



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติด้วย อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน

Modification of Natural Rubber by Anacardic-formaldehyde Resin

นามผู้วิจัย นายณัฐวัชต์ งามวงศ์น้อย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ปวีณา สุริยธนาภาส, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติด้วย อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน

Modification of Natural Rubber by Anacardic-formaldehyde Resin

โดย

นายณัฐวัชต์ งามวงศ์น้อย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐวัชร์ งามวงศ์น้อย 2554: การปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติด้วย อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D. 102 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ชนิดรีโซลเรซินจากกรด อนาคาร์ดิคที่สกัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเรซินที่สังเคราะห์ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิคต่อฟอร์มัลดีไฮด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา เรซินที่สังเคราะห์ได้ถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิค FTIR ,GPC และใช้เทคนิค DSC ในการศึกษาความเสถียรทางความร้อน พบว่าค่า T_g และมวลโมเลกุลเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น โดยอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ หรือ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถให้ค่า T_g และ M_w สูงสุด เท่ากับ 146.35°C, 3157 g/mol และ 135.56°C, 3567 g/mol ตามลำดับ

ยางธรรมชาติที่ผสมอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน สามารถลดเวลาวัลคาไนซิ่ง พร้อมทั้งปรับปรุงสมบัติเชิงกลทางด้านการต้านทานแรงดึง การทนต่อแรงยืดจนขาดอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสมเรซิน และยางที่ผสมเรซินจากอุตสาหกรรม (bis-phenol A resin) เนื่องจากสายโซ่ยาวที่ไม่อึดตัวของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินไปสร้างพันธะเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างพัวพันยุ่งเหยิงกับสายโซ่โมเลกุลของยาง ซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอรตามธรรมชาติ อีกทั้งหมู่เมทิลอลของเรซินที่สังเคราะห์ได้ที่เชื่อมโยงกับโมเลกุลยางด้วยโครงสร้างวงแหวนโครแมน ทำให้ยางที่ผสมนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเคลื่อนตัวได้ดีกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมเรซิน อย่างไรก็ตามค่าการยุบตัวถาวรของยางธรรมชาติที่ผสมอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินมีค่าสูง อาจเป็นผลมาจากการขัดขวางของสายโซ่ยาวของเรซินที่สังเคราะห์ได้ และการขาดของสายโซ่โมเลกุล เมื่อได้รับความร้อน ทำให้สภาพอีลาสติคของยางลดลง

Nuttawat Ngamwongnoi 2011: Modification of Natural Rubber by Anacardic-formaldehyde Resin. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Attasak Jaree, Ph.D. 102 pages.

The first part of this research focused on the synthesis of Anacardic (AnAc)-formaldehyde based resole resin from cashew nut shell via condensation polymerization. Effects of the different molar ratios of AnAc to formaldehyde, reaction temperature, reaction time, and type of catalyst on the polymer properties were studied. The characterization of AnAc-formaldehyde based resole resin was done by FTIR and GPC analyses. DSC technique was used for investigate thermal properties of AnAc-formaldehyde resin. It was found that T_g and M_w (the average molecular weight of AnAc-formaldehyde resin) increased with increasing formaldehyde content, reaction time, and reaction temperature. The maximum of T_g and M_w of AnAc-formaldehyde resin at 1.0:2.0 molar ratios with 90°C for 10 hours in presence of NH_3 or KOH catalysts were 146.35°C, 3157 g/mol and 135.56°C, 3567 g/mol, respectively. The synthesized resin was used to enhance mechanical properties and thermal stability of rubber compounds.

The vulcanizing time of Natural Rubber (NR)/AnAc-formaldehyde resin blend decreased with increasing the resin contents in the range of 5-15 phr. The NR/AnAc-formaldehyde resin blend exhibited higher tensile strength and elongation at break compared to that of the unmodified NR and the NR modified with commercial resin, due to the plasticizing effect of the unsaturated side chain and methylol groups of AnAc-formaldehyde resin to form the entangled network structure with NR. Therefore, NR/AnAc-formaldehyde resin blend was more flexible. However, the higher compression set of the NR/ AnAc-formaldehyde resin blend resulted from the chain scission with thermal conditions and the hindrance of the unsaturated sites of aliphatic long chain of AnAc-formaldehyde resin.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถศักดิ์ จารีย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ดร.มนตรี สว่างพุกษ์ และดร.ปวีณา สุริยธนาภาส กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ วรรณกุล กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้คำปรึกษาในการเรียนรู้ ค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน มอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป พร้อมทั้งเอื้อเฟื้อสถานที่อุปกรณ์ สารเคมีในการทดลองปฏิบัติการจนสำเร็จลุล่วง และขอขอบคุณ คุณพิงพิศ กมประพันธ์ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อน ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำต่างๆ และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติ ด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่สนับสนุนทุนการศึกษา

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ที่ได้อบรม และให้กำลังใจมาตลอดในทุกๆ เรื่อง

ณัฐวัชต์ งามวงศ์น้อย

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุป	67
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์	76
ภาคผนวก ข ภาพผลการตรวจสอบสมบัติความร้อนของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์	
เรซิน	78
ภาคผนวก ค ภาพผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์	
เรซิน	90
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สูตรทางผสมเคมีเพื่อการทดสอบสมบัติการคงรูป	34
2	อัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์	42
3	ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ทำสารประกอบยางสูตรต่างๆ	44
4	ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกันของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์	51
5	ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิต่างๆ	52
6	ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ 90 °C ที่เวลาการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ	53
7	ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกันของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์	54
8	ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิต่างๆ	55
9	ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ 90 °C ที่เวลาการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ	57
10	มวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้ 3% NH_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะการทดลองต่างๆ	59
11	มวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้ 3% KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะการทดลองต่างๆ	60
12	เวลาวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ผสมกับเรซิน ที่อัตราส่วนต่างๆ	62
13	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางจากการผสมยางธรรมชาติกับอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน และเรซินจากอุตสาหกรรม	65

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ผลมะม่วงหิมพานต์	6
2 ส่วนประกอบของผลมะม่วงหิมพานต์	7
3 เมล็ดมะม่วงหิมพานต์	9
4 องค์ประกอบของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL)	10
5 โครงสร้างโซ่ตรงของไฮโดรคาร์บอน (C15) ที่ต่อกับวงเบนซีนตรงตำแหน่งเมต้า	10
6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของรีโซล เรซิน	14
7 โครงสร้างของเมทิลอลที่สามารถเกิดขึ้นได้	14
8 พันธะเมทิลีน (methylene bridge)	15
9 พันธะอีเทอร์ (ether bridge)	15
10 โครงสร้างเชื่อมขวางที่เกิดในรีโซลเรซิน	16
11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของโนโวแลก เรซิน	17
12 โครงสร้างเชื่อมขวางของโนโวแลก เรซิน	18
13 ไอโซเมอร์ของพอลิไอโซพรีน	19
14 ไดอะแกรมของเครื่อง Gel permeation Chromatograph	27
15 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง DTA	28
16 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง DSC	29
17 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC	29
18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น- ความเครียด	31
19 แสดงเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness meter)	32
20 การทดสอบการคืนตัวของยาง (Compression test)	33
21 ลักษณะของอนุภาคคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่สังเคราะห์ได้	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	FTIR สเปกตรัมของของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	47
23	FTIR สเปกตรัมของของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	48
24	โครงสร้างทางเคมีของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน	49
25	โครงสร้างวงแหวนโครแมนที่เกิดขึ้นระหว่างยางธรรมชาติกับเรซิน	63

ภาพผนวกที่

ข1	ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.6 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	79
ข2	ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.8 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	79
ข3	ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	80
ข4	ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.2 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	80
ข5	ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.4 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	81
ข6	ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	81
ข7	ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข8 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	82
ข9 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	83
ข10 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	83
ข11 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	84
ข12 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.6 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	84
ข13 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.8 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	85
ข14 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	85
ข15 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.2 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	86
ข16 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.4 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	86
ข17 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	87
ข18 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข19 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	88
ข20 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	88
ข21 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	89
ข22 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	89
ค1 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.6 และ 1.0:1.8 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	91
ค2 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 และ 1.0:2.2 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	92
ค3 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.4 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	93
ค4 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	94
ค5 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค6 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วน โดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH ₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ 1.0:1.6 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	96
ค7 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วน โดยโมล 1.0:1.8 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	97
ค8 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วน โดยโมล 1.0:2.2 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.4 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	98
ค9 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วน โดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	99
ค10 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วน โดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	100
ค11 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วน โดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ	101

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AnAc	=	Anacardic acid (อนาคาร์ดิก)
F	=	Formaldehyde (ฟอร์มัลดีไฮด์)
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
AF	=	อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน
AR_N	=	ยางธรรมชาติผสมอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ที่ใช้ NH_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
AR_K	=	ยางธรรมชาติผสมอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ที่ใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
NH_3	=	สารละลายแอมโมเนีย
KOH	=	โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์
BPA	=	Bis-phenol A resin (เรซินจากอุตสาหกรรม)
BPR	=	ยางธรรมชาติผสมเรซินจากอุตสาหกรรม

การปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติด้วย อนาคาร์ดิค-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน

