรีโซล (CF-resole) และ โนโวแลก (CF-novolak) ภายใต้ภาวะการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน เมื่อนำเรซินที่สังเคราะห์ได้ไปผสมกับยางธรรมชาติแทนการใช้ฟีนอลิกเรซินเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ เช่น ความเหนียว การทนความร้อน ความแข็ง และมอดูลัส ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเมื่อใช้ CF-resole และ CF-novolak เรซินจะแตกต่างกัน ส่วนสมบัติความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเรซินเพิ่มขึ้น โดยไม่ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติเสียไป นอกจากนี้ ยังพบว่า CF-novolak เรซิน เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ที่มีประสิทธิภาพสูงในยางธรรมชาติอีกด้วย

Ikeda และคณะ<sup>11</sup> ได้นำคาร์คานอลที่ได้จาก CNSL ไปสังเคราะห์พอลิฟีนอลด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบออกซิเดชันที่ใช้ iron-*N,N'*-ethylenebis(salicylideneamine) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และทำการบ่มด้วย cobalt naphthenate หรือด้วยความร้อน เพื่อนำไปใช้เป็นสารเคลือบผิวในระบบที่ปราศจากฟอร์มัลดีไฮด์ เพื่อหลีกเลี่ยงความเป็นพิษของฟอร์มัลดีไฮด์ จากการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของพอลิฟีนอลด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า พอลิฟีนอลที่ได้ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ไม่อิ่มตัวในสายโซ่ที่อยู่ด้านข้างของโมเลกุล และฟิล์มที่ได้จะมีความเงามันสูง



Menon และคณะ<sup>12</sup> ได้นำ CNSL และ CNSL-formaldehyde (CNSLF) เรซิน มาผสมกับยางธรรมชาติในปริมาณ 5–15 phr โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความสามารถในการแปรรูป และสมบัติทางกายภาพ/สมบัติเชิงกลของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว จากการทดลองพบว่า เรซินช่วยลดความหนืด และกำลังไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการผสมด้วยเครื่อง brabender ซึ่งการใส่ CNSL ปริมาณ 15 phr และ CNSLF ปริมาณ 5–10 phr จะเพิ่มความทนแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด (tear strength) และระยะยืด ณ จุดขาดให้สูงขึ้นมากกว่ายางที่ไม่ได้ใส่สารดังกล่าว อีกทั้ง CNSL และ CNSLF ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติให้ดีขึ้นอีกด้วย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ขั้นตอน คือ

- 3.1.1 การสังเคราะห์คาร์บอนอล-พอร์มัลดีไฮด์เรซิน
- 3.1.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่นๆ
- 3.1.3 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

#### 3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 การสังเคราะห์คาร์บอนอล-พอร์มัลดีไฮด์เรซิน

- 3.2.1.1 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
- 3.2.1.2 เฮกเซน (AR grade : Merck Company)
- 3.2.1.3 พอร์มัลดีไฮด์ (40% w/w ในรูปฟอร์มาลิน : บริษัท ทีซี. สภาพร)
- 3.2.1.4 สารละลายแอมโมเนีย (25%, AR grade : Merck Company)
- 3.2.1.5 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (98%, AR grade : Merck Company)
- 3.2.1.6 โทลูอิน (AR grade : Merck Company)
- 3.2.1.7 HMTA (Hexamethylenetetramine : Merck Company)

##### 3.2.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่นๆ

- 3.2.2.1 ยางธรรมชาติ (STR 10 : Rayong Bangkok Rubber Company)
- 3.2.2.2 กำมะถัน (vulcanizing agent : Loxley Public Company)
- 3.2.2.3 ซิงก์ออกไซด์ (activator : Univertures Public Company)
- 3.2.2.4 ซิงก์สเตียเรต (activator : Imperial Company)
- 3.2.2.5 MBT (accelerator : Flexsys Company)
- 3.2.2.6 คาร์บอนแบล็ก N330 (Thai Carbon Black Company)
- 3.2.2.7 ซิลิกา (FK Company)
- 3.2.2.8 PEG 3350 (FK Company)

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.1 การสังเคราะห์และวิเคราะห์คาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

- 3.3.1.1 อุปกรณ์เครื่องแก้ว
- 3.3.1.2 เครื่องสกัดตัวทำละลายชนิดสุญญากาศ (BUCHI Rotavapour R-205)
- 3.3.1.3 ตู้อบสุญญากาศ
- 3.3.1.4 เครื่องบดแบบบอลมิลล์
- 3.3.1.5 FT-IR (Nicolet Impact FT-IR Spectrometer)
- 3.3.1.6 NMR (Bruker, ACF 200 MHz)
- 3.3.1.7 TGA (Netzsch รุ่น STA 409C)
- 3.3.1.8 เครื่องหาขนาดอนุภาค (Micromeritics Sedigraph 5100 Particle Size Analyzer)

#### 3.3.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่นๆ

- 3.3.2.1 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (2-roll mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $8 \times 20$  นิ้ว (Model R11-3FF)
- 3.3.2.2 เครื่องวัลคาไนซ์แบบอัด (Vulcanizing Press) ขนาดแท่นอัด  $50 \times 50$  เซนติเมตร แรงอัด  $150 \text{ กก./cm}^2$  ของโรงงานชัยเจริญการช่าง
- 3.3.2.3 เครื่องทดสอบหาเวลาและลักษณะการวัลคาไนซ์ยางผสม (Rheometer ชนิด moving die type) (Model MDR 2000)

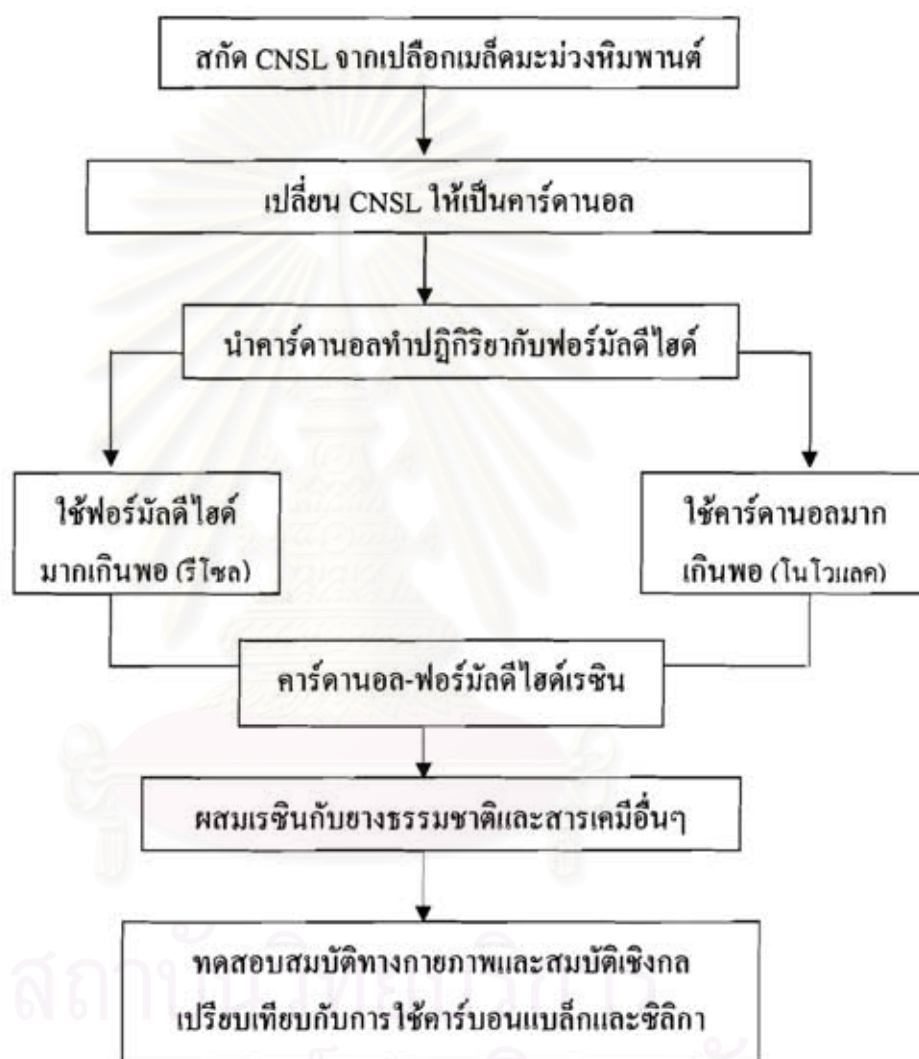
#### 3.3.3 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

- 3.3.3.1 เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม (Compress Air Sample Cutter) (Model SDAP-100-N)
- 3.3.3.2 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Tensile Tester) (Model 1101)
- 3.3.3.3 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Akron Abrasion Tester) (Model APH-40)
- 3.3.3.4 เครื่องทดสอบการคืนตัว (Compression Set Tester) (Milano/Italia)
- 3.3.3.5 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester) (Model 917 Mmaximum Hardness Indicator)
- 3.3.3.6 ตู้อบยาง (Geers Rubber Aging Oven) (Ueshima A 0103 Japan)
- 3.3.3.7 SEM (JEOL, JSM-5800LV)



### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

### 3.4.1 การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

#### การสกัดน้ำมันจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์มาล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นนำไปตากให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน เมื่อแห้งสนิทแล้วนำไปแช่ในเฮกเซน (hexane) เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จะได้สารละลายน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปสกัดเอาเฮกเซนออกด้วยเครื่องสกัดตัวทำละลายชนิดสูญญากาศ (rotavapour) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เพื่อนำเฮกเซนกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 3.2 เครื่อง BUCHI Rotavapour R-205

สิ่งที่เหลืออยู่หลังการสกัดเฮกเซนออกไปแล้ว คือ น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (cashew nut shell liquid, CNSL) จากนั้นนำ CNSL ที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR โดยใช้ความละเอียด  $4\text{ cm}^{-1}$  และความถี่  $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$

#### กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน

การเปลี่ยน CNSL ให้เป็นคาร์ดานอลด้วยกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ทำโดยการให้ความร้อนแก่ CNSL ที่อุณหภูมิ  $130\text{-}140$  องศาเซลเซียส<sup>10</sup> ภายใต้ความดันบรรยากาศ  $300\text{-}400$  มิลลิเมตรปรอท ด้วยเครื่องสกัดตัวทำละลายชนิดสูญญากาศ ของเหลวที่เหลือถูกนำไปกลั่นภายใต้ภาวะสูญญากาศอีกครั้งเพื่อให้ได้คาร์ดานอลที่บริสุทธิ์ แล้วนำคาร์ดานอลที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR และเทคนิค NMR โดยใช้โหมด  $^{13}\text{C}$  ความถี่  $200\text{ MHz}$  ที่มี  $\text{CDCl}_3$  เป็นตัวทำละลาย

### การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

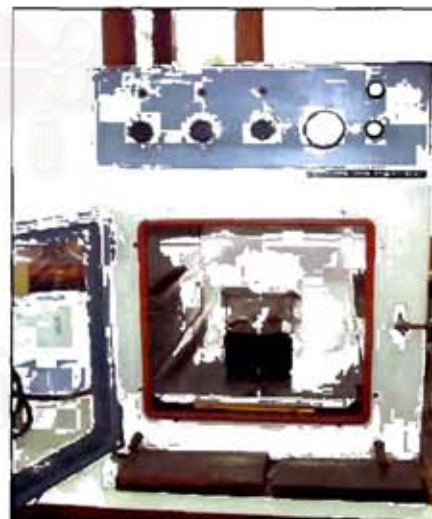
การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลต้องใช้ฟอร์มัลดีไฮด์ปริมาณมากเกินไปและใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการทดลองได้แบ่งเป็น 3 ส่วน เพื่อหาอัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ( $[F]/[C]$ ) ค่า pH และอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เรซินปริมาณมากที่สุด แล้วนำเรซินที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ซึ่งใช้ช่วงอุณหภูมิ 0-600 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

#### ส่วนที่ 1 : หาอัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ( $[F]/[C]$ )

ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์ (F) และคาร์ดานอล (C) ดำเนินไปภายใต้ระบบปิด พร้อมทั้งมีการกวนและให้ความร้อนคงที่ ณ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) ของผสมถูกควบคุมให้มี pH เท่ากับ 8 ด้วยการใช้สารละลายของแอมโมเนีย (25%) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของ  $[F]/[C]$  เท่ากับ 1.6, 1.8, 2.0 และ 2.2 ซึ่งเมื่อครบเวลาของการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ให้นำของผสมที่ได้ไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.3 (ข) แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) อุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์เรซิน และ (ข) ตู้อบสุญญากาศ



### ส่วนที่ 2 : หาค่า pH

ทำการทดลองเหมือนในส่วนที่ 1 แต่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ  $[F]/[C]$  ที่ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินมากที่สุด (คำนวณจากส่วนที่ 1) มาทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH เป็น 7.6, 7.8, 8.0, 8.2 และ 8.4 แล้วนำผลที่ได้ทั้งหมดไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน

### ส่วนที่ 3 : หาอุณหภูมิ

ทำการทดลองเหมือนในส่วนที่ 2 แต่ใช้ค่า pH ที่ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินมากที่สุด (คำนวณจากส่วนที่ 2) มาทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการทดลองเป็น 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำผลที่ได้ทั้งหมดไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน

### การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลค

การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลคต้องใช้คาร์ดานอลปริมาณมากเกินพอ และใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในการทดลองได้แบ่งเป็น 3 ส่วนเพื่อหาอัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ( $[F]/[C]$ ) ค่า pH และอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เรซินปริมาณมากที่สุด แล้วนำเรซินที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR และสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ซึ่งใช้ช่วงอุณหภูมิ 0-600 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

### ส่วนที่ 1 : หาอัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ( $[F]/[C]$ )

ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์ (F) และคาร์ดานอล (C) ดำเนินไปภายใต้ระบบปิด พร้อมทั้งมีการกวนและให้ความร้อนคงที่ ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ของผสมถูกควบคุมให้มี pH เท่ากับ 2.2 ด้วยการใส่กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีอัตราส่วนโดยโมลของ  $[F]/[C]$  เท่ากับ 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 ซึ่งเมื่อครบเวลาการเกิดปฏิกิริยาแล้วให้เติม HMTA ลงในของผสม และนำของผสมที่ได้ไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน

### ส่วนที่ 2 : หาค่า pH

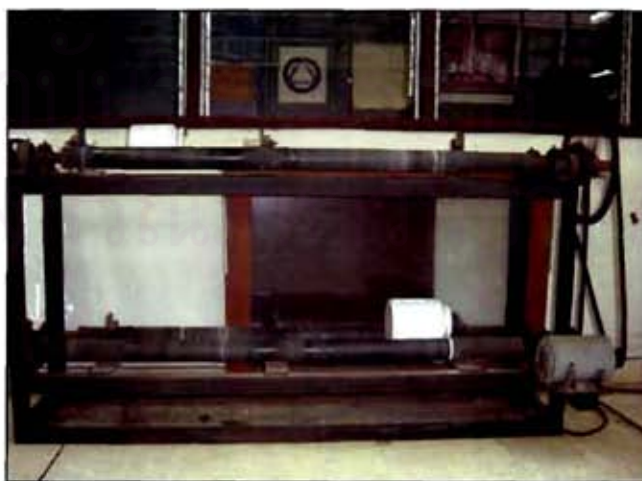
ทำการทดลองเหมือนในส่วนที่ 1 แต่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ  $[F]/[C]$  ที่ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินมากที่สุด (คำนวณจากส่วนที่ 1) มาทำการเปลี่ยนแปลงค่า pH เป็น 1.8, 2.0, 2.2 และ 2.4 แล้วนำผลที่ได้ทั้งหมดไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิถึง 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน

### ส่วนที่ 3 : หาอุณหภูมิ

ทำการทดลองเหมือนในส่วนที่ 2 แต่ใช้ค่า pH ที่ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินมากที่สุด (คำนวณจากส่วนที่ 2) มาทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการทดลองเป็น 80, 90, 100 และ 110 องศาเซลเซียส แล้วนำของผสมที่ได้ทั้งหมดไปอบในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซิน

### การเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินเพื่อผสมกับยางธรรมชาติ

นำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินทั้งชนิดรีโซลและโนโวแลกที่เตรียมได้ไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบบอลมิลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในระบบคิสเพอร์ชัน (ใช้น้ำเป็นตัวกลาง) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำเรซินที่ได้มาแยกเอาน้ำออก และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เรซินที่ได้จะเกาะเป็นก้อนจึงนำไปบดแบบแห้งให้ละเอียดอีกครั้งด้วยเครื่องบดมิลล์ แล้วนำเรซินที่ได้ไปหาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Micromeritics Sedigraph 5100 Particle Size Analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เครื่องบดชนิดบอลมิลล์



รูปที่ 3.5 เครื่อง Micromeritics Sedigraph 5100 Particle Size Analyzer

#### 3.4.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่นๆ

ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ยางแท่ง STR XL จากบริษัทระยองบางกอก รีบเบอร์ จำกัด ซึ่งได้ผ่านการวิเคราะห์หาปริมาณผงหรือสิ่งสกปรก ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งระเหย ปริมาณไนโตรเจน ค่าดัชนีความอ่อนตัว ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางแท่ง STR XL

สมบัติ	ผลการวิเคราะห์
ปริมาณสิ่งสกปรก (%wt)	0.02
ปริมาณเถ้า (%wt)	0.40
ปริมาณสิ่งระเหย (%wt)	0.80
ปริมาณไนโตรเจน (%wt)	0.50
ค่าดัชนีความอ่อนตัวเริ่มแรก ( $P_0$ )	35
ค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI)	60



### สูตรยางผสมสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำคาร์บอนออล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซินที่เตรียมได้มาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ และทำการเปรียบเทียบกับการใช้คาร์บอนแบล็คและซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงโดยมีสูตรสารประกอบของทั้งหมด 13 สูตร ดังนี้

สูตรที่ 1 คือ ไม่ใส่สารตัวเติมเสริมแรง

สูตรที่ 2-4 คือ ใส่คาร์บอนออล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล (CF-RE)

สูตรที่ 5-7 คือ ใส่คาร์บอนออล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก (CF-NO)

สูตรที่ 8-10 คือ ใส่คาร์บอนแบล็ค

สูตรที่ 11-13 คือ ใส่ซิลิกา

ชนิดและปริมาณของสารเคมีต่างๆ ที่ใส่เข้าไปในยางแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ทำสารประกอบของสูตรต่างๆ

องค์ประกอบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
STR 10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
CF-RE	-	30	45	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CF-NO	-	-	-	-	30	45	60	-	-	-	-	-	-
C-black	-	-	-	-	-	-	-	30	45	60	-	-	-
Silica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	45	60
Sulphur	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ZnO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Zn-stearate	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
MBT	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PEG 3350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1

### การบดผสมยางกับสารเคมี

ทำการบดผสมยางธรรมชาติกับสารเคมีต่างๆ ตามสูตรสารประกอบข้างในตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยเริ่มบดยางให้นิ่มและเหนียวติดลูกกลิ้งก่อน ที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที แล้วจึงใส่สารตัวเติม (คาร์บอนออล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน คาร์บอนแบล็ก หรือซิลิกา) ตามสูตรในตารางที่ 3.2 ลงไปบดผสมกับยางธรรมชาติ โดยให้ลูกกลิ้งอยู่ห่างกันประมาณ 1-2 มิลลิเมตร เนื่องจากสารตัวเติมมีปริมาณมาก จึงต้องใส่ทีละน้อยเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจาย ซึ่งใช้เวลาประมาณ 10 นาที โดยตัดและม้วนยางกลับไปมาเพื่อให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางอย่างสม่ำเสมอ



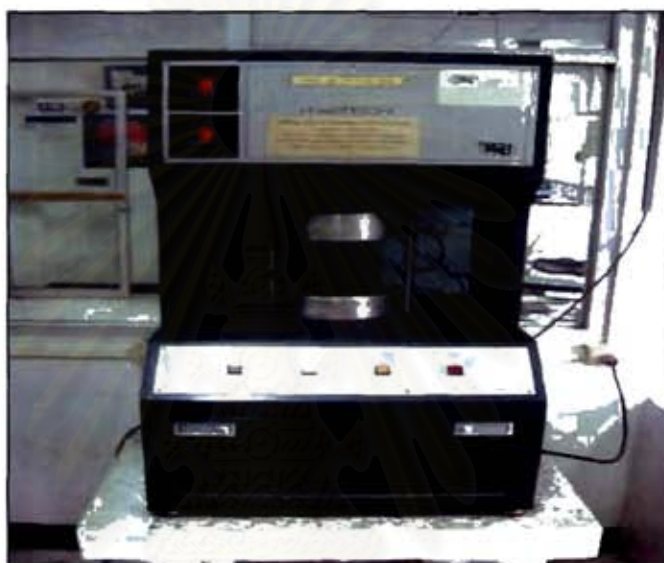
รูปที่ 3.6 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง

เมื่อสารตัวเติมกระจายในยางสม่ำเสมอแล้วจึงใส่ซิงก์ออกไซด์ ซิงก์สเตียเรต และ MBT เข้าไปบดผสมกับยาง โดยให้ลูกกลิ้งอยู่ห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร ใช้เวลา 3 นาที (ในบางช่วงของการบดผสมควรลดช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้อยู่ประมาณ 1 มิลลิเมตร เพื่อบดให้สารเคมีแตกตัว) และสุดท้ายจึงค่อยๆ ใส่กำมะถันเข้าไปบดผสมกับยาง โดยให้ลูกกลิ้งอยู่ห่างกันประมาณ 2 มิลลิเมตร ใช้เวลาประมาณ 3 นาที

เก็บยางผสมไว้ 1 คืน แล้วนำบางส่วนมาหาเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ หลังจากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปโดยการใช้แม่แบบ แล้วนำไปทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วต่อไป

การหาเวลาขางเริ่มวัลคาไนซ์ (scorch time) และเวลาการคงรูป (cure time)

นำยางที่ผสมสารเคมีต่างๆ แล้วไปหาเวลาขางเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาการคงรูป ด้วยเครื่อง Monsanto Oscillating Disk Reometer ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ตามมาตรฐาน ISO 3417 : 1991 (E) โดยเตรียมชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสยาวด้านละ 1.5 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ทดสอบที่ อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.7 เครื่อง Monsanto Oscillating Disk Reometer

การขึ้นรูปและเตรียมชิ้นทดสอบ

นำยางผสมสารเคมีวางบนพื้นโลหะที่เรียบแห้งและสะอาด แล้วทำการตัดยางให้มีความกว้างและความขายน้อยกว่าแม่แบบเล็กน้อย จากนั้นทิ้งชิ้นยางที่ตัดแล้วพักทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และความชื้นต่ำกว่า 5% ต่อจากนั้นนำชิ้นยางอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดที่ ความดันต่ำกว่า 3.5 MPa อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ตามระยะเวลาการคงรูปของยางแต่ละสูตร ที่หาได้จากเครื่อง Monsanto Oscillating Disk Reometer โดยชิ้นทดสอบที่หนาไม่เกิน 1 เซนติเมตร จะใช้  $t_c(95)$  เป็นเวลาในการทำให้คงรูป ส่วนชิ้นทดสอบที่หนาเกิน 1 เซนติเมตร ให้ใช้เวลาการคงรูปเป็น 2 เท่าของ  $t_c(95)$  และเมื่ออัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบตามเวลาการคงรูปแล้ว ให้นำชิ้นทดสอบออกจากแม่แบบมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 96 ชั่วโมง ก่อนที่นำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ซึ่งชิ้นทดสอบที่ได้มีลักษณะแตกต่างกันตามลักษณะแม่พิมพ์ ดังนี้



- สี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร หนา 4 มิลลิเมตร สำหรับทดสอบความทนแรงดึง และความแข็ง
- รูปทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร หนา 2 เซนติเมตร สำหรับทดสอบการคืนตัว
- รูปทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร หนา 3 เซนติเมตร สำหรับทดสอบการสึกหรอ

### 3.4.3 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

#### สมบัติด้านการดึง

ทดสอบสมบัติด้านการดึงของยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength) อีลาสติคโมดูลัส (modulus of elasticity) และระยะยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ISO 37 : 1994 (E) ด้วยเครื่อง Instron Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ที่มี load cell ขนาด 500 นิวตัน และดึงด้วยความเร็ว 500 มิลลิเมตร/นาที โดยมี extensometer เป็นตัวจับระยะการยืดของชิ้นทดสอบซึ่งเป็นรูปดัมเบลล์ (dumbbell) ที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 เครื่อง Instron Testing Machine Model 1101



รูปที่ 3.9 ชั้นทดสอบรูปคิมเบลล์สำหรับหาค่าความทนแรงดึง

#### ความแข็ง (Hardness)

ทดสอบหาความแข็งของยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว โดยวิธีตามมาตรฐาน ASTM D 2240-97 ด้วยเครื่อง Model 917 Maximum Hardness Indicator แบบ Shore A ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยนำชั้นทดสอบที่ใช้หาความทนแรงดึง 3 ชั้น มาวางซ้อนกัน เพื่อให้มีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ชั้นทดสอบต้องมีพื้นผิวเรียบและขนานกับผิวสัมผัสของหัวเข็มที่กดลงบนชั้นทดสอบ



รูปที่ 3.10 เครื่อง Model 917 Maximum Hardness Indicator แบบ Shore A

### ความต้านทานการสึกหรอ (Abrasion resistance)

ทดสอบหาความต้านทานการสึกหรอของยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน BS 903 : Part A9 : 1998 Method B ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอของยาง (abrasion tester) แบบ Abrasion Akron ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยใช้ชั้นทดสอบ 2 ชั้น ที่มีลักษณะเป็นวงล้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 6.3 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 1.3 เซนติเมตร หนา 1.3 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยชั้นทดสอบที่วัดค่าความหนาแน่นแล้วจะถูกขัดสีกับวงล้อหิน หลังจากนั้น ชั่งน้ำหนักที่หายไปแล้วคำนวณหาปริมาณที่หายไปต่อการถูกขัดสี 1,000 รอบ



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Akron Abrasion Tester) Model APH-40



รูปที่ 3.12 ชั้นทดสอบสำหรับหาค่าความต้านทานการสึกหรอ



### การคินตัว (Compression set)

ทดสอบการคินตัวของยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว โดยใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM D 395-98 ด้วยเครื่อง Compression Set Tester Milano/Italia ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 6 ชิ้น ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ให้นำชิ้นทดสอบมาจดความหนาลดลงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยเหลือความหนาประมาณ 9.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นวัดความหนาที่ลดลง นำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การคินตัว ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{การคินตัว} = \frac{[\text{ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ} - \text{ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ}]}{[\text{ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ} - \text{ความหนาของชิ้นงานทดสอบเมื่อเริ่มกด (9.5 มม.)}]} \times 100$$



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบการคินตัว (Compression Set Tester Milano/Italia)



รูปที่ 3.14 ชิ้นทดสอบการคินตัว

### การบ่มเร่งด้วยความร้อน (Heat ageing)

ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 573-99 ด้วยตู้อบสำหรับบ่มเร่งยาง (Geers Rubber Aging Oven) ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อนำออกจากตู้อบให้ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อยครึ่งชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำไปตัดชิ้นทดสอบสมบัติต่างๆ ทิ้งไว้ก็อย่างน้อย 16 ชั่วโมง จึงนำไปทดสอบความทนแรงดึง และความแข็งต่อไป



รูปที่ 3.15 การบ่มเร่งด้วยความร้อนในตู้อบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

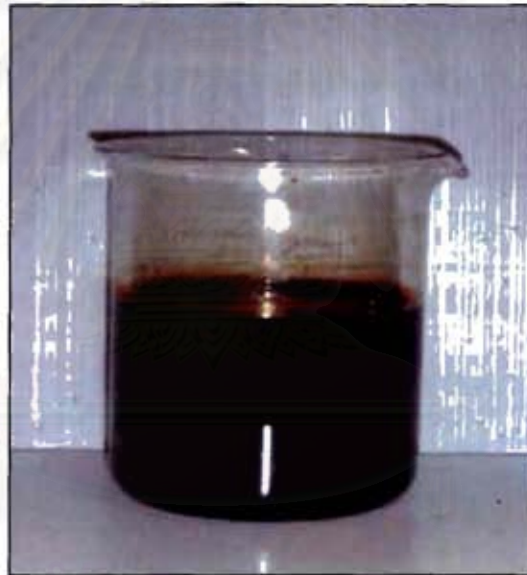
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

##### 4.1.1 การสกัดน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL)

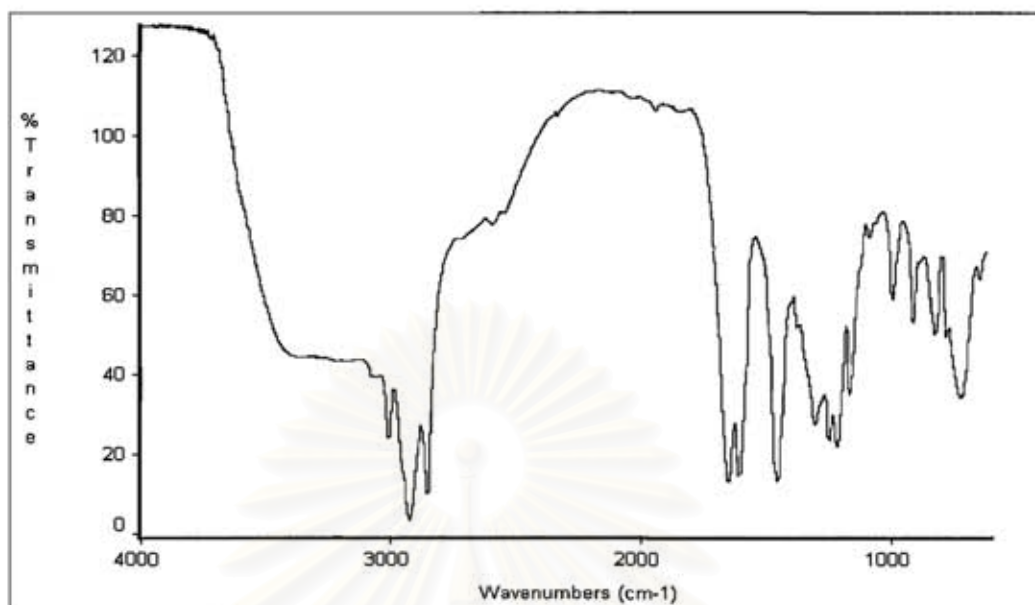
น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่สกัดได้เป็นของเหลวหนืดสีดำคล้ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 สามารถละลายได้ในเฮกเซน โทลูอีน และอะซิโตน ผลของการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของ CNSL

ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ CNSL

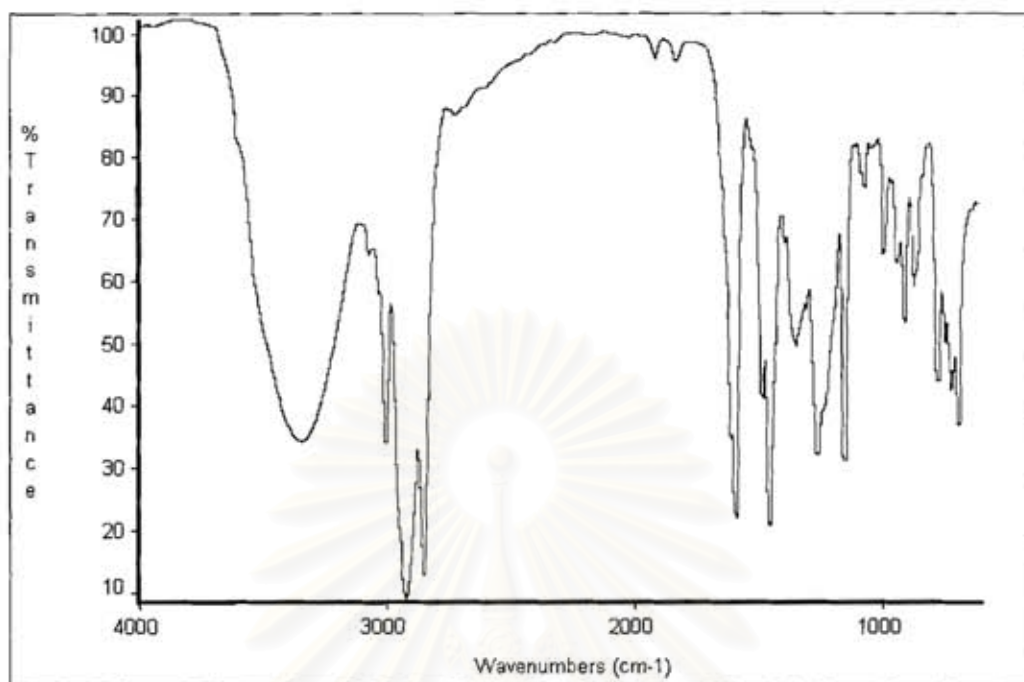
ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน (cm <sup>-1</sup> )	ลักษณะเฉพาะที่เกิด (assignment)
3600 – 3200	O-H stretching ของคาร์บอกซิลิก
3040 – 3012	C-H stretching ของเบนซีน
2940 – 2902	C-H asymmetric stretching ของหมู่เมทิล
2820 – 2800	C-H symmetric stretching ของหมู่เมทิล
1670 – 1640	C=O asymmetric stretching ของคาร์บอกซิลิก
1615 – 1601	C=C stretching ของเบนซีน
1500 – 1427	C=C stretching ของเบนซีน
1309 – 1200	C-O stretching ของคาร์บอกซิลิก
1100 - 900	C-H in plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
875 - 800	C-H out of plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
770 - 750	C-H out of plane deformation mono-substituted ของเบนซีน