Modification of Natural Rubber by Anacardic-formaldehyde Resin

คำนำ

ยางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ทำรายได้เข้าประเทศปีละกว่าแสนล้านบาท เนื่องจากยางธรรมชาติมีคุณสมบัติทนแรงดึง แรงฉีกขาด และความยืดหยุ่นสูง และมีการสะสมความร้อนน้อย จึงนำยางธรรมชาติมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปหลากหลายรูปแบบ เช่น ยางรถยนต์ ยางรัดของ รองเท้ายาง ถุงมือยาง ท่อยาง กาวยาง และเครื่องมือการแพทย์ เป็นต้น การปรับปรุงคุณภาพยางธรรมชาติทางด้านคุณสมบัติเชิงกล ความร้อน และพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน จึงจำเป็นต้องใส่สารเติมแต่งเข้าผสมร่วมกับยางธรรมชาติ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงอุตสาหกรรม ดังนั้น สารเติมแต่งจึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมยางอย่างยิ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติ โดยเฉพาะสารเสริมแรง หรือความแข็งแรง ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก (carbon black) ซิลิกา (silica) และเรซิน (resin) เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับยางธรรมชาติ เรซินถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงแทนคาร์บอนแบล็ก และซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากการใส่คาร์บอนแบล็ก และซิลิกาในปริมาณที่มากเกินไป อาจมีผลทำให้ยางแข็งและมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นมากในขณะทำการผสม จึงได้มีการเลือกใช้เรซินเป็นสารตัวเพิ่มความแข็งแรง พร้อมทั้งเพิ่มคุณสมบัติด้านการทนความร้อนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยเรซินที่มีการใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม ได้แก่ ฟีนอลิก เรซิน (phenolic resin) อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) และพอลิเอสเตอร์เรซิน (polyester resin) เป็นต้น ยางธรรมชาติส่วนใหญ่ถูกผลิตเพื่อการส่งออกต่างประเทศในรูปของวัตถุดิบ ทั้งรูปแบบของน้ำยางข้น (concentrated latex) และยางดิบแห้งชนิดต่างๆ เช่น ยางแท่ง STR (Standard Thai Rubber) ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet) และยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheet) เป็นต้น ซึ่งประเทศไทยยังไม่มีการพัฒนาเทคโนโลยีในเชิงอุตสาหกรรมมากนัก ทำให้ยางธรรมชาติที่ปรากฏมีราคาถูก และเป็นเพียงวัตถุดิบที่ส่งต่อไปให้ประเทศอุตสาหกรรม นอกจากนี้ในแต่ละปีประเทศไทยยังต้องสูญเสียเงินเป็นจำนวนมาก เพื่อนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปจากต่างประเทศ ทั้งที่ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติรายใหญ่ ซึ่งในยามที่ราคายางตกต่ำจะมีผลกระทบอย่างมากต่อเศรษฐกิจและชุมชนชาวสวนยางพารา ดังนั้นมาตรการที่จะช่วยลดผลกระทบจากภาวะที่เกิดขึ้น คือ มาตรการสร้างความเข้มแข็งให้แก่อุตสาหกรรมยางพาราในประเทศ โดยเฉพาะด้านการวิจัยเพื่อสร้างความรู้ การเรียนรู้ที่จะนำสู่การพัฒนาตลอดจนการสร้างนวัตกรรม เพื่อสามารถให้เกิดผลลัพธ์ที่ทำให้

ประเทศไทยเป็นศูนย์กลาง ทั้งด้านพัฒนาเทคโนโลยีเชิงอุตสาหกรรม และความรู้ด้านยางธรรมชาติ ในอนาคต โดยการส่งเสริมและสนับสนุนการพัฒนายางธรรมชาติในรูปแบบผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ให้เพิ่มมากขึ้นแทนการส่งออกวัตถุดิบจากต่างประเทศ เพื่อเพิ่มรายได้ของการส่งออกในรูปแบบ ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ตลอดจนการสร้างงานให้ประชาชนในประเทศไทย

มะม่วงหิมพานต์จัดเป็นพืชอุตสาหกรรมอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งกำลังได้รับการ ส่งเสริมและสนับสนุนทั้งภาครัฐบาลและเอกชนที่จะพัฒนาให้เป็นพืชเศรษฐกิจเพื่อเป็นสินค้า ส่งออก โดยมะม่วงหิมพานต์มีแหล่งปลูกดั้งเดิมในภาคใต้ และมีการขยายการปลูกอย่างกว้างขวาง ไปยังภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ เช่น นครราชสีมา กระบี่ พังงา นครศรีธรรมราช ศรีสะเกษ และตราด เป็นต้น การปลูกมะม่วงหิมพานต์ นอกจากเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรแล้วยัง เป็นการเพิ่มการปลูกป่า ทำให้สภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมดีขึ้น โดยเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีเหลือจำนวนมากและมีราคาถูก ซึ่งสามารถนำมาสกัดได้ น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (cashew nut shell liquid, CNSL) มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดข้น สีน้ำตาลดำไม่มีขี้ ซึ่ง CNSL เป็นสารผสมที่เป็นแหล่งสารประกอบฟีนอลิกที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีองค์ประกอบหลักของ CNSL อยู่ 4 ชนิด ได้แก่ กรดอนาคาร์ดิก, คาร์ดานอล, คาร์ดอล และ 2-เมทิล คาร์ดอล ซึ่งกรดอนาคาร์ดิกจะมีปริมาณ 65-70% โดยน้ำหนักของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่ง CNSL มีลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับฟีนอลที่สามารถสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ได้หลายแบบ เช่น ฟีนอลิก เรซิน และอีพอกซี เรซิน เป็นต้น โดยทั่วไปการใช้งานของ CNSL ได้แก่ ทำสี และวาร์นิชที่ต้องการความต้านทานการกัดกร่อน ทำวัสดุเชิงประกอบ เป็นต้น

โดยทั่วไป ฟีนอลิก เรซิน (phenolic resin) สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ฟอรัลดีไฮด์ (formaldehyde) และฟีนอล (phenol) จะได้สารที่มีลักษณะเหนียว เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงแล้วจะแข็งตัวเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เป็นวัสดุฉนวนหุ้มสายไฟ ทั้งยังมี คุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา แข็งแรง ทนความร้อนสูง กันน้ำได้ดี ความโปร่งแสง และสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ซึ่งเหมาะสมกับการใช้เป็นสารเติมแต่งให้กับยางสังเคราะห์ที่มีขี้ แต่ถ้านำไปผสมกับยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ จะพบปัญหาความเข้ากันไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่ไม่มีขี้ จากการที่มีสภาพขี้ต่างกัน ทำให้ไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอในเนื้อยาง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การเตรียมอนาคาร์ดิก-ฟอรัลดีไฮด์ เรซิน (anacardic-formaldehyde resin) จากกรดอนาคาร์ดิกที่สกัดได้จากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เพื่อแก้ปัญหาความไม่เข้ากันระหว่างเรซินและยางธรรมชาติ อีกทั้งเรซินที่เตรียมได้ยังมีสมบัติที่สำคัญ

คือ ทนความร้อนได้ดี ทนต่อสารเคมี มีความยืดหยุ่นสูง มีพื้นผิวที่แข็ง สามารถกันน้ำได้ดี และราคาถูก ดังนั้นจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำไปสู่การพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมเพื่อทดแทนการใช้สารปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีค่า ตลอดจนเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรที่มีอยู่จำนวนมากในประเทศให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพิ่มมากขึ้น



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะการสังเคราะห์อนุภาคคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของอนุภาคคาร์บิกต่อพอร์มัลดีไฮด์ ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของอนุภาคคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยเทคนิค FT-IR, DSC และ GPC เป็นต้น
3. เพื่อศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมกับพอลิเมอร์ที่ได้เปรียบเทียบกับเรซินที่ได้จากการสังเคราะห์กับเรซินที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป

ขอบเขตงานวิจัย

1. สังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ชนิดรีโซล ในช่วงอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนุภาคนาโนคาร์บอนต่อพอร์มัลดีไฮด์ 1:1.6–1:2.4 โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ไม่เกิน 8 ชั่วโมง
2. สังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ชนิดรีโซล ในช่วงอุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
3. สังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ชนิดรีโซล ในช่วงเวลาการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง
4. สังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ชนิดรีโซล โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ สารละลายแอมโมเนีย (NH_3) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)
5. เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผสมอนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน กับยางธรรมชาติที่ผสมเรซินที่ใช้ตามอุตสาหกรรม เช่น ความต้านทานแรงดึง อีลาสติก โมดูลัส ความทนต่อแรงดึงจนขาด ความแข็งแรง และการคืนตัว เป็นต้น

การตรวจเอกสาร

1. มะม่วงหิมพานต์

มะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut) เป็นไม้ผลยืนต้นแบบไม่ผลัดใบ (evergreen tree) ที่มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Anacardium occidentale* ที่มีถิ่นกำเนิดในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศบราซิล โดยมีการเพาะปลูกในประเทศอินเดียและแถบแอฟริกา ทำให้มีการแพร่กระจายไปตามภูมิภาคเขตร้อนขึ้นทั่วโลก ซึ่งเมล็ด ผล และเปลือกของมะม่วงหิมพานต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทั้งด้านอุปโภคบริโภค และอุตสาหกรรมต่างๆ

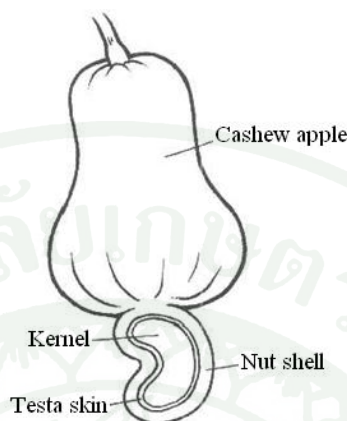
ลักษณะผลของมะม่วงหิมพานต์ที่ปรากฏนั้นประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ผลแท้และผลเทียม (accessory fruit) โดยผลเทียมมีลักษณะคล้ายผลแอปเปิ้ล (cashew apple) หรือรูปไข่ ซึ่งเป็นส่วนของก้านดอกที่ได้รับการผสมเกสรและขยายตัวพองขึ้นจากฐานดอก เมื่อผลสุกจะมีสีเหลือง หรือ ส้มแดง มีความยาวประมาณ 5-11 เซนติเมตร ส่วนผลแท้ของมะม่วงหิมพานต์นั้น เป็นเมล็ดที่มีลักษณะคล้ายไต รูปนูนนัยมย หรือเมล็ดถั่ว งอกออกจากปลายของผลเทียม ในทางพฤกษศาสตร์ถือว่าเป็นเมล็ด (seed) แต่อย่างไรก็ตาม นักพฤกษศาสตร์บางท่านถือว่าผลแท้นั้นเป็นผลที่มีเปลือกแข็ง เมล็ดจะห่อหุ้มด้วยเปลือกสองชั้น ประกอบด้วยสารจำพวกยางฟีนอลิก (caustic phenolic resin) น้ำมัน urushiol และพิษที่ระคายเคืองต่อผิวหนังอย่างรุนแรง (พบได้ในพืชจำพวกไอวี่พิษ (poison-ivy)) (Intermediate Technology Development Group, 2009) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ผลมะม่วงหิมพานต์

ที่มา: สถาบันอุตุนิยมหาวิทยาลัยราชภัฏ (2553)

เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut) ประกอบด้วยส่วนเปลือกประมาณ 72-75% และเมล็ดในอีกประมาณ 25% ดังภาพที่ 2 โดยอัตราส่วนนี้แตกต่างกันตามแหล่งที่เพาะปลูก



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของผลมะม่วงหิมพานต์

ที่มา: Azam-Hi and Judge (2004)

เปลือกเมล็ด (Nut shell) จะมีผิวหนังนอก (Epicarp) และผิวหนังใน (Endocarp) เปลือกทั้งสองชั้นนี้มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง เรียกว่า Mesocarp ทำหน้าที่ห่อหุ้มยางและน้ำมัน โดยน้ำมันในชั้นนี้เป็นอันตรายต่อผิวหนัง เมื่อถูกความร้อนสูงจะระเหยได้ มีกลิ่นฉุน กัดเยื่อจมูก และคันตา โดยน้ำมันที่สกัดได้จากเปลือกเรียกว่า น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Cashew nut shell liquid, CNSL)

เปลือกชั้นใน (Testa skin) ห่อหุ้มเมล็ดในอีกชั้นหนึ่ง ส่วนเนื้อใน (Kernel) มีลักษณะโค้งงอคล้ายไต มี 2 ซีก สีขาวนวล เป็นอาหารที่มีคุณค่า ประกอบด้วยโปรตีน 20 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 47 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นยังมีเกลือแร่ และวิตามินในไขมันที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ วิตามินเอ วิตามินบี และยังมีกรดไลโนลิกอยู่มากพอที่จะช่วยป้องกันโรคไขมันในตับ และโรคหัวใจอีกด้วย (Das *et al.*, 2003)

ในประเทศไทย มะม่วงหิมพานต์จัดเป็นพืชทางเศรษฐกิจที่สำคัญที่ได้รับการส่งเสริมให้เป็นพืชอุตสาหกรรมในแผนสังคมและพัฒนาแห่งชาติ โดยเป็นไม้ผลยืนต้นที่เจริญเติบโตได้ดี มีแหล่งเพาะปลูกในพื้นที่ภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ มีชื่อเรียกตามสำเนียง

ภาษาถิ่นแตกต่างกัน เช่น กาหยู กาหยี ม่วงเม็ดล่อ ม่วงเล็ดล่อ หัวครก เป็นต้น ซึ่งสภาพความต้องการบริโภคในปัจจุบันมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นตลอดเวลา โดยปริมาณการผลิตของไทยและของโลกยังมีไม่เพียงพอ ทั้งนี้เพราะตลาดโลกมีความต้องการบริโภคถึง 160,000 ตันต่อปี แต่ผลผลิตรวมทั่วโลกผลิตได้ประมาณ 110,000 ตันต่อปี เท่านั้น (กองส่งเสริมพืชสวน, 2543)

1.1 ประโยชน์ของมะม่วงหิมพานต์

ปัจจุบันมะม่วงหิมพานต์พบได้ทั่วไปตามภูมิภาคเขตร้อนในแถบเอเชียและอเมริกาใต้ เนื่องจากสภาพอากาศที่ชื้น และอบอุ่น ที่มีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของมะม่วงหิมพานต์ โดยส่วนใหญ่นิยมใช้เนื้อภายในเมล็ดเป็นอาหารว่าง และยังเป็นผลิตภัณฑ์ส่งออกของอินเดีย เวียดนาม และบราซิล ทั้งสามประเทศนี้ มีอัตราการส่งออกถึง 90% ของผลิตภัณฑ์เมล็ดมะม่วงหิม-พานต์ทั่วโลก

1.1.1 ผล

ผลมะม่วงหิมพานต์นั้น มีลักษณะเนื้อนุ่ม น้ำน้ำ แต่มีรสเปรี้ยว รับประทานได้ทั้งดิบและสุก ทางภาคใต้ของประเทศไทย นิยมนำผลห่ามแกงส้ม ออกรสเปรี้ยว ส่วนผลดิบรับประทานกับเกลือเป็นของกินเล่น บางครั้งออกรสฝาดเล็กน้อย ส่วนผลสุกสามารถนำไปหมักเป็นไวน์ น้ำส้มสายชู หรือเครื่องดื่มอื่นๆ ได้ โดยน้ำของผลมะม่วงหิมพานต์ สามารถใช้เป็นยาแก้โรคกระเพาะ แก้อาเจียน เจ็บคอ ขับปัสสาวะ หรือขับเหงื่อได้ อย่างไรก็ตาม ผลมะม่วงหิมพานต์จะมีส่วนประกอบของแทนนินอยู่มาก และเน่าเสียเร็ว ด้วยเหตุนี้ โดยทั่วไปจึงมักจะทิ้งผลทิ้งหลังจากเก็บเมล็ดออก

ผลมะม่วงหิมพานต์ สามารถนำมาสกัดได้สารที่ต่อต้านการเจริญของเนื้องอก โดยในผลมะม่วงหิมพานต์จะมีกรดอนาคาร์ดิก (Anacardic acid) ที่สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของมะเร็งเต้านม (BT-20 breast carcinomas) และคาร์ดอล (Cardol) ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งในปากช่องคลอดอย่างมีประสิทธิภาพ (Schultes and Raffauf, 1990) นอกจากนี้สารคาร์ดอลในผลมะม่วงหิมพานต์ยังสามารถออกฤทธิ์ต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์และต่อต้านพยาธิได้แทบทุกชนิด (Duke *et al.*, 1994) และยังสามารถสกัดได้สารประกอบจำพวกฟีนอลที่สามารถยับยั้ง เอ็นไซม์ไทโรซิเนส ที่เป็นสาเหตุของการเกิดเม็ดสีคล้ำได้ผิวหนัง รวมทั้งเป็นสาเหตุของการเกิดฝ้า กระจุดด่างดำและรอยหมองคล้ำได้ผิวหนังอีกด้วย (Smith *et al.*, 1992)

1.1.2 เมล็ด

เมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นส่วนประกอบของอาหารหลายชนิดแถบเอเชีย เป็นแหล่งสารอาหารที่มีคุณค่า สามารถแปรรูปเป็นเนยเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สำหรับใช้ทาขนมปังแบบเดียวกับเนยถั่ว หรืออาหารกินเล่นก็ได้ ดังภาพที่ 3 โดยเมล็ดมะม่วงหิมพานต์นี้มีส่วนประกอบของน้ำมันพืชสูง จึงมีการนำไปใช้ในเนยถั่วอื่นๆบางชนิด เพื่อเพิ่มน้ำมันเป็นพิเศษ และมีการผลิตเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เป็นสินค้าแปรรูปบรรจุหีบห่อ โดยประมาณปริมาณ 30 กรัม มีพลังงาน 180 แคลอรี (750 กิโลจูล) โดยมีไขมัน 70%



ภาพที่ 3 เมล็ดมะม่วงหิมพานต์

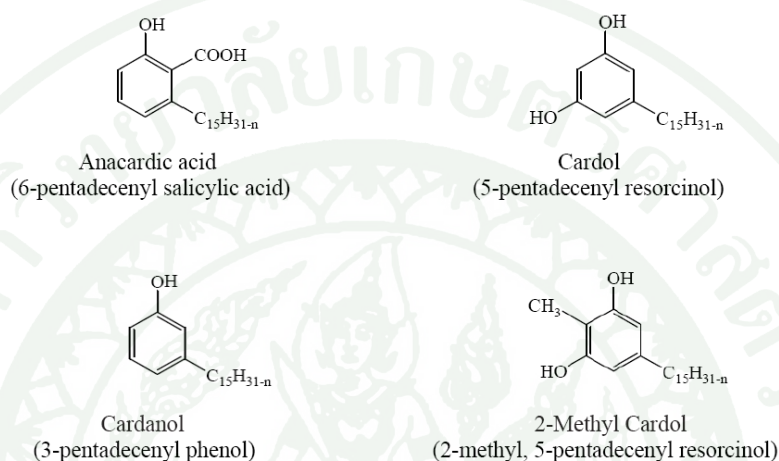
ที่มา: Matoon (2552)

1.1.3 เปลือก

เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ถูกหุ้มด้วยเปลือกสองชั้นคือ เปลือกเมล็ด (Nut shell) และเปลือกชั้นใน (Testa skin) ส่วนเปลือกประกอบด้วยสารจำพวกยางฟีนอลิก (caustic phenolic resin) น้ำมัน urushiol ที่มีพิษที่ระคายเคืองต่อผิวหนังอย่างรุนแรง เช่นเดียวกับที่พบในพืชจำพวกไอวี่พิษ (poison-ivy) ซึ่งบางคนอาจมีอาการแพ้มะม่วงหิมพานต์ แต่ปกติถือว่าก่อให้เกิดอาการแพ้น้อยกว่าผลไม้เปลือกแข็งชนิดอื่นๆ