#### 4.1.2 การเตรียมคาร์ดานออกจาก CNSL

คาร์ดานอลที่เตรียมได้เป็นของเหลวสีน้ำตาลแดงเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสามารถละลายได้ในเฮกเซน โทลูอีน และอะซิโตน เช่นเดียวกับ CNSL ภายหลังจากนำ CNSL ไปผ่านกระบวนการดีคาร์บอซิเลชันแล้ว พิกของหมูคาร์บอซิลิกทั้ง 2 ตำแหน่ง ได้หายไป และมีตำแหน่งของไฮโดรเจนบริเวณวงแหวนเบนซีนเข้ามาแทนที่ ผลการวิเคราะห์คาร์ดานอลที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FT-IR แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 คาร์ดานอล



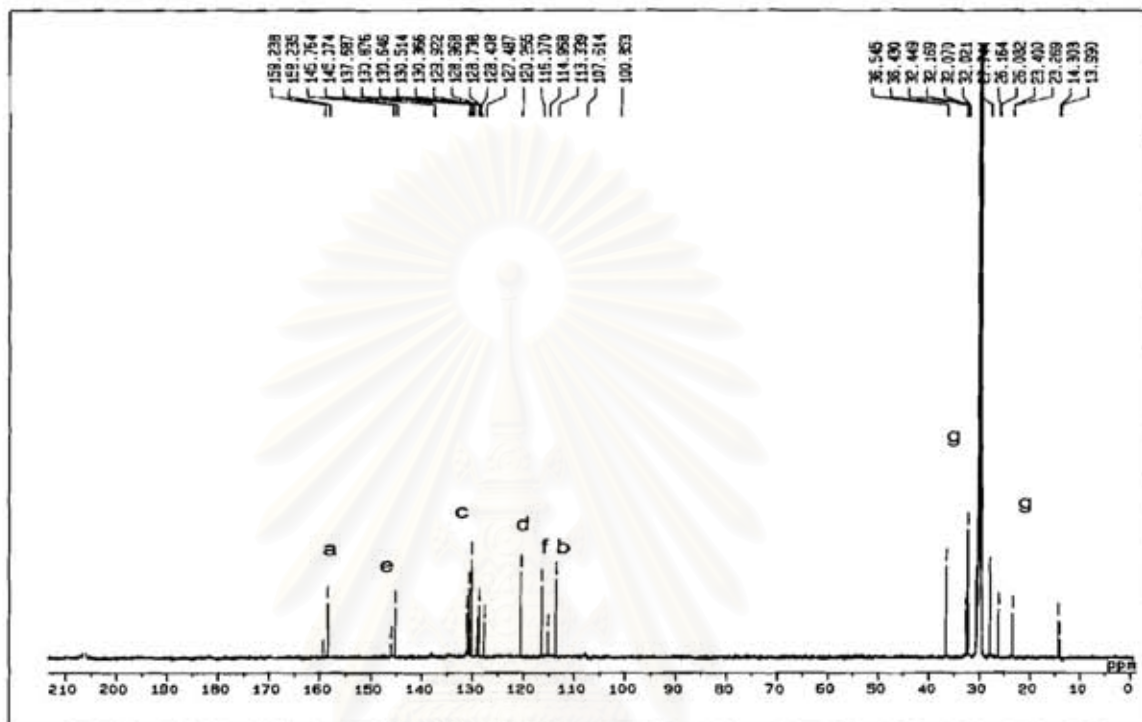
รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล

ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของคาร์ดานอล

ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน ( $\text{cm}^{-1}$ )	ลักษณะเฉพาะที่เกิด (assignment)
3600 – 3200	O-H stretching ของฟีนอล
3040 – 3012	C-H stretching ของเบนซีน
2940 – 2902	C-H asymmetric stretching ของหมู่เมทิล
2820 – 2800	C-H symmetric stretching ของหมู่เมทิล
1615 – 1601	C=C stretching ของเบนซีน
1500 – 1427	C=C stretching ของเบนซีน
1309 – 1200	C-O asymmetric stretching ของฟีนอล
1100 - 900	C-H in plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
875 - 800	C-H out of plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
770 - 750	C-H out of plane deformation mono-substituted ของเบนซีน



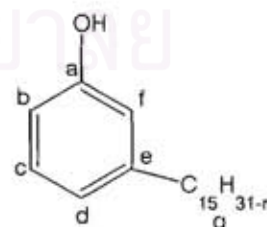
เมื่อนำสารที่เตรียมได้ไปหาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค NMR เพื่อยืนยันว่าเป็นคาร์ดานอล ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.5  $^{13}\text{C}$  NMR สเปกตรัมของคาร์ดานอลใน  $\text{CDCl}_3$

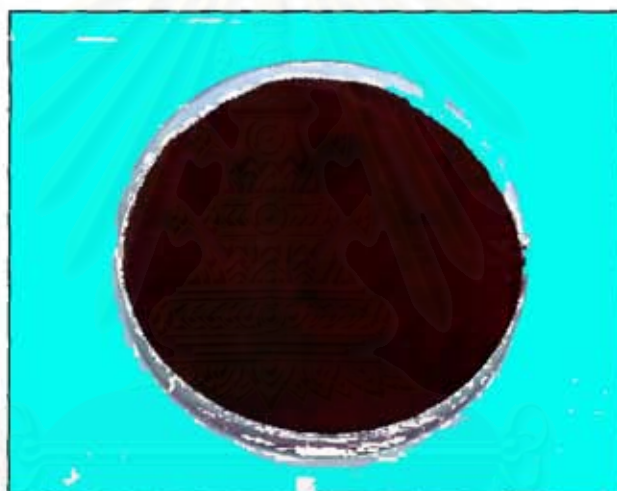
ตารางที่ 4.3 คาร์บอน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของคาร์ดานอล

ตำแหน่ง (PPM)	ลักษณะของโครงสร้าง
160	a
146 - 130	e
129	c
121	d
115	f
112	b
10 - 40	g

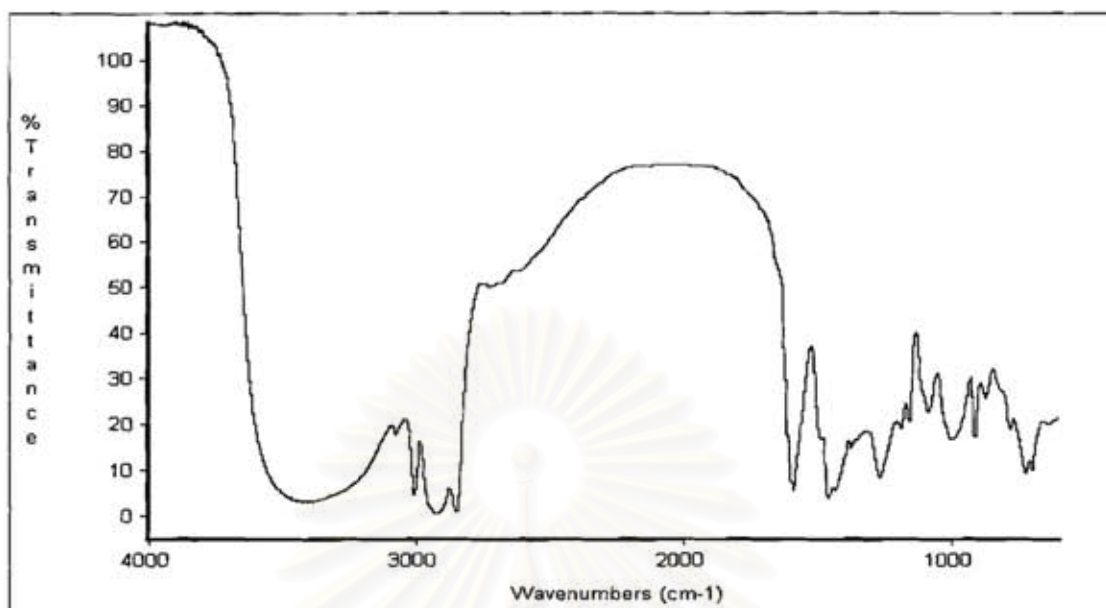


#### 4.1.3 การสังเคราะห์คาร์คานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

คาร์คานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่เตรียมได้เป็นของแข็งสีน้ำตาลแดงเข้ม รูปที่ 4.6 แสดงเรซินที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดแบบบอลมิลล์แล้ว และเมื่อนำเรซินที่ได้ไปหาขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค polydisperse พบว่า เรซินมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 58.90 ไมโครเมตร เรซินที่ได้สามารถละลายในเมทานอล และโทลูอิน แต่ไม่ละลายในน้ำ ผลการวิเคราะห์เรซินด้วยเทคนิค FT-IR แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.4 ซึ่งพิกที่ได้คล้ายกับพิกของฟีนอลิกเรซินชนิดรีโซล<sup>13-15</sup> ต่างกันตรงตำแหน่งการสั่นของหมู่เมทิลในคาร์คานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลนั้นชัดเจนและมีความเข้มมากกว่า เนื่องจากโครงสร้างของคาร์คานอลมีสายโซ่ของคาร์บอนต่อกันอยู่ถึง 15 อะตอม



รูปที่ 4.6 คาร์คานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่ผ่านการบดด้วยบอลมิลล์แล้ว



รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

ตารางที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ คาร์ดานอล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน ( $\text{cm}^{-1}$ )	ลักษณะเฉพาะที่เกิด (assignment)
3600 – 3200	O-H stretching ของฟีนอลิกและหมู่เมทิลแอลกอฮอล์
3035 – 3012	C-H stretching ของเบนซีน
2980 – 2912	C-H asymmetric stretching ของหมู่เมทิล
1650 – 1611	C=C stretching ของเบนซีน
1480 – 1407	C-H deformation ของอะลิฟาติกคาร์บอน
1309 – 1212	C-O in plane stretching ของฟีนอลิก
1010 - 900	C-O stretching ของหมู่เมทิลแอลกอฮอล์ ตำแหน่งนี้ในเรซินชนิดโนโวแลกปรากฏน้อยมาก
875 - 800	C-H out of plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน



ตารางที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ([F]/[C]) ต่าง ๆ กัน ซึ่งถูกควบคุมให้มีค่า pH เท่ากับ 8 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล [F]/[C] ต่าง ๆ กัน

[F]/[C]	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ (% yield)
1.6	30.133	23.774	20.312	20.264	67.25
1.8	30.401	24.609	21.396	21.317	70.12
2.0	30.604	26.412	21.832	22.613	73.82
2.2	30.901	23.216	21.812	21.730	70.32

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล

[F]/[C]	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
1.6	433.7	-74.2
1.8	425.6	-78.7
2.0	461.2	-79.6
2.2	431.8	-91.4

จากตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่มากที่สุด คือ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 2.0 และจากตารางที่ 4.6 เรซินที่อัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 2.0 มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 2.0 เพื่อใช้หาค่า pH ที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลต่อไป

ตารางที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลเมื่อใช้ pH ของปฏิกิริยาต่างๆ กัน ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 2.0 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซนต์ผลได้ของเรซินที่ใช้ pH ของปฏิกิริยาต่างๆ กัน

pH	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ (%yield)
7.6	30.622	26.306	20.864	20.299	66.29
7.8	30.604	22.823	21.983	21.952	71.73
8.0	30.633	26.412	23.832	22.613	73.82
8.2	30.600	25.694	23.776	23.390	73.17
8.4	30.693	25.298	23.756	22.486	73.26

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

pH	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
7.6	425.4	-78.6
7.8	438.5	-95.4
8.0	450.6	-75.8
8.2	439.2	-94.9
8.4	446.4	-76.0

จากตารางที่ 4.7 พบว่าเรซินที่เตรียมโดยใช้ pH ของปฏิกิริยาเท่ากับ 8.0 ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุด และจากตารางที่ 4.8 เรซินที่เตรียมโดย pH เท่ากับ 8.0 มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกค่า pH เท่ากับ 8.0 เพื่อให้หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลต่อไป

ตารางที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่เตรียมได้เมื่อใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 2.0 และมีค่า pH เท่ากับ 8 เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ (%yield)
70	30.622	24.128	22.468	21.948	71.58
80	30.633	26.412	23.832	22.613	73.82
90	30.592	25.239	24.126	23.057	75.37
100	30.627	23.776	22.563	22.410	73.17

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.10 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

อุณหภูมิ	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
70	441.3	-68.7
80	455.9	-92.0
90	456.2	-91.3
100	446.4	-74.7

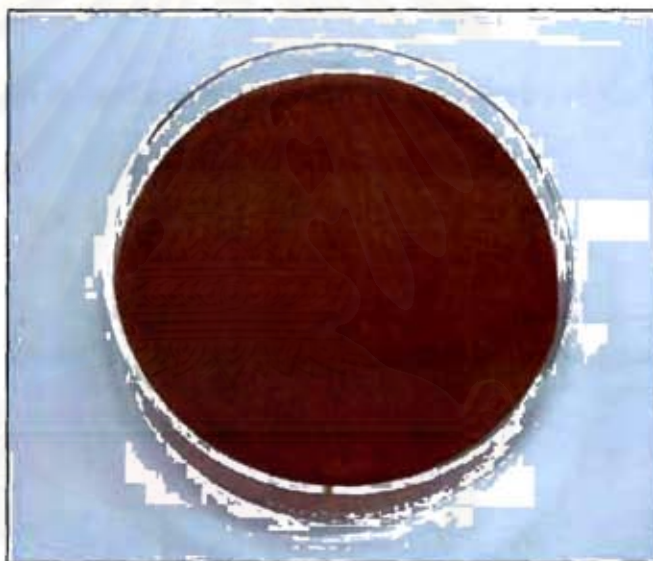
จากตารางที่ 4.9 พบว่าเรซินที่เตรียมได้จากการใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุด และจากตารางที่ 4.10 เรซินที่ได้จากการใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด

ดังนั้น ในการสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลเพื่อนำไปใช้ผสมกับยางธรรมชาติได้ใช้ภาวะของปฏิกิริยา ดังนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอลเท่ากับ 2.0 ค่า pH เท่ากับ 8.0 และอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



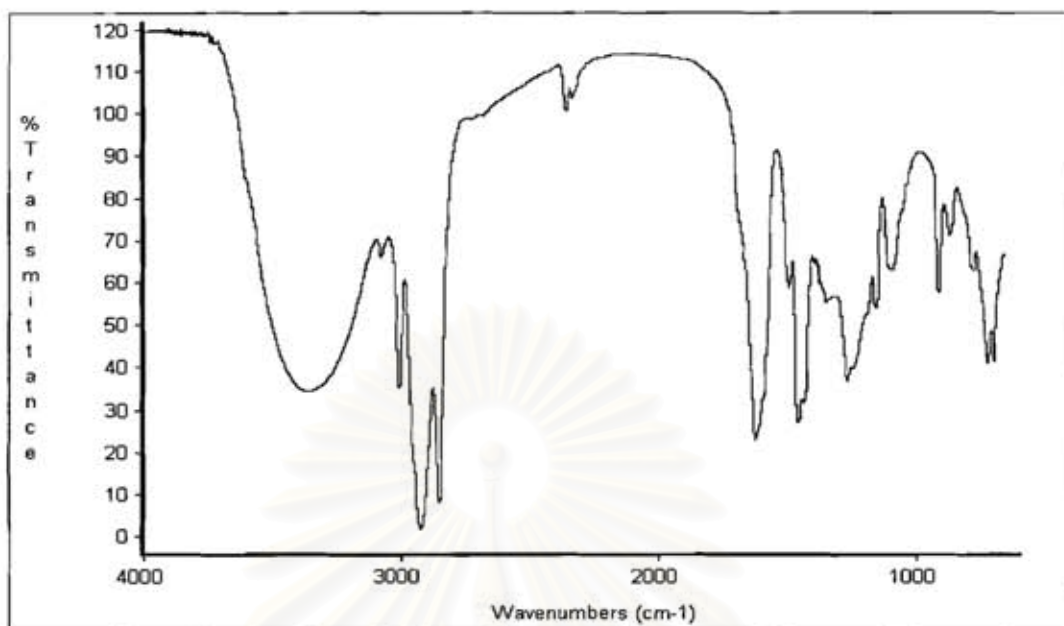
#### 4.1.3 การสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก

คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่เตรียมได้เป็นของแข็งสีน้ำตาลแดงเข้ม รูปที่ 4.8 แสดงเรซินที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดแบบบอลมิลล์แล้ว และเมื่อนำเรซินที่ได้ไปหาขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค polydisperse พบว่า เรซินมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 57.14 ไมโครเมตร เรซินชนิดนี้สามารถละลายในเมทานอล และ โทลูอีน แต่ไม่ละลายในน้ำ ผลการวิเคราะห์เรซินด้วยเทคนิค FT-IR แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.11 ซึ่งพิกที่ได้มีลักษณะคล้ายกับพิกของฟีนอลิกเรซินชนิดโนโวแลก<sup>13-15</sup> แต่ต่างกันตรงตำแหน่งการตั้งของหมู่เมทิลในคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกนั้นชัดเจนและมีความเข้มมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของคาร์ดานอลมีสายโซ่ของคาร์บอนต่อกันอยู่ถึง 15 อะตอม



รูปที่ 4.8 คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่ผ่านการบดด้วยบอลมิลล์แล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิด โน โวแลค

ตารางที่ 4.11 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิด โน โวแลค

ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน ( $\text{cm}^{-1}$ )	ลักษณะเฉพาะที่เกิด (assignment)
3600 – 3200	O-H stretching ของฟีนอล
3025 – 3012	C-H stretching ของเบนซีน
2950 – 2910	C-H asymmetric stretching ของหมู่เมทิล
2840 – 2820	C-H symmetric stretching ของหมู่เมทิล
1640 – 1615	C=C stretching ของเบนซีน
1580 – 1508	C=C stretching ของเบนซีน
1309 – 1240	C-O asymmetric stretching ของฟีนอล
1180 - 1090	C-H in plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน
875 - 800	C-H out of plane deformation 1,2,3-tri-substituted ของเบนซีน

ตารางที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลคเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล ([F]/[C]) ต่างๆ กัน ซึ่งถูกควบคุมให้มีค่า pH เท่ากับ 2.2 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล ([F]/[C]) ต่างๆ กัน

[F]/[C]	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ (% yield)
0.6	11.639	10.176	8.421	8.037	69.05
0.7	13.346	12.449	10.674	10.091	75.61
0.8	14.976	12.923	12.126	11.934	79.68
0.9	16.737	14.126	13.769	12.523	74.82

ตารางที่ 4.13 แสดงผลของการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลคที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.13 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

[F]/[C]	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
0.6	431.6	-76.4
0.7	442.3	-78.7
0.8	451.2	-71.2
0.9	446.8	-92.6

จากตารางที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่มากที่สุด คือ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 และจากตารางที่ 4.13 พบว่าเรซินที่อัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 เพื่อใช้หาค่า pH ที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลคต่อไป



ตารางที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลคเมื่อใช้ pH ของปฏิกิริยาต่างๆ กัน ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้ pH ของปฏิกิริยาต่างๆ กัน

pH	นน.รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน.รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ (% yield)
1.8	15.049	13.164	11.964	11.323	75.24
2.0	15.093	13.082	12.103	11.505	76.23
2.2	14.976	12.923	12.126	11.934	79.68
2.4	15.087	12.694	11.119	10.570	70.06

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลคที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

pH	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
1.8	439.2	-76.1
2.0	446.3	-92.3
2.2	456.7	-79.8
2.4	449.5	-93.1

จากตารางที่ 4.14 พบว่าเรซินที่เตรียมได้จากการใช้ pH ของปฏิกิริยาเท่ากับ 2.2 ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุด และจากตารางที่ 4.15 พบว่าเรซินที่ใช้ pH เท่ากับ 2.2 มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกค่า pH เท่ากับ 2.2 เพื่อใช้หาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลคต่อไป

ตารางที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิด โนวาแลค ที่เตรียมได้เมื่อใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน ซึ่งมีอัตราส่วนโดยโมลของ [F]/[C] เท่ากับ 0.8 และมีค่า pH เท่ากับ 2.2 เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ	นน. รวมของสารตั้งต้น (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 48 ชม. (กรัม)	นน. รวมหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา 72 ชม. (กรัม)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ (%yield)
80	15.057	13.026	11.146	10.310	68.47
90	15.063	13.178	11.298	10.963	72.78
100	14.976	12.923	12.126	11.934	79.68
110	15.064	13.205	12.146	11.191	74.29

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการนำคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิด โนวาแลคที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4.17 สมบัติทางความร้อนของเรซิน

อุณหภูมิ	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	มวลที่สูญเสียไป (% mass loss)
80	443.7	-91.3
90	439.1	-92.0
100	452.6	-68.7
110	438.4	-78.7

จากตารางที่ 4.16 พบว่าเรซินที่เตรียมได้จากการใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุด และจากตารางที่ 4.17 พบว่าเรซินที่ได้จากการใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าการทนความร้อนมากที่สุด

ดังนั้น ในการสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิด โนวาแลคเพื่อนำไปผสมกับยางธรรมชาติได้ใช้ภาวะของปฏิกิริยา ดังนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล เท่ากับ 0.8 ค่า pH เท่ากับ 2.2 และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

## 4.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติและสารเคมีอื่น ๆ

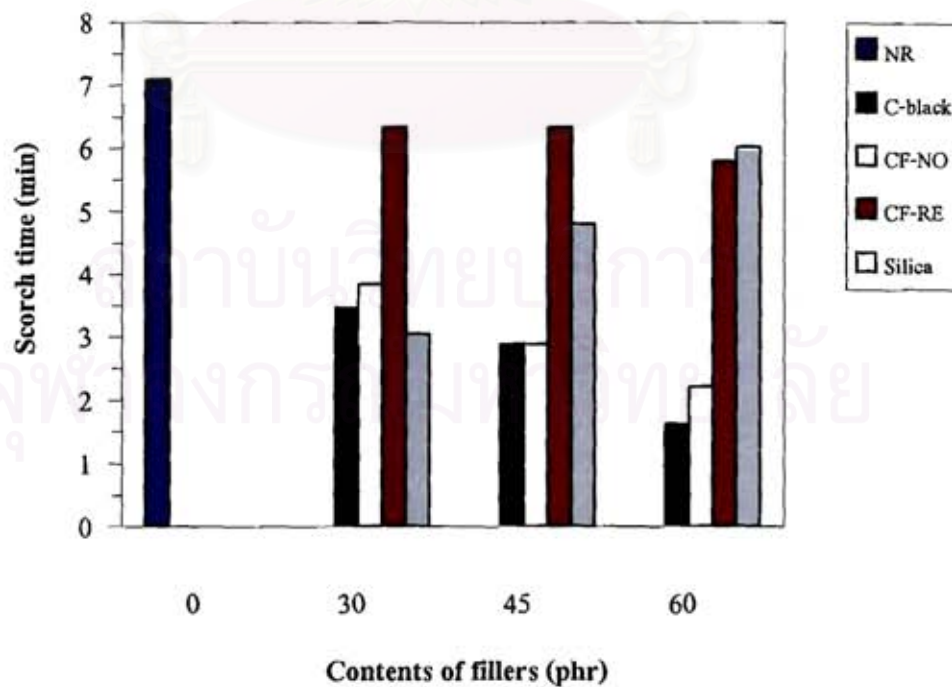
### 4.2.1 เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ (Scorch time) และเวลาการวัลคาไนซ์ (95% Cure time)

#### เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ (Scorch time)

ยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรงมีเวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ 7.08 นาที ส่วนเวลาที่เริ่มวัลคาไนซ์ของยางที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน แสดงในตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.18 เวลาที่ย่างผสมสารตัวเติมเสริมแรงเริ่มวัลคาไนซ์

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	เวลาที่ย่างเริ่มวัลคาไนซ์ (นาที)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	3.46	3.83	6.33	3.04
45	2.88	2.88	6.33	4.79
60	1.62	2.21	5.79	6.01



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง



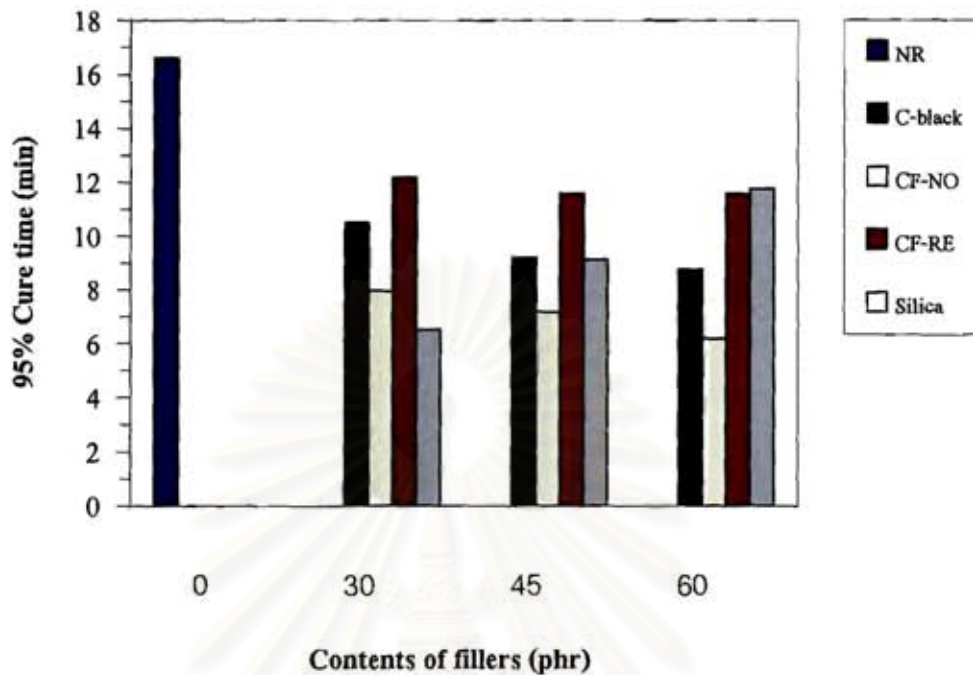
ตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์มีค่าลดลงเมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงปริมาณมากขึ้น ยกเว้นซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีขนาดอนุภาคเล็กมาก (คาร์บอนแบล็ก N330 มีขนาดอนุภาค 26–30 นาโนเมตร)<sup>16-19</sup> จึงพื้นที่ผิวมาก เมื่อผสมกับยางในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ได้ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นภายในยาง ซึ่งความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับยางได้เร็วขึ้น ส่วนยางผสมโนโวแลคเรซินมีเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ใกล้เคียงกับยางผสมคาร์บอนแบล็ก และยางผสมรีโซลเรซินมีเวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ไปในทำนองเดียวกันแต่ใช้เวลาในการเริ่มวัลคาไนซ์ช้ากว่า ซึ่งเป็นผลดีในกรณีที่ไม่ต้องการให้ยางเริ่มการวัลคาไนซ์เร็วเกินไป และการที่ยางผสมรีโซลและโนโวแลคมีพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ต่างกัน เนื่องจากเรซินทั้งสอง มีลักษณะการเชื่อมขวางต่างกัน โดยการเชื่อมขวางของโนโวแลคต้องใส่ HMTA เข้าไป จึงทำให้การเชื่อมขวางมีอะตอมของไนโตรเจนอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ในขณะที่รีโซลไม่มีเพราะสามารถเกิดการเชื่อมขวางได้เอง ซึ่งมีผลทำให้โนโวแลคช่วยเร่งยางให้เริ่มวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น ส่วนซิลิกาถึงแม้มีอนุภาคเล็กกว่าคาร์บอน-ฟอรั่มลดีไฮด์เรซินทั้งสองชนิด คือ มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 1.9–8.8 ไมครอน<sup>16-19</sup> แต่ซิลิกาสามารถจับตัวกันเองเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นตามโครงสร้างที่มีขั้วของซิลิกา มีผลทำให้การวัลคาไนซ์ยางเกิดได้ยากเมื่อใส่ในปริมาณมาก จึงทำให้เวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์เพิ่มมากขึ้น

#### เวลาการวัลคาไนซ์ (95% Cure time)

ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงมีเวลาการวัลคาไนซ์ 16.58 นาที ส่วนเวลาการวัลคาไนซ์ ของยางที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.19 เวลาที่ยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงเกิดการวัลคาไนซ์

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	เวลาวัลคาไนซ์ (นาที)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	10.50	7.96	12.17	6.50
45	9.19	7.17	11.58	9.11
60	8.76	6.17	11.58	11.75



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง

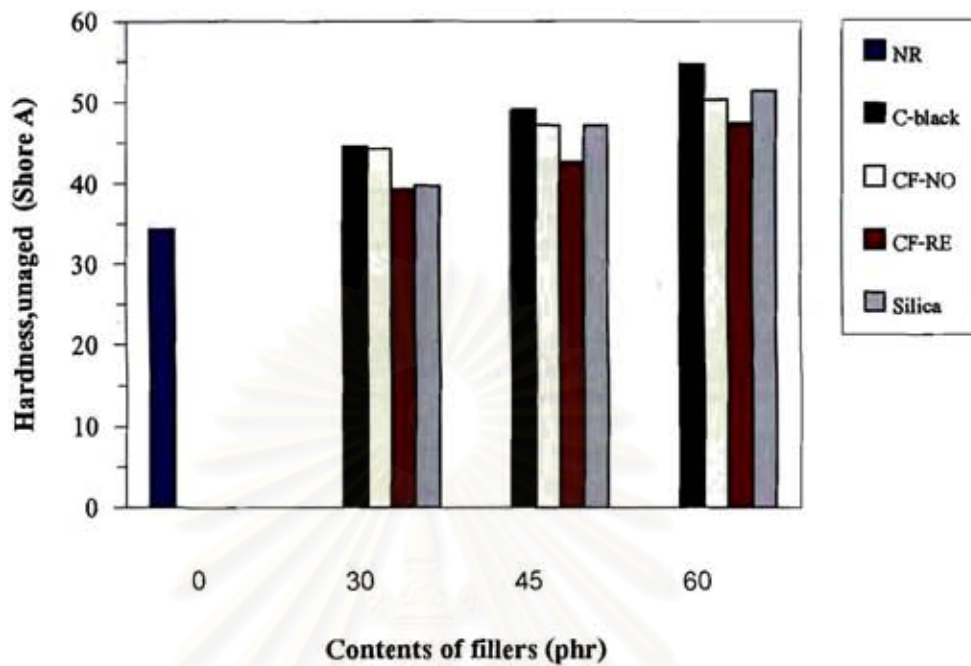
จากตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเวลาการวัลคาไนซ์มีค่าลดลงเมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงปริมาณมากขึ้น ยกเว้นซิลิกา ก็เนื่องด้วยสาเหตุเดียวกับผลของยางเริ่มวัลคาไนซ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