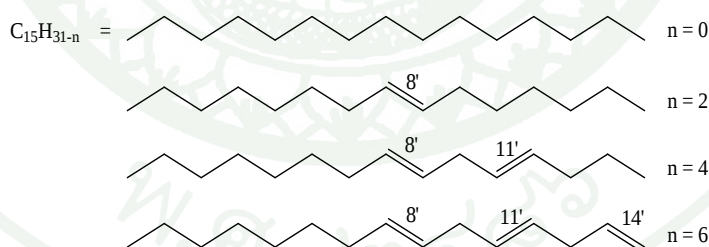
เปลือกของเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สามารถนำมาสกัดให้น้ำมันฟีนอลิกสีน้ำตาลเข้มที่เรียกว่า น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดข้น ไม่ละลายน้ำ และเป็นของผสมระหว่างสารประกอบฟีนอลิกต่างๆ ที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งมีการนำไปใช้งานกันบ้างแล้วในทางอุตสาหกรรมและวิศวกรรม ได้แก่ การใช้ทำสี และวาร์นิช ที่ต้องการความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำวัสดุเชิงประกอบ (composite material) เป็นต้น (Blazdell, 2000)

เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ จะมีปริมาณน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ อยู่ประมาณ 30-40% ของน้ำหนักเมล็ดรวมเปลือก มีองค์ประกอบหลักทางเคมีอยู่ 4 ชนิด ซึ่งแต่ละ องค์ประกอบมีโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอน (C15) ที่แตกต่างกัน 4 แบบต่อกับวงเบนซีนตรง ตำแหน่งเมต้ากับหมู่ไฮดรอกซี (Suresh *et al.*, 1986; Tyman *et al.*, 1989; Paramashivappa *et al.*, 2001) ดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4 องค์ประกอบของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL)

ที่มา: Lubi and Thachil (2000)



ภาพที่ 5 โครงสร้างโซ่ตรงของไฮโดรคาร์บอน (C15) ที่ต่อกับวงเบนซีนตรงตำแหน่งเมต้า

ที่มา: Lubi and Thachil (2000)

กรดอนาคาร์ดิก (Anacardic acid) เป็นสารจำพวกกรดไฮดรอกซิล คาร์บอกซิลิก ที่มีสูตรโมเลกุล $C_{22}H_{32}O_3$ มีหมู่แอลคิล หรือโอลิฟนิค ไฮโดรคาร์บอนตรงตำแหน่งเมต้าของวงเบนซีน เมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนต่ำ กรดอนาคาร์ดิกจะมีปริมาณ 65-70% โดยน้ำหนักของน้ำมัน

เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มีฤทธิ์กัดผิวหนังมีกลิ่นฉุนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการแพทย์ อันได้แก่ การนำไปรักษาโรคเรื้อน โรคผิวหนังบางชนิด และสารต้านทานการก่อเกิดมะเร็ง เนื่องจาก

คาร์ดานอล (Cardanol) เป็นสารฟีนอลิกที่มีหมู่ไฮดรอกซี 1 ตำแหน่ง โดยมีปริมาณ 18% ของน้ำหนักของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนต่ำ แต่เป็นองค์ประกอบหลักเมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนสูง เนื่องจากการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลของกรดอนุคาร์ดิก เป็นปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Mwailambo and Ansell, 2001) คาร์ดานอลสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำมันชักเงา อุตสาหกรรมทาสี และโพลียูรีเทน (Nikorn, 2007)

คาร์ดอล (Cardol) เป็นสารฟีนอลิกที่มีปริมาณ 5% ของน้ำหนักของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนต่ำ สามารถนำมาใช้เป็นสารฆ่า Filarial parasite ในตระกูลของ *Setaria digitala* (Nikorn, 2007)

2-เมทิล คาร์ดอล (2-methyl cardol) เป็นสารฟีนอลิกที่มีปริมาณน้อยมากประมาณ 0.5% ของน้ำหนักของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยพบเมื่อทำการสกัดด้วยความร้อนสูง เนื่องจากมีปริมาณน้อยจึงไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านต่างๆ

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่า โดยธรรมชาติของเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ กรดอนุคาร์ดิกเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุด และถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในทางการแพทย์ โดยเฉพาะการใช้เพื่อรักษาโรคผิวหนัง เป็นสารต้านการเกิดมะเร็ง และสารต้านการเกิดไวรัสตับอักเสบบี อย่างไรก็ตาม กรดอนุคาร์ดิกสามารถสูญเสียหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลได้ง่ายด้วยความร้อน มีผลทำให้กลายเป็นคาร์ดานอล ทำให้การสกัดกรดอนุคาร์ดิกจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ทำได้ยาก โดยน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่สกัดได้ส่วนใหญ่นั้น มักใช้วิธีการสกัดด้วยความร้อน โดยการจุ่มเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ในน้ำมันที่เดือด น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ได้เรียกว่า Technical CNSL ซึ่งจะมีปริมาณกรดอนุคาร์ดิกที่หลงเหลืออยู่น้อยมาก คาร์-ดานอล 60-65% คาร์ดอล 15-20% และสารพอลิเมอร์อื่นๆ 10% โดยน้ำหนักของน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (Gedam and Sampathkumaran, 1986; Lubi and Thachil, 2000)

1.2 การสกัดแยกกรดอนุคาร์ดิก

สารประกอบในน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไม่สามารถทำการแยกโดยการกลั่นลำดับส่วนได้เนื่องจากกรดอนุคาร์ดิก จะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเคชัน (Decarboxylation reaction) และสลายตัวขณะทำการกลั่น การสกัดแยกกรดอนุคาร์ดิกออกจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์สามารถทำได้โดยการแยกโดยคอลัมน์โครมาโตกราฟี (Column chromatography) โดยอาศัยซิลิกาเจลเป็นตัวดูดซับ หรือการใช้การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchanger) ซึ่งมีข้อเสียคือการใช้สารละลาย ซึ่งไม่เหมาะสมกับการประยุกต์ในระดับอุตสาหกรรม (Nikorn, 2007)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้เสนอวิธีการสกัดแยกกรดอนุคาร์ดิก คาร์ดอล และคาร์ดา-นอล ที่อาจนำมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยการเปลี่ยนกรดอนุคาร์ดิกให้อยู่ในรูปของแคลเซียม อะนาคาร์เดต (Calcium anacardate) ที่เป็นของแข็งไม่ละลายน้ำ และสามารถเปลี่ยนรูปกลับเป็น กรดอะนาคาร์ดิกได้ในสารละลายของกรดเกลือเข้มข้น 11 โมลาร์ กับเอทิลอะซิเตท (ethyl acetate) โดยวิธีการนี้ จาก 100 กรัมของน้ำมัน CNSL ที่ได้จากการสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยตัวทำละลาย จะสามารถทำการสกัดแยกได้กรดอนุคาร์ดิก 60 กรัม คาร์ดอล 20 กรัม และคาร์-ดานอล 10 กรัม (Nikorn, 2007)

2. ฟีนอลิก เรซิน (Phenolic resin)

ฟีนอลิก เรซิน เป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซตที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ใช้ประโยชน์กันแพร่หลายทั้งด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรม เช่น การเคลือบผิว (coating), กาว (adhesives), วัสดุประสานสำหรับการขัด (binders for abrasives), ส่วนประกอบรถยนต์และไฟฟ้า (automotive and electrical components), ภาชนะป้องกันไฟฟ้า (electronic packaging) และวัสดุประกอบเชิงซ้อน (matrices for composites) (Martin and Timothy, 2003)

ฟีนอลิก เรซิน ถูกค้นพบครั้งแรกโดยเบเยอร์ (Baeyer) ในปี ค.ศ. 1872 จากการทำปฏิกิริยาของฟีนอลกับอะเซทาลดีไฮด์ (acetaldehyde) โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1891 Kleeberg พบว่า สามารถได้ผลิตภัณฑ์เรซินจากการทำปฏิกิริยาของฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์อีก และในปี ค.ศ. 1909 L. Baekeland เป็นนักเคมีที่สามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์และจำแนกฟี

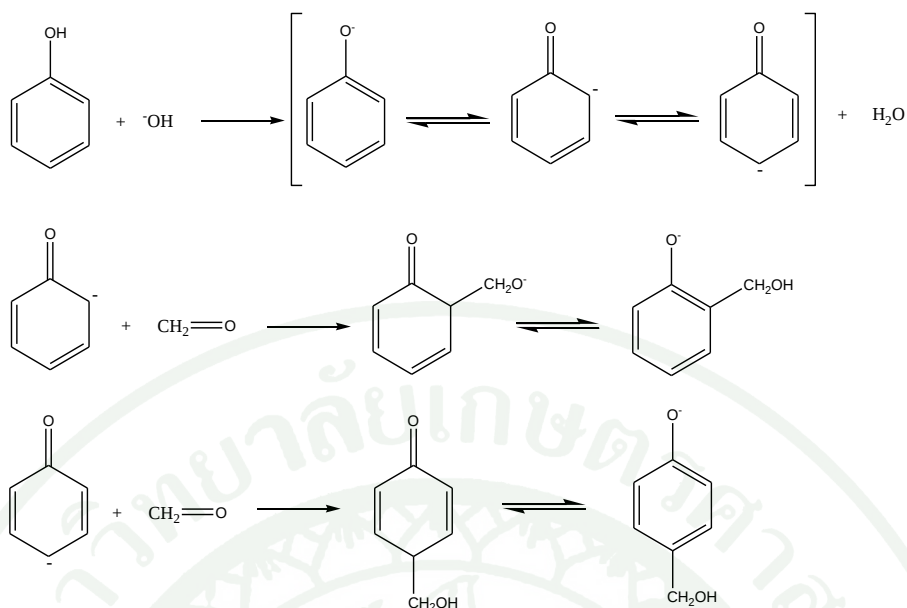
นอลิก เรซิน เป็น 2 ประเภทตามชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา คือ รีโซล เรซิน เมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (หรือ เบคเคิลไลท์ เรซิน) และโนโวแลก เรซิน เมื่อใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพบว่า เมื่อผสมฟีนอล (phenol) กับฟอร์มาลดีไฮด์ (formaldehyde) เข้าด้วยกัน เดิมเบส (ตัวเร่งปฏิกิริยา) จากนั้นให้ความร้อน และกลั่นเอาน้ำออกโดยกระบวนการควบแน่น (condensation) จะได้สารลักษณะเหนียวๆ ที่เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง แล้วจะแข็งตัวเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เป็นวัสดุฉนวนหุ้มสายไฟ ต่อมา พอลิเมอร์ชนิดนี้ถูกเรียกว่า เบคเคิลไลท์ (Bakelite) ตามชื่อของ L. Baekeland หรือ ฟีนอลิก เรซิน (phenolic resin) ตามชื่อของโมโนเมอร์ที่ใช้ (ฟีนอลและฟอร์มาลดีไฮด์)