#### 4.2.3 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน มีค่า 34.3 Shore A ส่วนความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กันก่อนอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.20 ความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ความแข็ง (Shore A)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	44.5	44.2	39.2	39.7
45	49.0	47.1	42.5	47.1
60	54.7	50.3	47.4	51.3



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

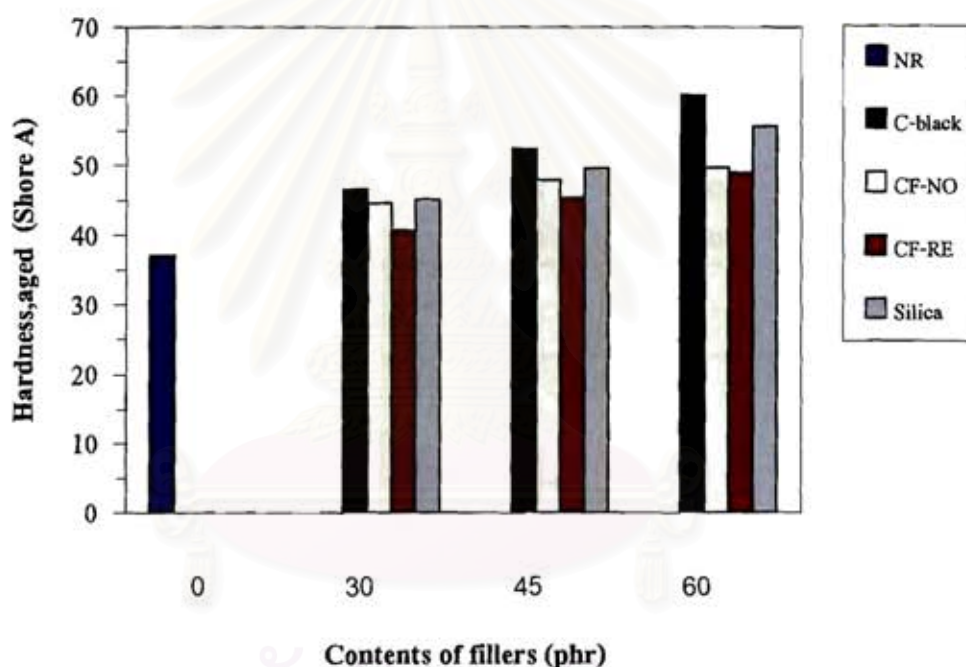
จากตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงปริมาณเพิ่มมากขึ้น ความแข็งของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการใส่คาร์บอนแบล็ก ทั้งนี้เพราะคาร์บอนแบล็กสามารถยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลของยางด้วยอนุภาคที่เล็ก และพื้นที่ผิวที่มากได้ดีกว่าสารตัวเติมเสริมแรงชนิดอื่น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางมีความชิดหุ้ย่นลง และความแข็งมากขึ้น ส่วนซิลิกาซึ่งมีอนุภาคที่แข็งจึงเพิ่มความแข็งของชิ้นงานเมื่อใส่เพิ่มมากขึ้น สำหรับคาร์บอนออล-พอร์มัลติไฮดรเจนทั้งสองชนิดซึ่งแสดงสมบัติของการเป็นเทอร์โมเซตพลาสติก จึงทำให้ความแข็งของยางผสมเพิ่มขึ้น และพบว่าโนโวแลคเรซินมีผลทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นมากกว่ารีโซลเรซิน ทั้งนี้เพราะมีโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงกว่า

ความแข็งของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 37.1 Shore A ส่วนความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน หลังอบเร่งด้วยความร้อนแสดงไว้ในตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.13



ตารางที่ 4.21 ความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ความแข็ง (Shore A)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	46.6	44.5	40.7	45.1
45	52.3	47.9	45.3	49.5
60	60.1	49.6	48.9	55.5



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

จากตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน ชิ้นงานยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพราะยางได้ถูกออกซิไดซ์เมื่อได้รับความร้อน และมีแนวโน้มการเพิ่มไปในทำนองเดียวกับก่อนอบ

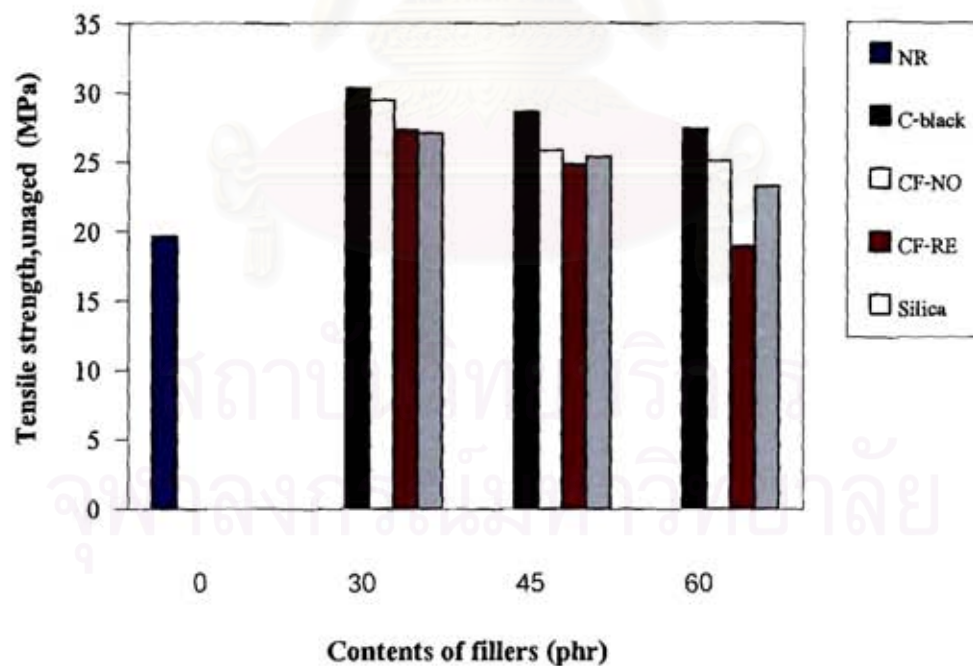
#### 4.2.4 ความทนแรงดึง ระยะยืดที่จุดขาด และมอดุลัส

##### ความทนแรงดึง (Tensile strength)

ความทนแรงดึงของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 19.63 MPa ส่วนความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน ก่อนอบเร่งด้วยความร้อนแสดงไว้ในตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.22 ความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	30.34	29.48	27.33	27.09
45	28.65	25.82	24.82	25.35
60	27.42	25.10	18.95	23.25



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่ายางผสมสารตัวเติมเสริมแรงต่างๆ มีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเมื่อไม่ได้สารตัวเติมเสริมแรง โดยคาร์บอนแบล็กมีความทนแรงดึงมากที่สุด เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่เล็ก พื้นที่ผิวมาก จึงเกิดแรงยึดเกาะกับสายโซ่โพลิเมอร์ของยางได้ดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และการใส่สารตัวเติมเสริมแรงซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียดในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ยางแข็ง และเหนียวติดกันได้ยาก จึงทำให้ความทนแรงดึงของชิ้นงานกลับลดลงเมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงเพิ่มขึ้น และไนโวแลครอนมีผลทำให้ความทนแรงดึงของชิ้นงานเพิ่มขึ้นมากกว่ารีไซลเรซิน ทั้งนี้เพราะมีโครงสร้างร่างแหที่แข็งแกร่งกว่า

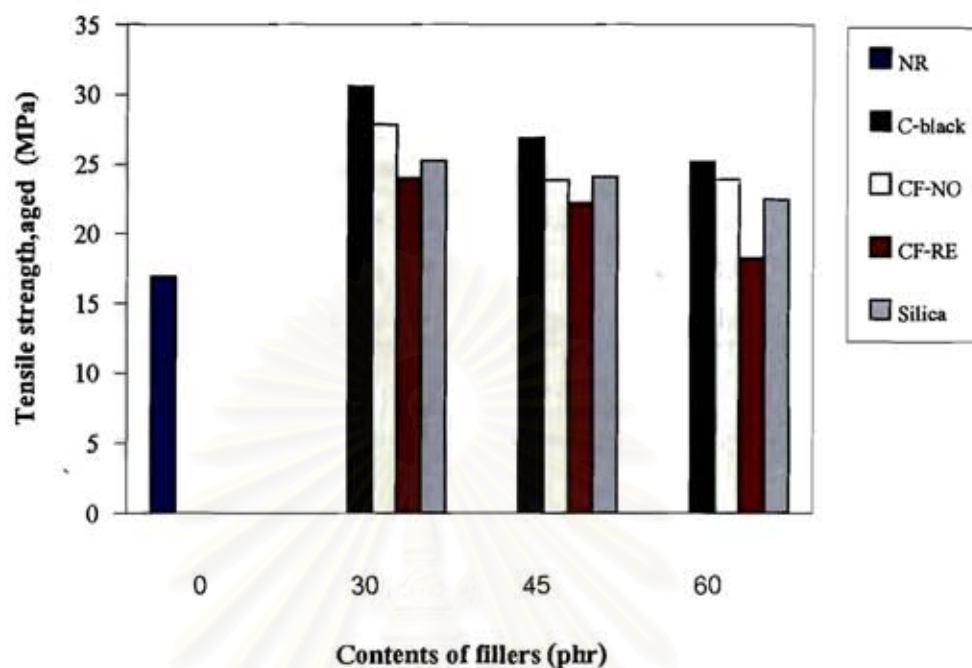
ความทนแรงดึงของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 16.88 MPa ส่วนความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน หลังอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.23 ความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	30.58	27.84	23.95	25.23
45	26.84	23.85	22.18	24.11
60	25.14	23.86	18.21	22.44

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน

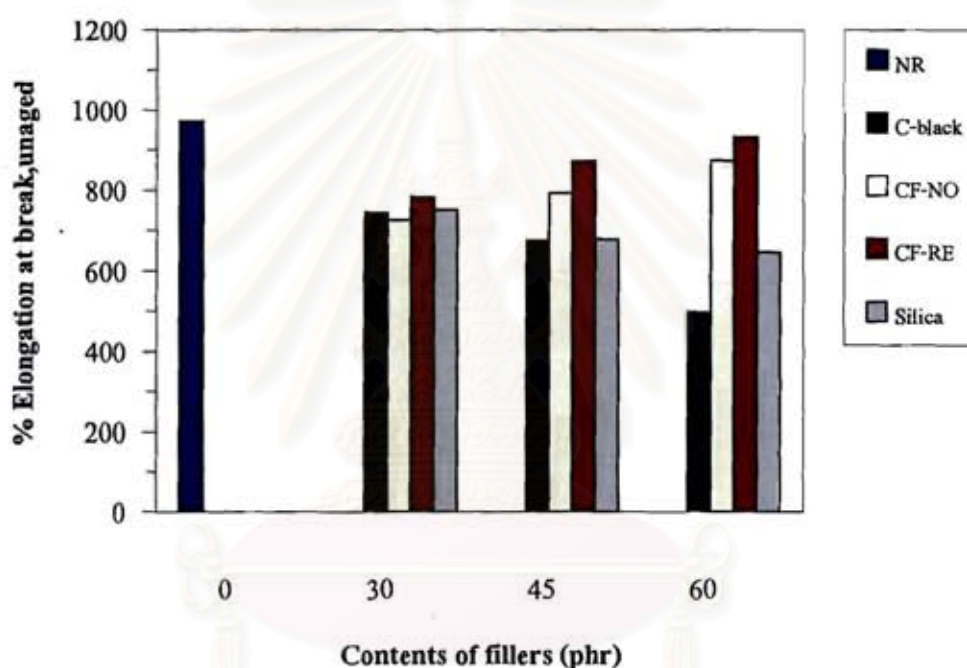
ตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อนความทนแรงดึงของชิ้นงานผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ มีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติ ซึ่งมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่ตลอดสายโซ่โมเลกุล ดังนั้น ยางจึงเสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยมีแนวโน้มการลดลงไปในทำนองเดียวกับก่อนอบ

#### ระยะยืดที่จุดขาด (Elongation at break)

ระยะยืดที่จุดขาดของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน มีค่า 971.5% ส่วนระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน ก่อนอบเร่งด้วยความร้อนแสดงไว้ในตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.24 ระยะเวลาที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ระยะเวลาที่จุดขาด (%)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	744.4	725.2	782.4	750.1
45	674.0	792.4	871.0	676.5
60	496.2	873.0	931.0	644.4



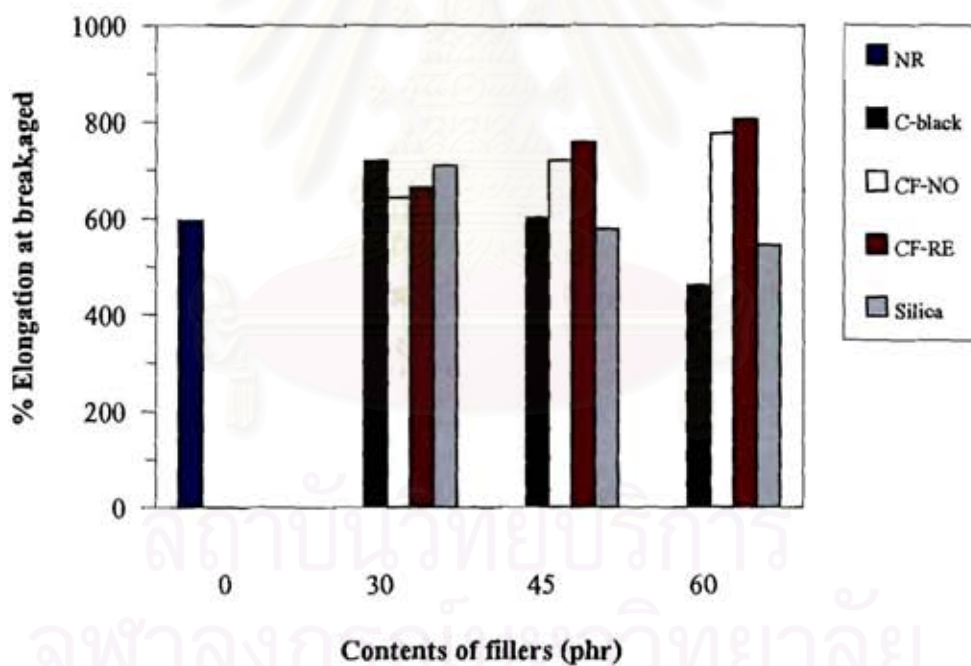
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่จุดขาดกับปริมาณสารเสริมแรงก่อนอบด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยางที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ มีระยะเวลาที่จุดขาดต่ำกว่าเมื่อไม่ได้ใส่สารตัวเติมเสริมแรง โดยคาร์บอนแบล็กและซิลิกา มีระยะเวลาที่จุดขาดลดลงเมื่อใส่ในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมเสริมแรงทั้งสอง เกิดแรงยึดเกาะกับยางทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น มีความยืดหยุ่นลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวต่ำลง ส่วนคาร์บอนอล-ฟอรั่มลดีไฮด์เรซินทั้งสองชนิด มีระยะเวลาที่จุดขาดสูงขึ้นเมื่อปริมาณเรซินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะสายโซ่คาร์บอนของเรซินที่พันอยู่กับสายโซ่โมเลกุลของยางสามารถยึดตัวได้มากกว่าคาร์บอนแบล็กและซิลิกา จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนตามไปด้วยได้

ระยะยืดที่จุดขาดของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 594.7% ส่วนระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน หลังอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.25 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.25 ระยะยืดที่จุดขาดของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณสาร ตัวเติม (phr)	ระยะยืดที่จุดขาด (%)			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	718.9	643.0	664.2	708.1
45	601.8	719.0	757.0	576.7
60	460.9	775.0	805.0	544.1



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดที่จุดขาดกับปริมาณสารเสริมแรงหลังอบด้วยความร้อน



ตารางที่ 4.25 และรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าระยะยืดที่จุดขาดของชิ้นงานยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงต่างๆ เมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนเร่งให้เกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติซึ่งมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยางจึงเสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยมีแนวโน้มการลดลงไปในทำนองเดียวกับก่อนอบ