การค้นพบเบคเคิลไลท์ นับว่าเป็นการบุกเบิกงานวิจัยและพัฒนาทางด้านพอลิเมอร์ที่สำคัญอย่างยิ่ง นำมาสู่การสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดอื่นที่หลากหลายในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา แข็งแรง ทนทาน กันน้ำได้ดี ความโปร่งแสง และสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น (Martin and Timothy, 2003)

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดรีโซล เรซิน มีลักษณะกลไกคล้ายกับ ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน หรือ ฟีนอลิก เรซิน คือ สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้ง 2 ชนิด คือ รีโซล เรซิน (resole resin) และโนโวแลก เรซิน (novolac resin) ขึ้นอยู่กับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราส่วนของฟีนอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์

2.1 ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน ชนิดรีโซล

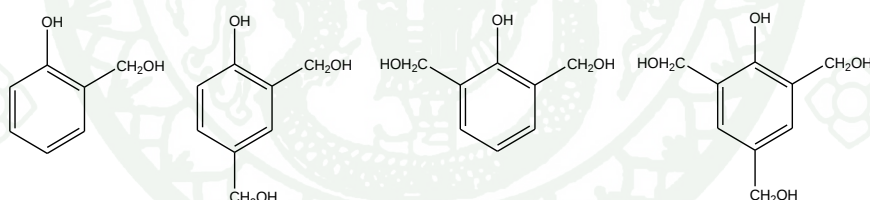
ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน ชนิดรีโซล เป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์เมื่อใช้ฟอร์มาลดีไฮด์มากเกินไป (excess) ภายใต้สภาวะการทดลองเป็นเบส (ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นชนิดเบส) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ สารละลายแอมโมเนีย (NH_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) เป็นต้น ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ที่ตำแหน่งออโธ (Ortho) หรือพารา (Para) ของสารฟีนอล โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นที่เป็นพอลิเมอร์ (prepolymer) ในรูปกลุ่มเมทิลอล ฟังก์ชันนอล (methylol functional groups) ดังภาพที่ 6 (Misra and Pandey, 1985; Martin and Timothy, 2003)



ภาพที่ 6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของรีโซล เรซิน

ที่มา: Martin and Timothy (2003)

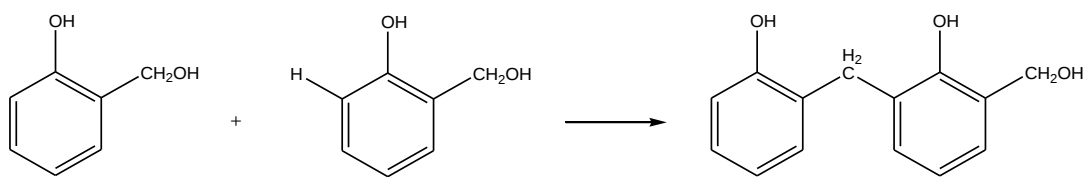
เนื่องจากมีฟอร์มาลดีไฮด์มากเกินไป จึงสามารถเกิดหมู่เมทิลอลได้หลายรูปแบบ ดังนี้



ภาพที่ 7 โครงสร้างของเมทิลอลที่สามารถเกิดขึ้นได้

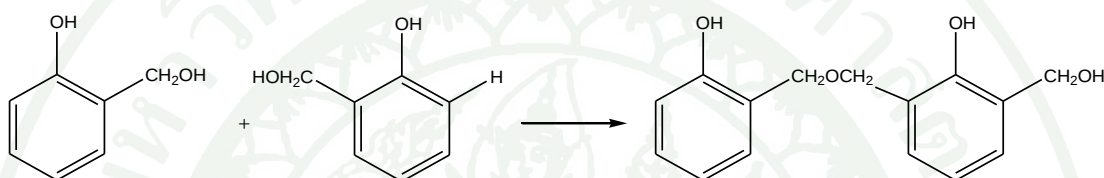
ที่มา: Misra and Pandey (1985)

กลุ่มเมทิลอลนี้จะว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากและสามารถทำปฏิกิริยาได้ 2 ทาง คือ หมู่ไฮดรอกซิลของเมทิลอลเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนของเมทิลอลของอีกโมเลกุลหนึ่งเกิดพันธะเมทิลีน (methylene bridge) ดังภาพที่ 8 และหมู่ไฮดรอกซิลของเมทิลอลเข้าทำปฏิกิริยากันเองเกิดพันธะอีเทอร์ (ether bridge) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 8 พันธะเมทิลีน (methylene bridge)

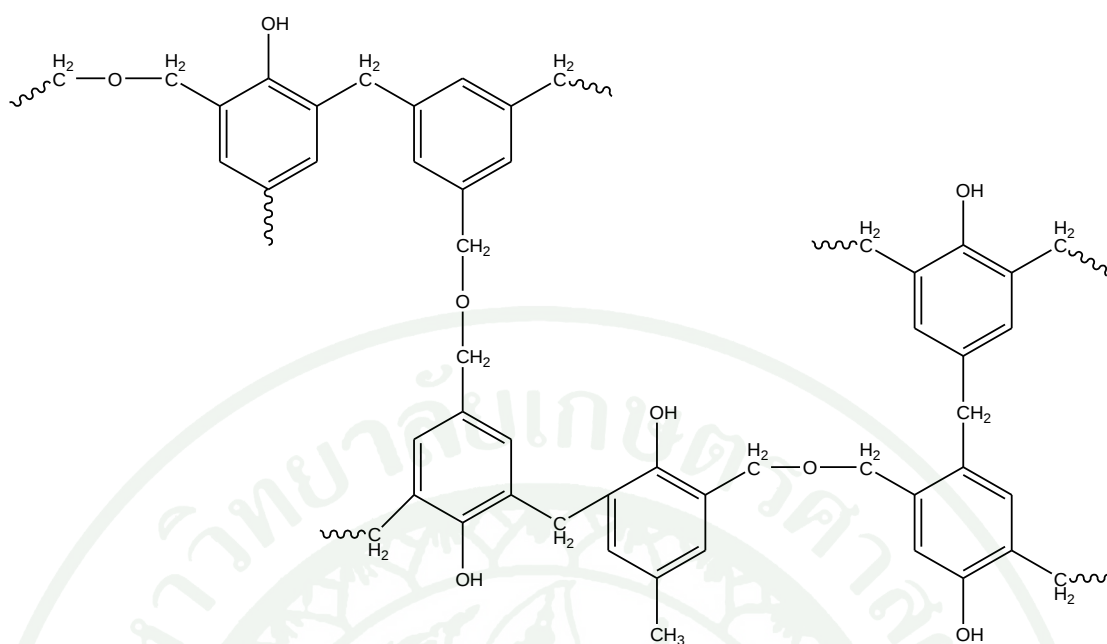
ที่มา: Misra and Pandey (1985)



ภาพที่ 9 พันธะอีเทอร์ (ether bridge)

ที่มา: Misra and Pandey (1985)

เนื่องจากการสังเคราะห์ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินชนิดรีโซลมีหมู่เมทิลอลมากเกินไป เมื่อให้ความร้อนต่อไปจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมรีโซลจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (crosslink) เกิดเป็นพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซต (thermoset) ได้ ดังภาพที่ 10

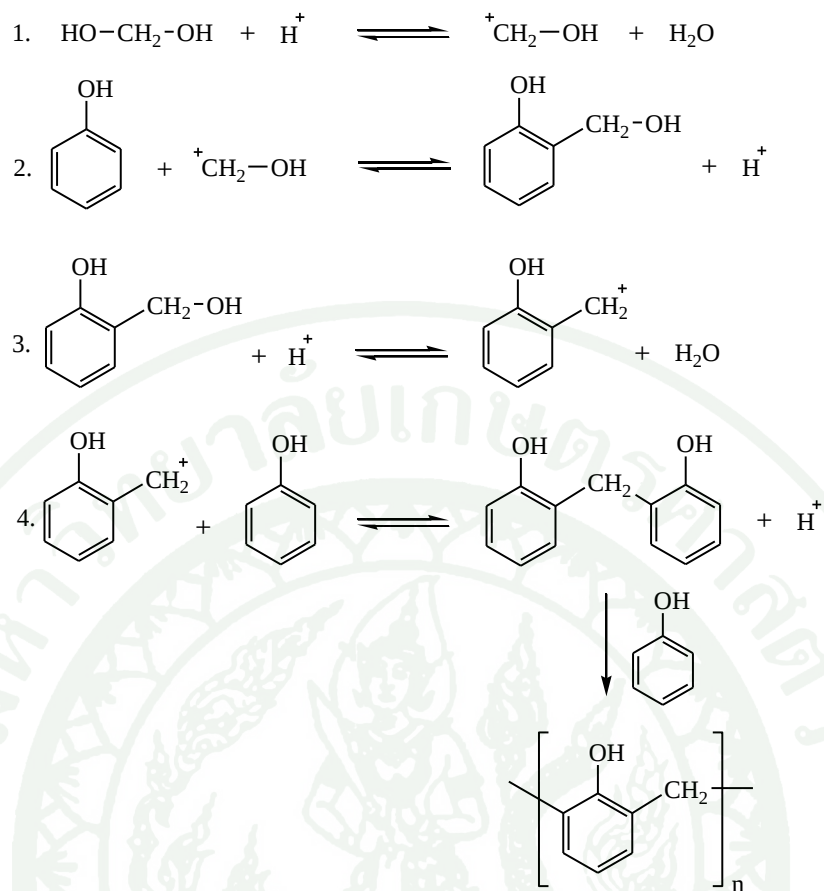


ภาพที่ 10 โครงสร้างเชื่อมขวางที่เกิดในรีโซลเรซิน

ที่มา: Misra and Pandey (1985)

2.2 ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน ชนิดโนโวแลก

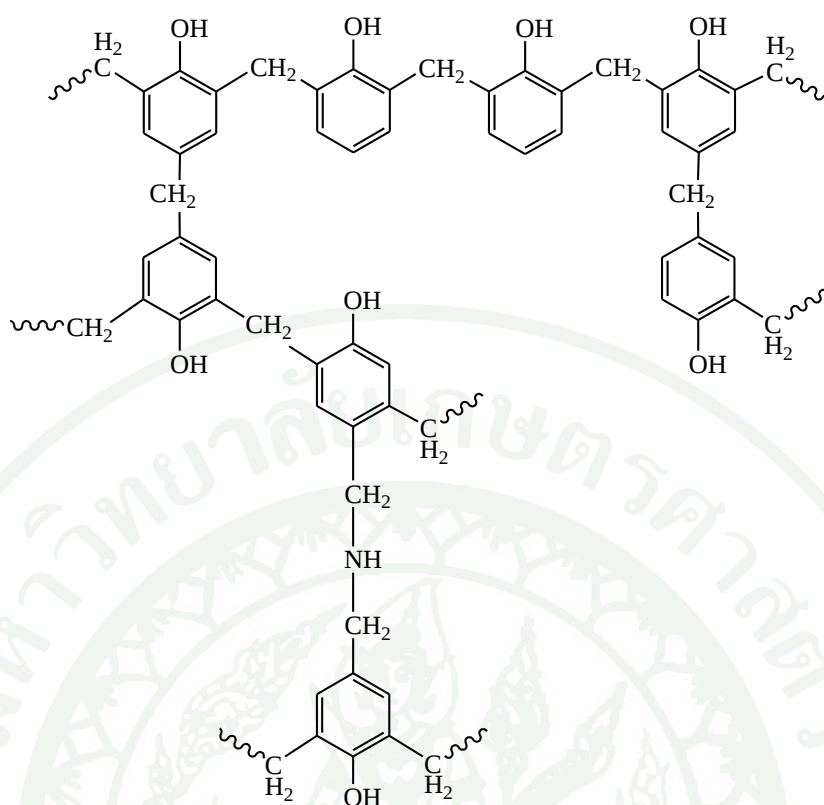
ฟีนอล - ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน ชนิดโนโวแลก เป็นการสังเคราะห์พอลิเมอร์เมื่อใช้ฟีนอลมากเกินไป (excess) ภายใต้สภาวะการทดลองเป็นกรด (ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นชนิดกรด) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) กรดออกซาลิก (oxalic acid) และกรดซักซินิก (succinic acid) เป็นต้น ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ที่ตำแหน่งออร์โธ (ortho) หรือพารา (para) ของสารฟีนอล แต่โนโวแลกใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณน้อย ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดพันธะอีเทอร์จึงมีน้อยมาก มีเพียงพันธะเมทิลีนเท่านั้น โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นที่เป็นพอลิเมอร์ (polymer) ในรูปกลุ่มเมทิลอล ฟังก์ชันนอล (methylol functional groups) ดังภาพที่ 11 (Misra and Pandey, 1985; Martin and Timothy, 2003)



ภาพที่ 11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของโนโวแลก เรซิน

ที่มา: Martin and Timothy (2003)

เนื่องจากฟีนอล – พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ชนิดโนโวแลกมีหมู่เมทิลอยู่ค่อนข้างน้อยมาก ดังนั้นการให้ความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้โนโวแลกเกิดโครงสร้างเชื่อมขวางได้สมบูรณ์ จึงต้องมีการใส่สารบ่ม (curing agent) เพื่อช่วยให้เกิดการเชื่อมขวาง เช่น เฮกซะเมทิลีนเตตระมิน (hexamethylene tetramine, HTMA) ประมาณ 5-15% ลงไป แล้วให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเชื่อมขวาง โดยพันธะที่เกิดขึ้นจะมีทั้งพันธะเมทิลีนและพันธะเบนซิลเอมีน (benzylamine crosslink bridge) ดังภาพที่ 12 (Martin and Timothy, 2003)



ภาพที่ 12 โครงสร้างเชื่อมขวางของโนโวแลก เรซิน

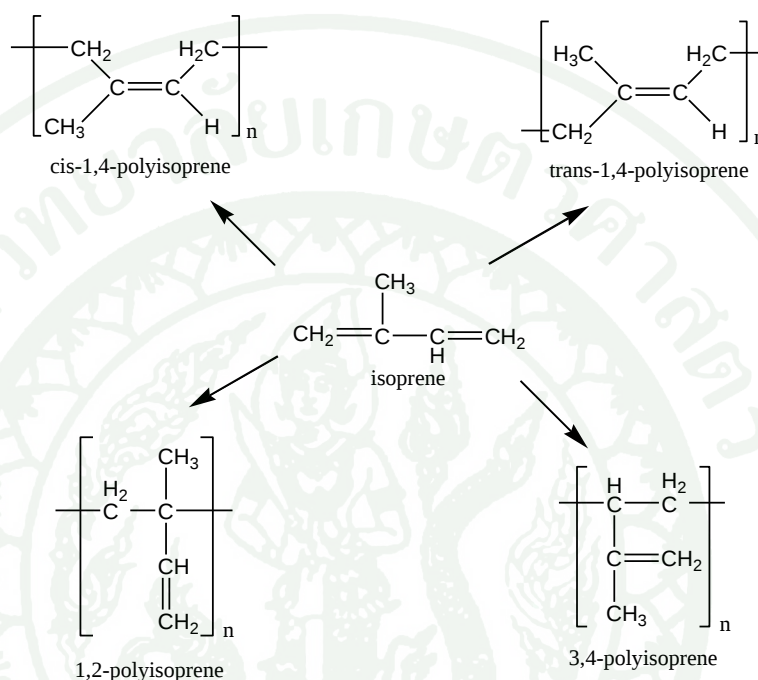
ที่มา: Misra and Pandey (1985)

การประยุกต์ สารประกอบพอลิฟีนอลิกใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับทำอุปกรณ์พวกสายไฟฟ้า สวิตช์ตัวเชื่อมต่อ ระบบบริเรีย โทรศัพท วิศวกรที่สร้างรถยนต์ใช้สารประกอบพีนอลิกทำเพาเวอร์เบรก ส่วนประกอบทรานสมิซชัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารประกอบพอลิฟีนอลิกทำพวกมือจับ ปุ่มต่างๆ และอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากพีนอลิกทนความร้อนสูง ไม่ดูดความชื้น จึงนำมาใช้ทำไม้อัด, ปาร์ติเคิลบอร์ด และยังใช้ทำไบเดอร์ (binder) กับทรายในโรงหล่อด้วย (แม้นและสมชัย, 2549)

3. ยาง (Rubber)

ยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากลาเทก (latex) หรือน้ำยางจากต้นยางพารา มีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยโครงสร้างทางเคมีของยางประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (isoprene) ต่อกันแบบหัวต่อหาง

(head to tail) ได้เป็นพอลิไอโซพรีน (polyisoprene) มีสูตรทางเคมี คือ $-(C_5H_8)_n$ โดย n มีค่าตั้งแต่ 15,000 และสามารถเกิดเป็นไอโซเมอร์ (isomers) ได้ดังภาพที่ 13 โดยส่วนใหญ่ยางธรรมชาติจะเป็น cis-1,4-polyisoprene ผสมกับจำนวนเล็กน้อยของโปรตีน ไขมัน กลีเซอรอล และสารอื่นๆ (มวลโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 5×10^5 กรัม/โมล) (แม้น และสมชัย, 2547; Morton, 1987)



ภาพที่ 13 ไอโซเมอร์ของพอลิไอโซพรีน

ปัจจุบันประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในรูปแบบต่างๆ ทั้งที่เป็นยางดิบแห้ง ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง STR ยางแผ่นผึ่งแห้ง และยางเครพ เป็นต้น รวมทั้งยางเหลว เช่น น้ำยางข้น เป็นต้น ประเทศไทยส่งยางเป็นสินค้าส่งออกไปยัง 66 ประเทศทั่วโลก โดยส่งออกไปยัง ประเทศญี่ปุ่น จีน ประเทศประชาคมยุโรป (EU) สหรัฐอเมริกา มาเลเซีย และเกาหลีใต้ เป็นต้น ยางธรรมชาติที่ส่งออกส่วนใหญ่เป็นยางรมควัน รองลงมาคือ ยางแท่ง และน้ำยางข้น (60% DRC) อุตสาหกรรมหลักที่สำคัญที่สุดของยาง คือ ยางรถยนต์ (มากกว่า 60%) นอกนั้นยังใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมและในครัวเรือน เช่น รองเท้ายาง ท่อยาง ชิ้นส่วนรถยนต์ สายพานลำเลียง ถังมือยาง พื้นพรม ผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ และยางยืด เป็นต้น การที่ยางเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้งานต่างๆ มากมาย เนื่องจากยางมีสมบัติพิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่น คือ มีสภาพอิลาสติก (elasticity) และความยืดหยุ่น (flexibility) สูง นอกจากนี้ ยังมีเนื้อที่บวม สามารถกักน้ำ

และอากาศไม่ให้ซึมผ่านได้ง่าย อีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และคุณค่าที่จะพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง

ยางธรรมชาติเป็นยางซึ่งเหมาะที่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปทั่วไปที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษ เช่น การทนน้ำมัน หรือการทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นหลายชนิด แต่ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปก็ยังคงสูง ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีความทนแรงดึง (tensile strength) ความทนการฉีกขาด (tear strength) และความสามารถในการคืนตัวหรือกระดอน (resilience) สูง และมีสมบัติเหนียวติดกันเอง (tackiness) และความต้านทานการสึกหรอ (abrasion resistance) ดีมาก แต่ด้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี และมีความร้อนสะสมต่ำ เป็นต้น