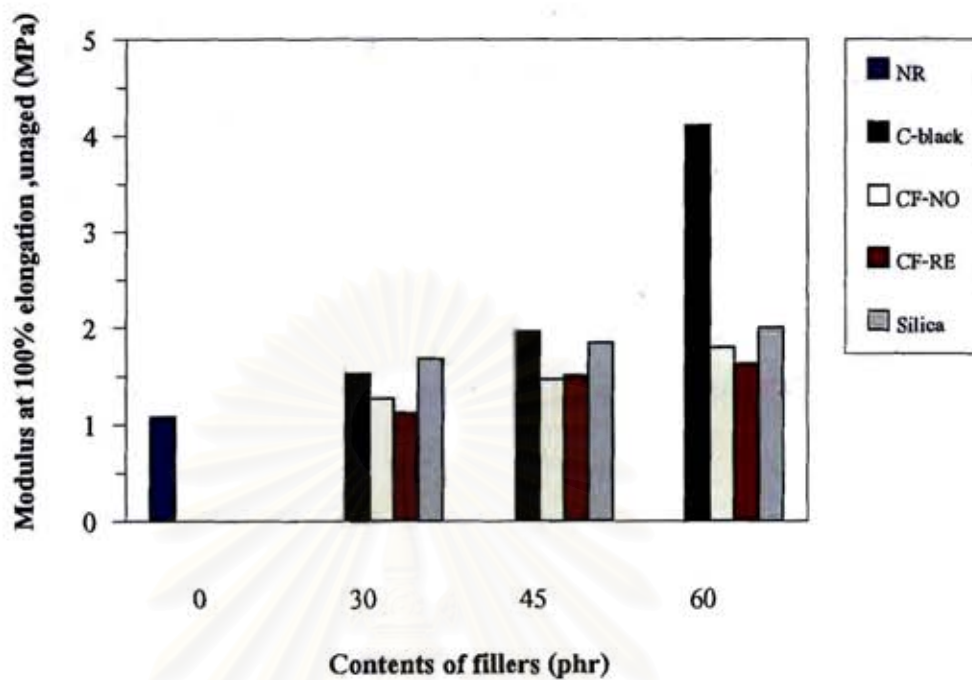
#### มอดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300% (Modulus at 100 , 300% elongation)

มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อนมีค่า 1.079 MPa และ 2.412 MPa ตามลำดับ ส่วนมอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.18-4.19

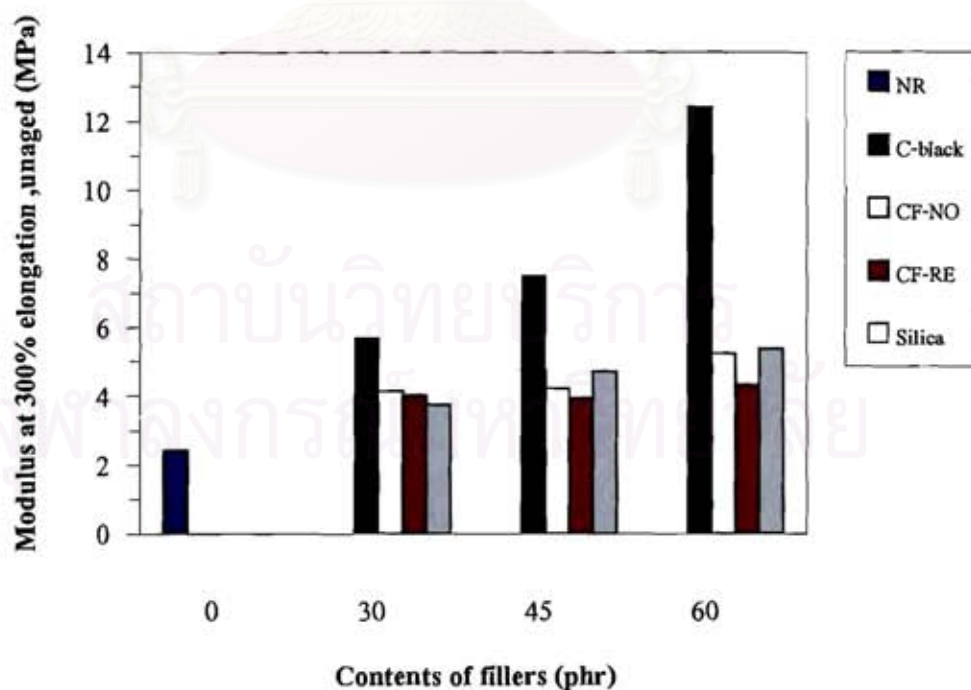
ตารางที่ 4.26 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณสารตัวเติม (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa)							
	100%				300%			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	1.523	1.267	1.116	1.679	5.665	4.141	4.011	3.738
45	1.961	1.462	1.505	1.840	7.484	4.216	3.926	4.686
60	4.106	1.749	1.621	2.001	12.390	5.213	4.302	5.338

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

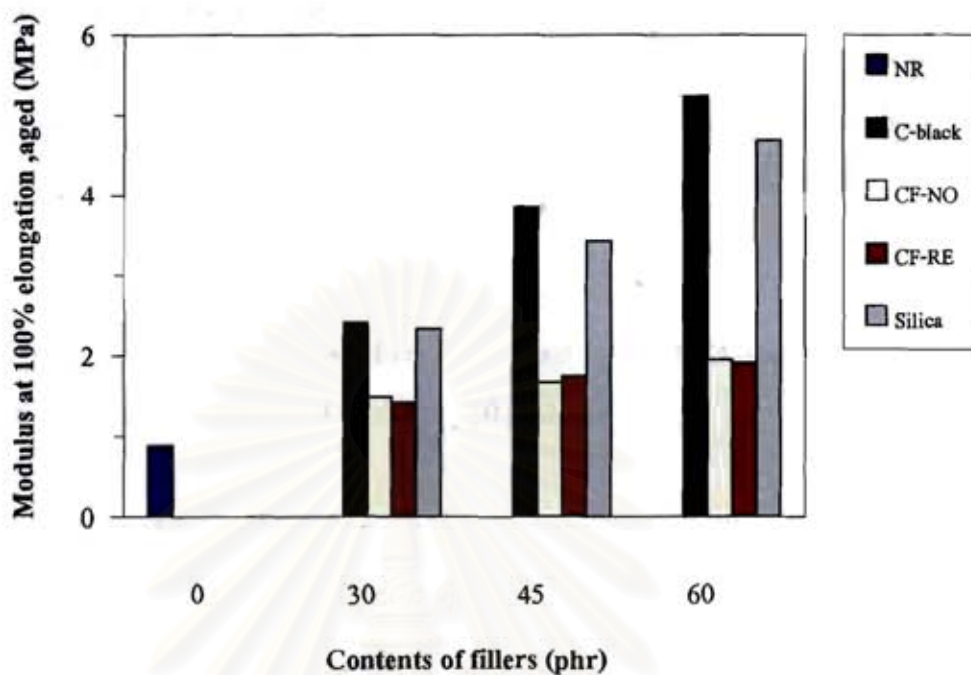
ตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.18–4.19 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานของผสมสารตัวเติมเสริมแรงต่างๆ มีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% สูงกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติมเสริมแรง โดยสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น มีความยืดหยุ่นลดลง การดึงชิ้นงานให้ยืดออกต้องใช้แรงมาก ส่งผลให้มอดูลัสมีค่าสูงขึ้นมาก

มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน มีค่า 0.88 และ 1.98 MPa ตามลำดับ ส่วนมอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน หลังอบเร่งด้วยความร้อน แสดงไว้ในตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.20–4.21

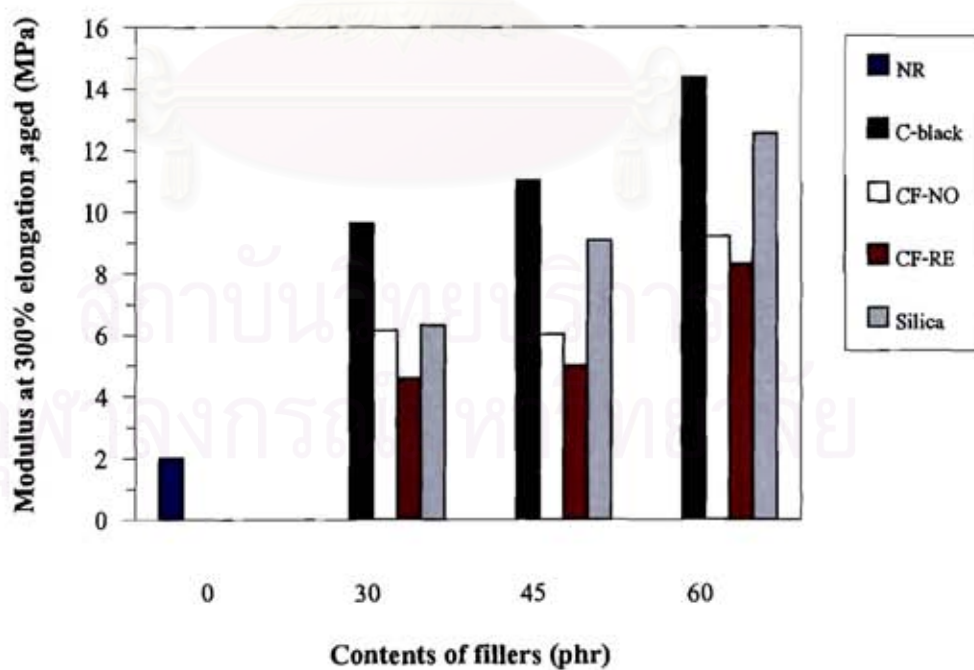
ตารางที่ 4.27 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน

ปริมาณสาร ตัวเติม (phr)	มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% (MPa)							
	100%				300%			
	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
30	2.410	1.485	1.412	2.335	9.628	4.531	4.080	6.308
45	3.859	1.666	1.738	3.428	11.01	5.336	4.405	9.091
60	5.236	1.949	1.906	4.686	14.36	7.592	6.086	12.540





รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน

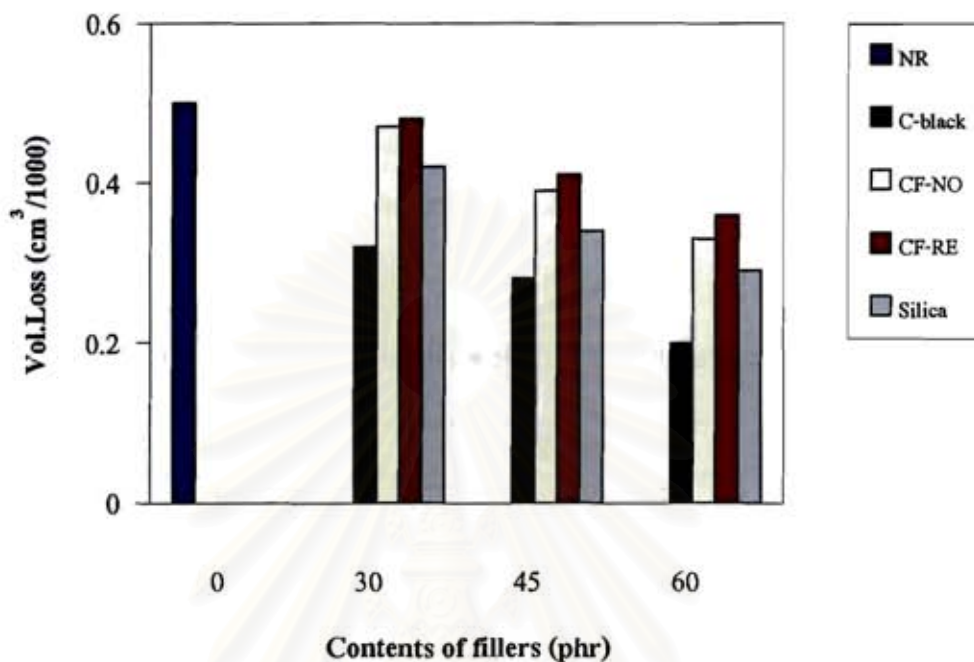
ตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.20– 4.21 แสดงให้เห็นว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของชิ้นงานยางที่ผสมคาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และเรซินทั้งสองชนิด เมื่อผ่านการอบเร่งด้วยความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติ ซึ่งมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ยางจึงเสื่อมสภาพเร็วขึ้น โดยมีแนวโน้มการลดลงไปในทำนองเดียวกับก่อนอบ

#### ความต้านทานการสึกหรอ (Akron abrasion resistance)

ความต้านทานการสึกหรอของยางที่ไม่ได้ผสมและผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.28 และรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.28 ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง

ปริมาณสาร ตัวเติม phr)	ความต้านทานการสึกหรอ (Vol. loss, cm <sup>3</sup> /1000)				
	STR XL	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
0	0.50	-	-	-	-
30	-	0.32	0.47	0.48	0.42
45	-	0.28	0.39	0.41	0.34
60	-	0.20	0.33	0.36	0.29



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการสึกหรอกับปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าความต้านทานการสึกหรอขึ้นกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง กล่าวคือ เมื่อใส่สารตัวเติมเสริมแรงมากขึ้น ความต้านทานการสึกหรอยิ่งเพิ่มขึ้น หรือ ปริมาตรของยางที่หายไปเมื่อถูกขัดสีลดลง สำหรับคาร์บอนแบล็กและซิลิกามีความต้านทานการสึกหรอมากกว่าเรซินทั้งสองชนิด เนื่องจากทั้งคาร์บอนแบล็กและซิลิกา มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่วนเรซินทั้งสองชนิดมีสายโซ่คาร์บอนที่เกิดการพันเกี่ยวกับสายโซ่โมเลกุลของยางและมีส่วนที่เป็นเทอร์โมเซตของเรซินอยู่ ดังนั้น เมื่อมีการขัดสีทั้งสายโซ่โมเลกุลของยางและของเรซินเกิดการสึกหรอไปด้วยกัน แต่เนื่องด้วยมีส่วนที่เป็นเทอร์โมเซตทำให้มีการสึกหรอน้อยกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงด้วย



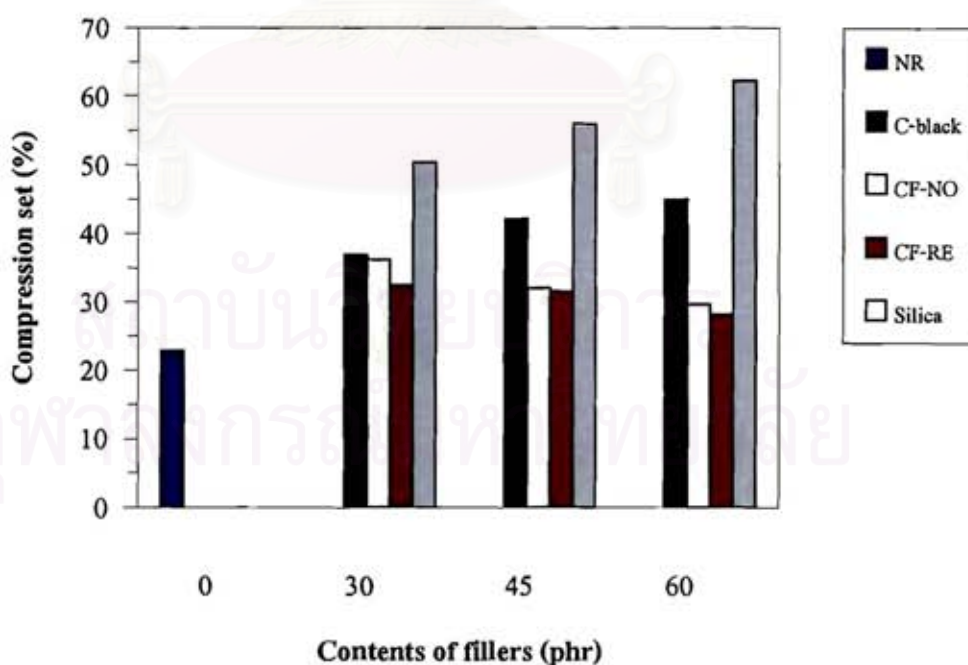
#### 4.2.6 การคั้นตัว (Compression set)

สมบัติการคั้นตัวของยาง คือ สมบัติในการคงสภาพความเป็นอีลาสติคของยางภายใต้ความเค้นอัด ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ถ้าเปอร์เซ็นต์การคั้นตัวต่ำแสดงว่ายางสามารถคั้นตัวได้ดี และถ้าเปอร์เซ็นต์การคั้นตัวสูงแสดงว่ายางมีการคั้นตัวไม่ดี

การคั้นตัวของยางที่ไม่ได้ผสมและผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ ในปริมาณต่างๆ กัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.29 และรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.29 การคั้นตัวของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงชนิดต่างๆ

ปริมาณสาร ตัวเติม (phr)	การคั้นตัว (%)				
	STR XL	C-black	CF-NO	CF-RE	Silica
0	22.82	-	-	-	-
30	-	36.79	36.13	32.45	50.32
45	-	42.11	31.97	31.48	55.87
60	-	44.95	29.62	28.16	62.13

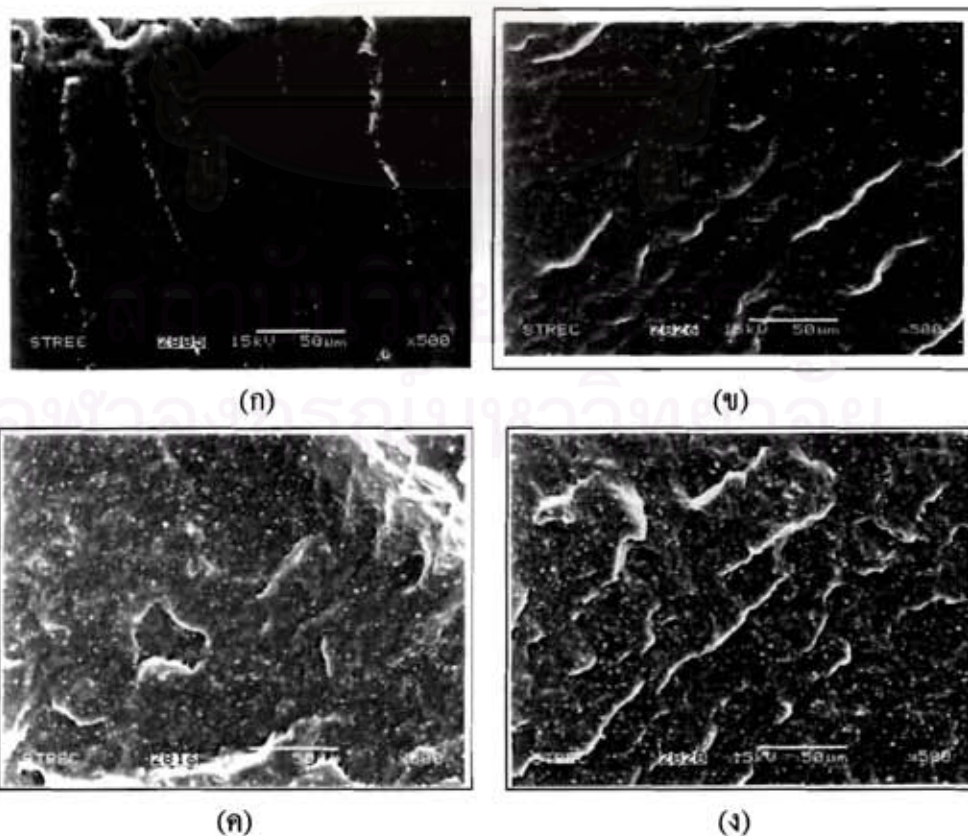


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการคั้นตัวกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง

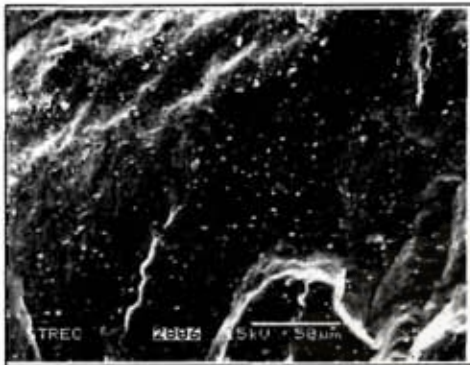
จากตารางที่ 4.29 และรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานยางผสมคาร์บอนแบล็กและซิลิกา มีเปอร์เซ็นต์การคืนตัวสูงขึ้นตามปริมาณที่ใส่ แสดงว่ายางเกิดการยุบตัวมากและมีการคืนตัวไม่ดี เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคกับสายโซ่โมเลกุลของยาง จึงขัดขวางการคืนตัวของยาง ขณะที่ยางผสมเรซินทั้งสองชนิดมีเปอร์เซ็นต์การคืนตัวต่ำลงเมื่อปริมาณเรซินเพิ่มขึ้น แสดงว่ายางเกิดการยุบตัวน้อยและการคืนตัวดีขึ้น ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับคาร์บอนแบล็กและซิลิกา ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของเรซินมีเพียงการพันกันกับสายโซ่โมเลกุลของยาง จึงทำให้ยางยังมีความยืดหยุ่นได้มากกว่า แต่ก็ยังต่ำกว่าการคืนตัวของยางที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมเสริมแรง

#### 4.2.6 การกระจายตัวของสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ

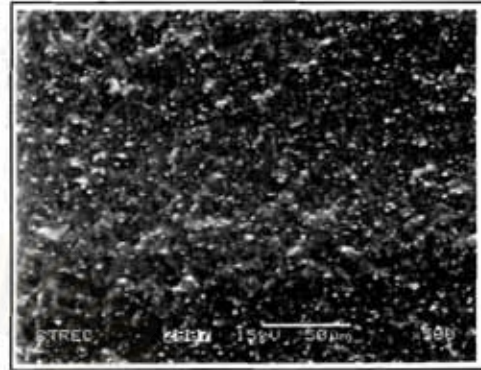
รูปที่ 4.24 แสดงการกระจายตัวของสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ ซึ่งผ่านการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM (Scanning Electron Microscopy) โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า สำหรับชิ้นงานยางผสมกับคาร์บอนออลฟอรม์ลดีไฮด์เรซินทั้งสองชนิดและซิลิกา ซึ่งเป็นกำลังขยายที่เพียงพอเนื่องจากขนาดอนุภาคของเรซินและซิลิกามีขนาดในระดับไมครอน สำหรับชิ้นงานยางที่ผสมกับคาร์บอนแบล็กนั้นต้องใช้กำลังขยายสูงถึง 3500 เท่า เนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีขนาดเล็กมาก



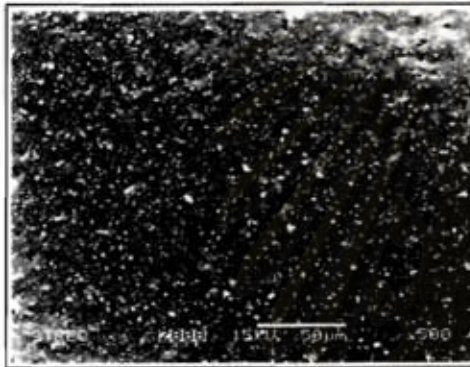




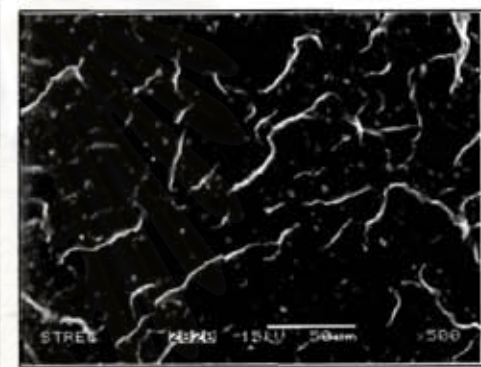
(d)



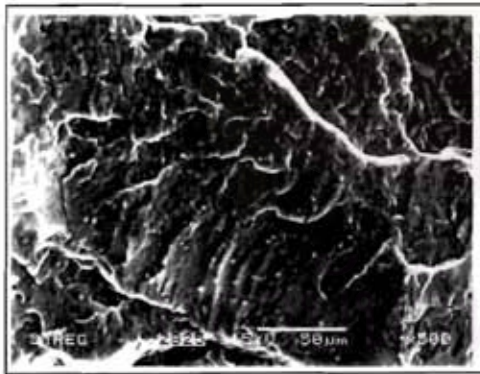
(e)



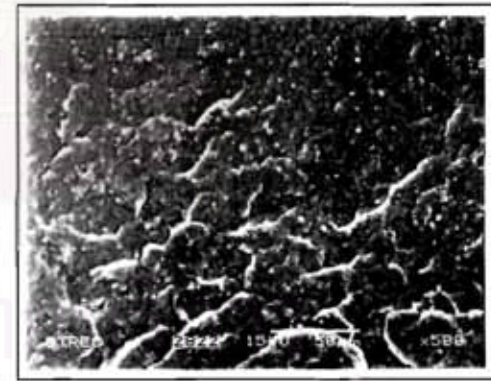
(f)



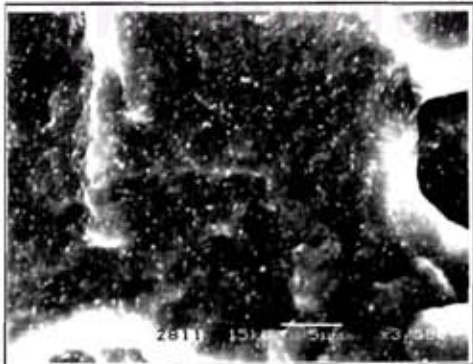
(g)



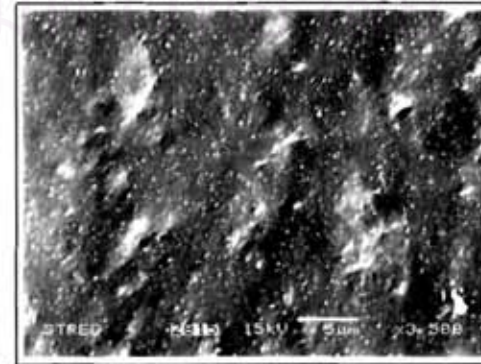
(h)



(i)

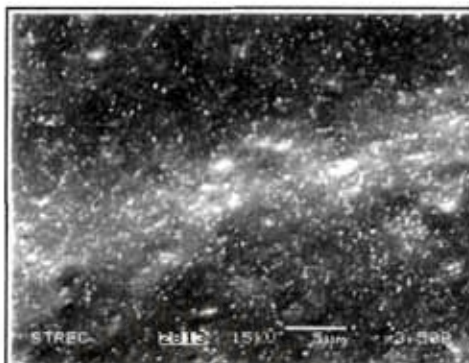


(j)



(k)





(จ)

รูปที่ 4.24 (ก) ขางธรรมชาติ (ข) CF-NO 30 phr (ค) CF-NO 45 phr (ง) CF-NO 60 phr

(จ) CF-RE 30 phr (ฉ) CF-RE 45 phr (ช) CF-Re 60 phr (ซ) Silica 30 phr

(ณ) Silica 45 phr (ญ) Silica 60 phr (ฎ) C-black 30 phr (ฏ) C-black 45 phr

(ฐ) C-black 60 phr

จากรูปที่ 4.24 (ข)-(ซ) แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนออล-พอร์มัลดีไฮด์เรซินทั้ง 2 ชนิด มีการกระจายตัวที่ดีเมื่อนำไปบดผสมกับขางธรรมชาติ ซึ่งการกระจายตัวที่ดีนี้ส่งผลและยืนยันได้ว่าขางผสมเรซินทั้งสองชนิดมีสมบัติที่ดีหลายประการดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่วนรูปที่ 4.24 (ช)-(ฐ) แสดงให้เห็นว่าซิลิกาและคาร์บอนแบล็กมีการกระจายตัวในขางได้ดีเช่นเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สามารถสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินได้ทั้งชนิดรีโซลและโนโวแลกจากคาร์ดานอลที่สกัดได้จากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

5.1.2 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลมากที่สุดซึ่งได้จากการทดลอง คือ 75.37% โดยใช้สภาวะของปฏิกิริยา ดังนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล เท่ากับ 2.0 ค่า pH เท่ากับ 8.0 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

5.1.3 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกมากที่สุดซึ่งได้จากการทดลอง คือ 79.68% โดยใช้สภาวะของปฏิกิริยา ดังนี้ คือ อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอล เท่ากับ 0.8 ค่า pH เท่ากับ 2.2 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง

5.1.4 ขงธรรมชาติที่ผสมคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินสามารถวัดค่าในซีไอเช่นเดียวกับการใช้คาร์บอนแบล็กและซิลิกา

5.1.5 คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับขงธรรมชาติได้ดี โดยทำให้สมบัติด้านความแข็ง ความทนแรงดึง โมดูลัส และความต้านทานการสึกหรอของขงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ระยะยึดที่จุดขาด และการคืนตัวของขงลดลง

5.1.6 ความสามารถในการเสริมแรงขงธรรมชาติด้วยคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินทั้งชนิดรีโซลและโนโวแลกถึงแม้ยังไม่ดีเท่าคาร์บอนแบล็ก แต่ในบางสูตรดีกว่าการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกโดยทั่วไปจะมีสมบัติที่เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์สำหรับขงธรรมชาติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้มีการเติมสารแอนติออกซิแดนซ์เข้าไปด้วย ซึ่งหากมีงานวิจัยต่อไปในอนาคต จึงควรตรวจสอบสมบัติการเป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินที่สังเคราะห์ได้ หรือทดลองนำไปใช้ร่วมกับสารตัวเติมเสริมแรงอื่นๆ

### บรรณานุกรม

1. ชวิชัย ทิววรรณวงศ์, คมสันติ เม่ากลาง. การศึกษาการสกัดน้ำมัน CNSL จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. รายงานการวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ขอนแก่น, 2544.
2. Pat O'Farrell, Sam Blaikei and Elias Chacko. The New Rural Industries-A Handbook for Farmers and Invertor-Cashew [article online]. [www.rirde.gov.au/cashew.html](http://www.rirde.gov.au/cashew.html).
3. Philip Blazdell. The Mighty Cashew, Interdisciplinary Science Reviews, 25(2000):220-226.
4. Mwailambo and Ansell. Cure Characteristics of Alkali Catalysed Cashew Nut Shell Liquid Formaldehyde Resins. J. of Materials Sci, 36(2001) 3693-3698.
5. Menon, Pillai, Sudha, and Methew. Cashew Nut Shell Liquid-Its Polymeric and Other Industrial Products. J. of Scientific and Industrial Research, 44 (1985):324-338.
6. Odian, G. Principles of Polymerization : The College of Stitute Islands The University of New York, 1982.
7. Misra and Pandey. Kinetic of Alkali-Catalyzed Cardanol-Formaldehyde Reaction. II. Mechanism of the Rreaction. J. Appl. Polym. Sci., 30 (1985): 969-977.
8. Mahanwar and Kale. Effect of Cashew Nut Shell Liquid on Properties of Phenolic Resin. J. App. Polym. Sci., 61(1996):2107-2111.
9. Maria and Gouvan. Utilisation of Cashew Nut Shell Liquid from Anacardium Occdentale a Stating Material for Organic Synthesis : A Novel Route to Lasiodiplodin from Cardols. J. Braz. Chem. Soc., 10 (1999):13-20.
10. Vu and Mark. Blends of Natural Rubber with Cardanol-Formaldehyde Resins. Polym.-Plast.Tecnol. Eng., 38 (1999):189-200.
11. Ikeda, Tanaka, Uyama and Kobayashi. A New Crosslinkable Polyphenol from a Renewable Resource. Macromol. 21 (2000): 496-499.
12. Menon, Aigbodion, Pillai, Mathew, and Bhagawan. Processability Characteristics and Physico-Mechanical Properties of Natural Rubber Modified with CNSL and CNSL-Fomaldehyde resin. European polymer Journal. 38 (2002): 163-168.