3.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

1. ความยืดหยุ่น (Elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ กล่าวคือ ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

2. ความเหนียวติดกัน (Tack) ของยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

3. ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยที่ไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมความแข็งแรงเข้าช่วย (ประมาณ 20 MPa หรือสูงกว่านั้น) การเติมสารตัวเติมเสริมความแข็งแรงลงไปจะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งสมบัตินี้จะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมได้นอกจากจะมีการเติมสารเสริมความแข็งแรงเข้าช่วยเท่านั้น

4. ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่

อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมความแข็งแรงลงไปจะช่วยให้มีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น

5. สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี โดยยังมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

6. ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่า ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการขัดถูที่สูงมาก

7. ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} Ohm.cm

8. ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลง ถ้ายางเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงโมเลกุลทางเคมีเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ จะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ดังนั้นยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านั้นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลงด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือ แอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อการกรดหรือด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อการกรดในกรดและกรดกำมะถันเข้มข้น

9. การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซน เพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ และไข (wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

10. การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัตินี้ที่ดีกว่ายางธรรมชาติ เพียง 2 ชนิด คือ ยางบิวตาไดอีน (SBR) และยางซิลิโคน

11. การคืนตัว (Compression set) ยางธรรมชาติมีค่า Compression set ค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามค่า Compression set ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากอาจเกิดการตกผลึกของยาง ทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไปในขณะที่ค่าการคืนตัวที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อให้สมบัติ Compression set ค่อยลง

12. การกระด้างกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมดยกเว้น ยาง BR) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

13. อุณหภูมิของการใช้งาน (Service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 55-70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึก จะทำให้ยางแข็งตัวขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นลง แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะค่อยลง เนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในบางกรณีที่มีการออกสูตรผสมเคมียางได้อย่างเหมาะสม (มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลง) ยางธรรมชาติสามารถนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90°C หรืออาจสูงถึง 180°C (ในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น) (พงษ์ธร, 2547)

3.2 สารเติมแต่งสำหรับยางธรรมชาติ (Additives for rubber)

สารเติมแต่งต่างๆ ที่ใส่เข้าไปในยางจะช่วยทำให้ยางมีสมบัติตามต้องการ ทั้งในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป การวัลคาไนซ์ และการใช้งาน ยางที่ใส่สารเติมแต่งแล้วยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้จนกว่าจะเกิดการวัลคาไนซ์เสียก่อน ยางที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ เรียกว่า ยางดิบ

หรือยางไม่คงรูป (green rubber หรือ uncured rubber) ส่วนยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (vulcanized rubber หรือ cured rubber) ปกตินิยมบอกปริมาณสารเติมแต่งทุกชนิดที่ใส่เข้าไปในยางเทียบกับยาง 100 ส่วน จึงมีหน่วยเป็น phr (parts per hundred of rubber) ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบสูตรยางผสมสารเคมีที่มีปริมาณสารเคมีแตกต่างกันว่า มีผลต่อกระบวนการผลิตและสมบัติของยางอย่างไร การเขียนสูตรส่วนผสมของยางมักเขียนเรียงลำดับสารที่ใส่เข้าไปในยางก่อน-หลัง เพื่อช่วยให้ผู้ผลิตจัดตารางการผสมสารเติมแต่งได้ง่ายขึ้น

สารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปในยางมีหลายประเภท และทำหน้าที่ต่างๆ กัน ได้แก่

1. สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids) เป็นสารเคมีที่ใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อย เพื่อปรับปรุงความสามารถในการผลิตทั้งในขั้นตอนการผสมและการแปรรูป เช่น ในระหว่างการอัดรีด (extrusion) การรีดแผ่น (calendering) หรือการฉีดแบบ (injection molding) โดยจะเป็นส่วนสำคัญในการลดต้นทุนการผลิต การปรับปรุงคุณภาพ และเพิ่มปริมาณการผลิต ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง

2. สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agents) เป็นสารที่มีความสำคัญในกระบวนการวัลคาไนเซชัน ช่วยทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล เพราะถ้าไม่มีการเชื่อมขวางก็จะไม่มีการปรับปรุงทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

3. สารเร่งวัลคาไนซ์ (Accelerators) ใช้ร่วมกับสารวัลคาไนซ์เพื่อลดเวลาของการวัลคาไนซ์หรือการบ่ม (vulcanization time หรือ cured time) โดยเพิ่มอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ ยังอาจช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพบางอย่างของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

4. สารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (Activators) เป็นสารที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารเร่งวัลคาไนซ์ให้ทำหน้าที่ได้ดีขึ้น โดยเข้าทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารเร่งวัลคาไนซ์ ช่วยให้การวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น และยังปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางด้วย

5. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Aging resistors) ได้แก่ สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidants) สารแอนติโอโซนแนนท์ (antiozonant) และสารอื่นๆ ที่ป้องกันยางจากการเสื่อมสภาพขณะใช้งานหรือถูกตั้งทิ้งไว้ โดยมีออกซิเจน โอโซน แสง ความร้อน และอื่นๆ เร่งให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

6. สารตัวเติมหรือฟิลเลอร์ (Fillers) เป็นสารเติมแต่งซึ่งเป็นของแข็งที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความทนต่อแรงดึง) เรียกว่า สารตัวเติมเสริมแรง หรือฟิลเลอร์เสริมแรง (reinforcing fillers) สารที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก และซิลิกา เพราะจะช่วยเสริมแรงให้กับผลิตภัณฑ์ยางได้ แต่ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไปจนเนื้อหรือเมทริกซ์ของยางไม่สามารถยึดสารตัวเติมเข้าด้วยกัน จะทำให้ยางมีความแข็งแรงด่างและเปราะในที่สุดความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์จะเสียไป

7. สารเติมแต่งอื่นๆ (Miscellaneous ingredients) เป็นสารที่มีการใช้งานจำเพาะ ไม่ใช่สารที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ สารหน่วงไฟ (flame retardant), สารขัดถู (abrasive), สารฟู่ (blowing agent), สารสี (colorant) และสารก่อกลิ่น (odorant) เป็นต้น (เพลินพิศ, 2550)

4. การทดสอบคุณสมบัติ

4.1 การหาน้ำหนักโมเลกุลของสารพอลิเมอร์โดยเทคนิคเจลเพอมีเอชัน โครมาโทกราฟี (Gel Permeation Chromatography, GPC)

เทคนิคเจลเพอมีเอชัน โครมาโทกราฟี (Gel permeation chromatography) เป็นวิธีการหาน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสารพอลิเมอร์ได้รวดเร็วที่สุดในปัจจุบัน ค่าที่หาได้นี้สามารถบอกคุณสมบัติของสารพอลิเมอร์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตและการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะมีส่วนผสมของสารที่มีมวลโมเลกุลต่างๆ กัน จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณดัชนีในการบ่งชี้ถึงการกระจายตัวของโมเลกุล (Polydispersity Index, $\bar{M}_w/\bar{M}_n$) ของพอลิเมอร์ และเป็นเทอมที่ใช้ในการหาค่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุลว่ามีมากน้อยเพียงใด กล่าวคือ พอลิเมอร์มีค่าการกระจายของมวลโมเลกุลมากกว่า 1 จะเป็น polydisperse แต่ถ้าค่าการกระจายตัวของโมเลกุลของพอลิเมอร์มีค่าเท่ากับ 1 หรือเกือบจะเท่ากัน พอลิเมอร์นั้นเป็น Monodisperse ซึ่งได้แก่ พวกชีวแมคโครโมเลกุล เช่น เอนไซม์ โปรตีน เป็นต้น

ค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ย หรือน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่สำคัญ คือ

$\bar{M}_w$ คือ Weight-average molecular weight

$\bar{M}_n$ คือ Number-average molecular weight

$\bar{M}_w$ เป็นค่าที่นิยมใช้ และมีประโยชน์มากกว่า $\bar{M}_n$ เพราะสามารถจะบอกสมบัติที่สำคัญหลายอย่างของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติ Melt Viscosity และคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ได้ดี โดยสิ่งที่สำคัญคือ การศึกษาถึงการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลที่สำคัญของพอลิเมอร์ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีประโยชน์ในกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพ นอกจากนี้ยังมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอื่นๆ อีก 2 แบบ ซึ่งจะใช้อธิบายถึงสมบัติของสารพอลิเมอร์ คือ

$\bar{M}_z$ คือ Z-average molecular weight

$\bar{M}_v$ คือ Viscosity-average molecular weight

$\bar{M}_z$ และ $\bar{M}_v$ เป็นการวัดมวลโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ กรณีที่มีโมเลกุลมีขนาดใหญ่ หรือมวลโมเลกุลเฉลี่ยมาก โดย $\bar{M}_z$ เป็นการวัดในรูปแบบของสารละลายเจือจางที่ถูกเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบต่ำ สมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ ทำให้การกระจายตัวของโมเลกุลมีการกระจายตัวตามขนาดของโมเลกุล ส่วน $\bar{M}_v$ เป็นการวัดมวลโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์ กรณีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โมเลกุลมีการเชื่อมโยงกันมาก และมีความหนืดสูง พอลิเมอร์จะอยู่ในรูปแบบของสารละลายเจือจางไหลผ่านท่อแคพิลลารี เพื่อวัดค่าความต้านทานจากแรงเสียดทาน (frictional resistance) ของสารละลายเจือจางของพอลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลแตกต่างกัน

อัตราส่วนของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมีประโยชน์ในการบอกค่าการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล สารพอลิเมอร์จำพวก Monodisperse โดยน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยจะเกือบหรือเท่ากับ คือ $\bar{M}_w/\bar{M}_n = 1$