13. นายณัฐพงศ์ เจริญวงศา. ผลของชนิดและปริมาณของฟีนอลิกเรซินต่อภาวะการบ่มสมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการติดไฟของพอลิเมอร์แอลลอยด์เบนซอกลอกซาซีน/ฟีนอลิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
14. Rout, Jena and Das. Spectral and Thermal Studies of Biomass Cured Phenolic Resin Polymers. *Biomass & Bioenergy*. 25 (2003): 329-334.
15. Timo, Leila, Jouni and Tuula. IR Spectroscopy as a Quntitative Analysis Method of Phenol-Formaldehyde Resole resins. *J. Appl. Polym. Sci.*, 69 (1998): 2175-2185.
16. Hill. *Rubber Engineering*. Indian Rubber Insitute, New York, 2000.
17. Ciullo and Hewitt. *The Rubber Formulary*. Noyes Publication, New York. 1999.
18. Tinker and Jones. *Novel Techniques for Blending with Specialty Polymers*. Blends of Natural Rubber. Chapman & Hall, London, 1998.
19. นางสาวโอบเอื้อ อิ่มวิทยา. ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

## ภาคผนวก

## 1. ข้อมูลดิบการทดสอบสมบัติความแข็งของยางที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงตามอัตราส่วนต่างๆ

ตาราง ก. ค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

สูตร	ค่าความแข็ง (Shore A) ก่อนอบ					
	1	2	3	4	5	ค่ากลาง
C-black (30 phr)	46.2	42.7	45.6	44.5	42.9	44.5
CF-NO (30 phr)	41.7	44.2	40.9	44.7	44.8	44.2
CF-RE (30 phr)	38.9	39.7	39.2	39.0	39.9	39.2
Silica (30 phr)	39.7	40.0	39.4	39.1	39.8	39.7
C-black (45 phr)	48.9	49.0	49.1	49.3	48.7	49.0
CF-NO (45 phr)	47.6	46.9	47.4	47.0	47.1	47.1
CF-RE (45 phr)	42.4	42.5	43.0	42.6	42.1	42.5
Silica (45 phr)	47.1	47.0	46.9	47.2	47.2	47.1
C-black (60 phr)	54.9	55.0	54.6	54.7	54.5	54.7
CF-NO (60 phr)	50.9	51.1	50.0	50.2	50.3	50.3
CF-RE (60 phr)	47.4	47.9	47.0	47.1	47.6	47.4
Silica (60 phr)	51.0	51.1	51.7	51.3	51.9	51.3

ตาราง ข. ค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

สูตร	ค่าความแข็ง (Shore A) หลังอบ					
	1	2	3	4	5	ค่ากลาง
C-black (30 phr)	46.6	46.9	47.0	46.1	46.4	46.6
CF-NO (30 phr)	44.1	44.5	44.7	44.3	44.8	44.5
CF-RE (30 phr)	40.9	41.0	40.1	39.9	40.7	40.7
Silica (30 phr)	44.9	45.7	45.1	46.0	45.1	45.1
C-black (45 phr)	52.3	51.9	52.0	52.7	53.1	52.3
CF-NO (45 phr)	47.4	48.5	48.1	47.9	47.6	47.9
CF-RE (45 phr)	45.3	46.2	44.9	45.0	45.6	45.3
Silica (45 phr)	49.8	49.5	49.7	49.1	49.4	49.5
C-black (60 phr)	60.0	59.8	61.9	60.1	61.0	60.1
CF-NO (60 phr)	48.7	49.6	49.9	46.4	50.1	49.6
CF-RE (60 phr)	49.6	48.8	48.9	49.1	48.5	48.9
Silica (60 phr)	56.7	55.0	55.6	54.2	55.5	55.5

2. ข้อมูลดิบของการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงตามอัตราส่วนต่างๆ

ตาราง ก. ค่าความทนแรงดึงของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

สูตร	ค่าความทนแรงดึง (MPa) ก่อนอบ						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C-black (30 phr)	29.92	31.32	29.15	30.30	31.01	30.34	0.86
CF-NO (30 phr)	29.55	30.8	29.13	28.6	29.33	29.48	0.81
CF-RE (30 phr)	26.98	27.13	28.67	27.49	26.41	27.33	0.84
Silica (30 phr)	26.90	27.88	27.30	26.40	27.01	27.09	0.54
C-black (45 phr)	29.77	28.44	27.50	28.59	28.93	28.65	0.82
CF-NO (45 phr)	26.33	25.02	25.12	26.73	25.88	25.82	0.74
CF-RE (45 phr)	24.36	25.02	23.85	26.10	24.77	24.82	0.84
Silica (45 phr)	25.96	26.08	25.61	24.86	24.26	25.35	0.77
C-black (60 phr)	27.89	26.06	28.13	26.88	28.14	27.42	0.91
CF-NO (60 phr)	25.17	25.07	24.69	25.21	25.36	25.10	0.27
CF-RE (60 phr)	19.52	18.46	18.77	18.24	19.77	18.95	0.66
Silica (60 phr)	23.71	23.00	23.13	22.76	23.66	23.25	0.41

ตาราง ง. ค่าความทนแรงดึงของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

สูตร	ค่าความทนแรงดึง (MPa) หลังอบ						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C-black (30 phr)	31.55	29.75	30.59	31.01	29.98	30.58	0.73
CF-NO (30 phr)	28.29	27.70	27.10	28.80	27.33	27.84	0.69
CF-RE (30 phr)	23.68	24.01	23.96	24.55	23.56	23.95	0.38
Silica (30 phr)	24.76	25.99	26.03	25.14	24.25	25.23	0.77
C-black (45 phr)	27.79	26.14	27.54	26.03	26.7	26.84	0.79
CF-NO (45 phr)	24.22	23.88	23.02	23.40	24.74	23.85	0.67
CF-RE (45 phr)	21.24	23.05	23.11	21.66	21.84	22.18	0.85
Silica (45 phr)	25.00	24.21	23.59	24.06	23.68	24.11	0.56
C-black (60 phr)	26.13	25.07	24.75	25.12	24.64	25.14	0.58
CF-NO (60 phr)	24.66	23.52	24.57	23.41	23.17	23.86	0.69
CF-RE (60 phr)	19.43	17.33	18.30	17.56	18.45	18.21	0.82
Silica (60 phr)	22.38	23.18	22.46	22.03	22.19	22.44	0.44



### 3. ข้อมูลดิบของการทดสอบระยะยึดเมื่อขนาดของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงตามอัตราส่วนต่างๆ

ตาราง จ. ระยะยึดที่จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

สูตร	ระยะยึดเมื่อขาด (%) ก่อนอบ						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C-black (30 phr)	743.5	742.3	746.7	745.8	743.6	744.4	1.81
CF-NO (30 phr)	736.4	739.1	711.5	720.8	718.6	725.2	11.92
CF-RE (30 phr)	779.2	778.5	780.3	782.4	791.9	782.4	5.47
Silica (30 phr)	765.8	742.3	755.8	738.5	748.1	750.1	10.93
C-black (45 phr)	680.9	659.4	668.2	675.5	686.3	674.0	10.58
CF-NO (45 phr)	806.5	748.1	782.2	824.6	800.9	792.4	29.04
CF-RE (45 phr)	890.4	869.6	884.7	854.2	855.9	871.0	16.40
Silica (45 phr)	710.4	645.3	665.7	672.5	688.6	676.5	24.50
C-black (60 phr)	502.3	489.5	527.8	496.7	464.9	496.2	22.69
CF-NO (60 phr)	890.1	865.8	884.7	854.6	870.2	873.0	14.38
CF-RE (60 phr)	950.4	902.8	946.7	922.4	932.5	931.0	19.32
Silica (60 phr)	643.8	603.4	689.1	620.7	665.3	644.4	34.19

ตาราง ฉ. ระยะยึดที่จุดขาดของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

สูตร	ระยะยึดเมื่อขาด (%) หลังอบ						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C-black (30 phr)	721.6	750.9	699.7	735.2	687.3	718.9	25.80
CF-NO (30 phr)	587.2	670.3	633.1	648.2	676.4	643.0	35.70
CF-RE (30 phr)	690.7	688.3	645.2	627.7	669.1	664.2	27.38
Silica (30 phr)	697.8	736.1	712.8	688.2	705.9	708.1	18.11
C-black (45 phr)	629.3	562.1	597.8	610.4	609.5	601.8	24.90
CF-NO (45 phr)	752.6	722.8	698.4	700.3	721.3	719.0	21.92
CF-RE (45 phr)	801.3	739.4	789.4	729.5	729.6	757.0	33.85
Silica (45 phr)	601.8	542.5	584.6	626.9	527.7	567.7	41.17
C-black (60 phr)	491.5	451.2	416.3	455.8	489.7	460.9	31.12
CF-NO (60 phr)	872.6	765.9	748.8	701.2	786.5	775.0	62.99
CF-RE (60 phr)	812.8	790.5	788.6	802.1	831.2	805.0	17.57
Silica (60 phr)	598.4	489.6	512.5	542.9	577.2	544.1	47.76

4. ข้อมูลดิบของการทดสอบมอดูลัสที่ความเครียด 100% ของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงตามอัตราส่วนต่างๆ

ตาราง ข. มอดูลัสที่ความเครียด 100% ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน

สูตร	มอดูลัสที่ความเครียด 100% (MPa) ก่อนอบ						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C-black (30 phr)	1.589	1.601	1.422	1.512	1.493	1.523	0.07
CF-NO (30 phr)	1.389	1.078	1.205	1.247	1.420	1.267	0.13
CF-RE (30 phr)	1.112	1.007	1.071	1.188	1.204	1.116	0.08
Silica (30 phr)	1.890	1.566	1.782	1.408	1.748	1.679	0.19
C-black (45 phr)	2.089	1.976	1.901	1.897	1.944	1.961	0.07
CF-NO (45 phr)	1.699	1.512	1.322	1.371	1.404	1.462	0.14
CF-RE (45 phr)	1.452	1.354	1.369	1.687	1.663	1.505	0.15
Silica (45 phr)	1.968	1.784	1.849	1.698	1.885	1.840	0.10
C-black (60 phr)	4.120	4.401	4.355	3.889	3.768	4.106	0.27
CF-NO (60 phr)	1.886	1.872	1.684	1.716	1.810	1.794	0.09
CF-RE (60 phr)	1.716	1.516	1.685	1.573	1.618	1.621	0.08
Silica (60 phr)	2.018	1.986	2.149	1.889	1.967	2.001	0.09

ตาราง ข. มอดูลัสที่ความเครียด 100% ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน

สูตร	มอดูลัสที่ความเครียด 100% (MPa) หลังอบ						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C-black (30 phr)	2.697	2.489	2.147	2.358	2.356	2.410	0.20
CF-NO (30 phr)	1.532	1.675	1.402	1.399	1.420	1.485	0.11
CF-RE (30 phr)	1.097	1.108	1.118	1.146	1.241	1.142	0.05
Silica (30 phr)	2.438	2.169	2.259	2.544	2.268	2.335	0.15
C-black (45 phr)	3.945	3.846	3.915	3.801	3.786	3.859	0.06
CF-NO (45 phr)	1.726	1.593	1.749	1.563	1.697	1.666	0.08
CF-RE (45 phr)	1.803	1.633	1.716	1.839	1.703	1.738	0.08
Silica (45 phr)	3.613	3.243	3.507	3.332	3.445	3.428	0.14
C-black (60 phr)	5.367	5.236	5.402	5.029	5.120	5.236	0.15
CF-NO (60 phr)	2.018	1.766	1.891	1.912	2.159	1.949	0.14
CF-RE (60 phr)	1.957	2.014	1.897	1.796	1.869	1.906	0.08
Silica (60 phr)	5.103	4.102	5.223	4.320	4.681	4.686	0.48



5. ข้อมูลดิบของการทดสอบมอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรงตามอัตราส่วนต่างๆ

ตาราง ณ. มอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบแรงด้วยความร้อน

สูตร	มอดูลัสที่ความเครียด 300% (MPa) ก่อนอบ						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C-black (30 phr)	5.822	6.159	5.193	5.663	5.489	5.665	0.36
CF-NO (30 phr)	4.689	4.251	3.746	3.996	4.025	4.141	0.35
CF-RE (30 phr)	4.223	3.807	4.436	3.992	4.038	4.011	0.23
Silica (30 phr)	3.921	3.476	3.771	3.696	3.825	3.738	0.16
C-black (45 phr)	7.893	6.998	7.549	7.023	7.920	7.484	0.45
CF-NO (45 phr)	4.31	4.106	4.029	4.440	4.193	4.216	0.16
CF-RE (45 phr)	4.146	4.069	3.625	3.771	4.020	3.926	0.21
Silica (45 phr)	4.908	4.810	4.591	43.61	4.759	4.686	0.21
C-black (60 phr)	14.99	13.153	11.278	10.854	11.657	12.390	1.69
CF-NO (60 phr)	5.453	5.201	5.103	5.299	5.007	5.213	0.17
CF-RE (60 phr)	4.698	3.914	4.506	4.358	4.036	4.302	2.34
Silica (60 phr)	5.684	5.228	5.108	5.249	5.423	5.338	1.46

ตาราง ณ. มอดูลัสที่ความเครียด 300% ของยางธรรมชาติที่ใส่สารตัวเติมเสริมแรงหลังอบแรงด้วยความร้อน

สูตร	มอดูลัสที่ความเครียด 300% (MPa) หลังอบ						
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า SD
C-black (30 phr)	9.573	9.24	10.245	10.047	9.028	9.628	0.51
CF-NO (30 phr)	4.129	5.123	4.368	4.521	4.516	4.531	0.36
CF-RE (30 phr)	4.553	3.986	4.015	3.997	3.852	4.080	0.27
Silica (30 phr)	6.710	6.248	5.986	6.047	6.549	6.308	0.31
C-black (45 phr)	10.489	12.14	10.003	11.351	11.098	11.01	0.81
CF-NO (45 phr)	5.693	5.204	4.973	5.307	5.503	5.336	0.27
CF-RE (45 phr)	4.897	4.593	4.003	4.398	4.135	4.405	0.35
Silica (45 phr)	9.796	9.015	8.976	8.664	9.004	9.091	0.42
C-black (60 phr)	16.89	15.014	13.859	12.359	13.69	14.36	1.69
CF-NO (60 phr)	8.226	7.359	7.664	7.449	7.265	7.592	0.38
CF-RE (60 phr)	6.569	6.014	5.985	5.659	6.201	6.086	0.33
Silica (60 phr)	15.987	11.159	10.478	13.650	11.447	12.54	2.26



6. ข้อมูลดิบการทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรง

ตาราง ฎ. ความต้านทานการสึกหรอของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรง

สูตร	ความต้านทานการสึกหรอ [Vol. Loss (cm <sup>3</sup> /1000)]			
	1	2	ค่าเฉลี่ย	SD
C-black (30 phr)	0.33	0.31	0.32	0.01
CF-NO (30 phr)	0.48	0.46	0.47	0.01
CF-RE (30 phr)	0.47	0.49	0.48	0.01
Silica (30 phr)	0.42	0.42	0.42	0
C-black (45 phr)	0.28	0.28	0.28	0
CF-NO (45 phr)	0.40	0.38	0.39	0.01
CF-RE (45 phr)	0.40	0.42	0.41	0.01
Silica (45 phr)	0.34	0.34	0.34	0
C-black (60 phr)	0.21	0.19	0.20	0.01
CF-NO (60 phr)	0.32	0.34	0.33	0.01
CF-RE (60 phr)	0.36	0.36	0.36	0
Silica (60 phr)	0.29	0.29	0.29	0

## 7. ข้อมูลดิบการทดสอบสมบัติการคืนตัวของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรง

ตาราง ฎ. การคืนตัวของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเสริมแรง

สูตร	การคืนตัว (%)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
C-black (30 phr)	36.80	36.56	37.01	36.79	0.22
CF-NO (30 phr)	36.11	36.24	36.05	36.13	0.09
CF-RE (30 phr)	32.14	33.04	32.18	32.45	0.50
Silica (30 phr)	50.94	49.58	50.44	50.32	0.68
C-black (45 phr)	43.00	41.07	42.27	42.11	0.97
CF-NO (45 phr)	32.26	31.54	32.11	31.97	0.37
CF-RE (45 phr)	32.99	30.24	31.2	31.48	1.39
Silica (45 phr)	56.78	55.71	55.12	55.87	0.84
C-black (60 phr)	44.63	46.05	44.19	44.95	0.97
CF-NO (60 phr)	30.65	29.14	29.06	29.62	0.89
CF-RE (60 phr)	28.95	27.51	28.03	28.16	0.72
Silica (60 phr)	61.17	63.21	62.01	62.13	1.02

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