เทคนิคเจลเพอมีเอชัน โครมาโทกราฟี เป็นรูปแบบหนึ่งของโครมาโทกราฟีแบบของเหลว โมเลกุลของสารจะถูกแยกออกตามขนาดของโมเลกุล พอลิเมอร์จะละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม ตัวทำละลายที่ละลายพอลิเมอร์จะเป็นตัวทำละลายชนิดเดียวกันกับที่ใช้ชะล้างไหลผ่านในคอลัมน์ เมื่อนิยดสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นประมาณ 0.1-2% โดยน้ำหนัก เข้าไปในระบบเครื่อง ตัวทำละลายซึ่งไหลผ่านในระบบจะพาพอลิเมอร์ที่ฉีดเข้าไปให้ไหลผ่านเข้าคอลัมน์ ซึ่งภายในบรรจุด้วยอนุภาคเจลที่มีรูพรุนขนาดไมโครเมตร สารที่มีโมเลกุลเล็กจะไหลเข้าไปในรูพรุน(pore) ของเจลซึ่งจะใช้เวลามากกว่าในการที่ตัวทำละลายจะชะล้างออกจากรูพรุนของเจล ส่วนโมเลกุลใหญ่จะไหลออกจากคอลัมน์ได้เร็วกว่า เนื่องจากขนาดของโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนของเจล จนไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของเจลได้ จึงไหลออกจากคอลัมน์ได้เร็วกว่า เวลาหรือ

ปริมาตรของตัวทำละลายที่ใช้ในการชะล้างเป็นปฏิภาคกลับกับขนาดของโมเลกุล (Molecular size) ถ้าขนาดของรูพรุนเล็กเกินไปจะไม่มีโมเลกุลไหนหลุดเข้าไปได้ก็จะแยกขนาดของโมเลกุลไม่ได้ ขณะเดียวกันถ้ารูพรุนขนาดใหญ่เกินไป โมเลกุลทุกโมเลกุลจะเข้าไปในรูพรุนได้ จะทำให้แยกโมเลกุลได้ไม่ดี หรืออาจจะไม่ได้เลย เพราะฉะนั้นการเลือกขนาดสารที่จะบรรจุในคอลัมน์เพื่อให้มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมกับขนาดโมเลกุลจึงเป็นเรื่องสำคัญมาก

ส่วนประกอบของเครื่องเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี

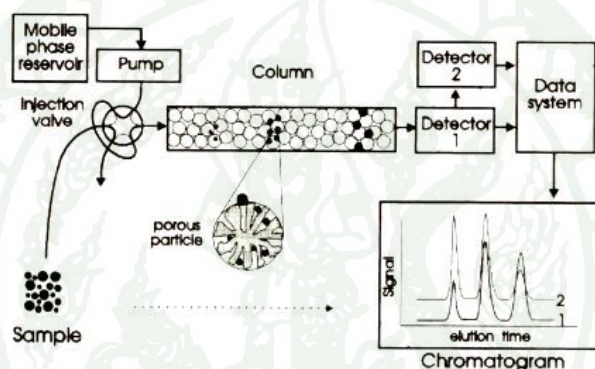
1. ระบบการส่งผ่านของตัวทำละลาย (Solvent delivery system) เป็นการกำหนดการไหลของตัวทำละลายผ่านเข้าคอลัมน์และอุปกรณ์ตรวจวัด (Detector)

2. คอลัมน์ (Column) ซึ่งประกอบด้วยเจลที่มีรูพรุนขนาดไมโครเมตรที่มีขนาดเหมาะสมกับช่วงน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์ จะถูกบรรจุด้วยเจลที่มีการเชื่อมโยงโมเลกุลของสไตรีน ไดไวนิลเบนซีนที่มีรูพรุนขนาดไมโครเมตรหรือแก้วที่มีรูพรุน (porous glasses) หรือซิลิกา ส่วนตัวบรรจุที่เป็นสารอินทรีย์เหมาะสำหรับสารที่ละลายในน้ำและสารละลายพวกอินทรีย์ไม่มีขั้ว เช่น โทลูอีน เตระไฮโดรฟีน เป็นต้น การใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิปกติ จะช่วยให้การแยกสารเกิดได้เร็วขึ้น สำหรับสารพวกพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi crystalline polymer) เช่น พอลิเอททิลีน (PE) และพอลิโพรพิลีน (PP) ในการแยกสารต้องใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 130°C โดยรูพรุนของคอลัมน์ GPC จะมีขนาด $0.5-10^5$ นาโนเมตร สามารถแยกโมเลกุลขนาดน้อยกว่า 100 ถึง 4×10^7 นาโนเมตรได้ ส่วนคอลัมน์ทั่วไปจะมีความยาวประมาณ 30-60 เซนติเมตรและมีเส้นผ่าศูนย์กลางของคอลัมน์ 7.5 มิลลิเมตร ทำด้วยสแตนเลสเนื่องจากเป็นพวกไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (nonreactive)

3. การฉีดสารละลายเข้าระบบ (Injection system) เมื่อทำการฉีดสารละลายพอลิเมอร์เข้าระบบจะสามารถนำสารเข้าสู่ระบบด้วยปริมาตรที่แน่นอน โดยไม่รบกวนการไหลของสารละลายในระบบ

4. ระบบตรวจวัดสัญญาณ (Detector system) เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังตัวบันทึก (recorder) ซึ่งตัวส่งสัญญาณโดยปกติทั่วไปจะใช้ Differential refractometer ซึ่งจะวัดค่า Refractive index โดยค่านี้จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ นอกจากนั้นยังมีตัวดีเทคเตอร์ตัวอื่นๆ เช่น Ultraviolet/Visible absorption instrument และ Viscosity Detector เป็นต้น

5. ตัวบันทึก (Recorder) จะส่งสัญญาณเข้าคอมพิวเตอร์ โดยค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ย ($\bar{M}_n, \bar{M}_w, \bar{M}_v$) คำนวณจากกราฟ GPC ของสารมาตรฐาน และทำ Calibration curve เพื่อให้ได้ค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงมากที่สุด เมื่อทำการฉีดสารละลายพอลิเมอร์จนได้ GPC Curve ออกมาเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณผลออกมาเป็นค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ย ($\bar{M}_n, \bar{M}_w, \bar{M}_v$) ความสามารถของ GPC ในการแยกสารโมเลกุลใหญ่ออกจากสารโมเลกุลเล็กมีประโยชน์มากในการควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรมการผลิตเม็ดพลาสติก หรือพอลิเมอร์ เนื่องจาก GPC สามารถบอกค่าการกระจายตัวของโมเลกุล เพื่อกำหนดขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์ พร้อมทั้งยังบอกถึงคุณสมบัติทางฟิสิกส์และคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์นั้นได้ ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ (จินตนา, 2539)



ภาพที่ 14 แผนผังแสดงกระบวนการทำงานของเครื่อง Gel Permeation Chromatograph (GPC)

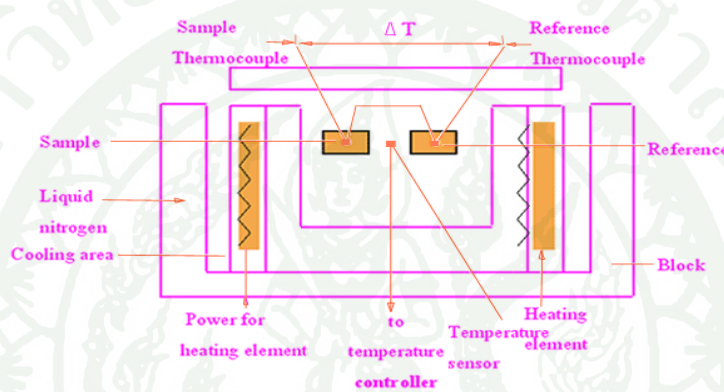
ที่มา: Peter (2007)

4.2 Differential Scanning Calorimetry (DSC) & Differential Thermal Analysis (DTA)

DSC และ DTA เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีภายใต้โปรแกรมการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ และยังสามารถศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนเฟสของวัสดุภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลาได้อีกด้วย

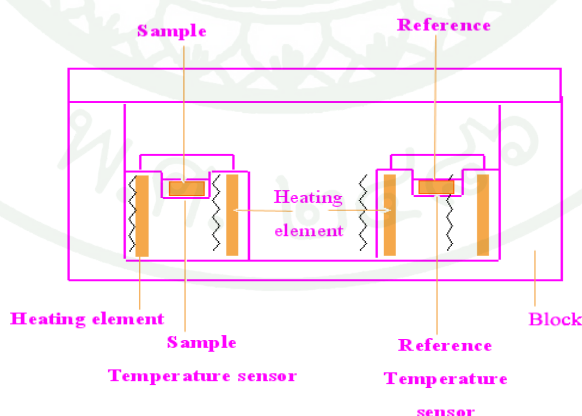
DTA และ DSC มีหลักการทำงานเหมือนกัน คือ สารตัวอย่าง และสารอ้างอิงที่เชื่อมต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่บรรจุในถ้วยอะลูมิเนียมขนาดเล็ก (ทองแดง หรือ แกรไฟต์ใช้สำหรับการ

วิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C) จะถูกให้ความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในตัวอย่างจะถูกตรวจวัด และแปรผลตามขนาดของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์อยู่ในช่วง 0.5-1.0 mg ถึงแม้ว่าทั้งสองเทคนิคนี้ให้ข้อมูลที่คล้ายกัน แต่มีข้อแตกต่างที่สำคัญ คือ เทคนิค DTA สารตัวอย่างและสารอ้างอิงจะถูกให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานที่เดียวกัน (ดังภาพที่ 15) และความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่างสารตัวอย่างและสารอ้างอิงจะถูกบันทึก สำหรับเทคนิค DSC สารตัวอย่าง และสารอ้างอิงจะถูกให้ความร้อนจากแหล่งพลังงานสองแหล่งที่แยกกัน (ดังภาพที่ 16) ค่าพลังงานความร้อน ($d\Delta Q/dt$) ที่ใช้ในการรักษาอุณหภูมิของตัวอย่าง และ สารอ้างอิงให้เท่ากันจะถูกบันทึกไว้



ภาพที่ 15 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง DTA

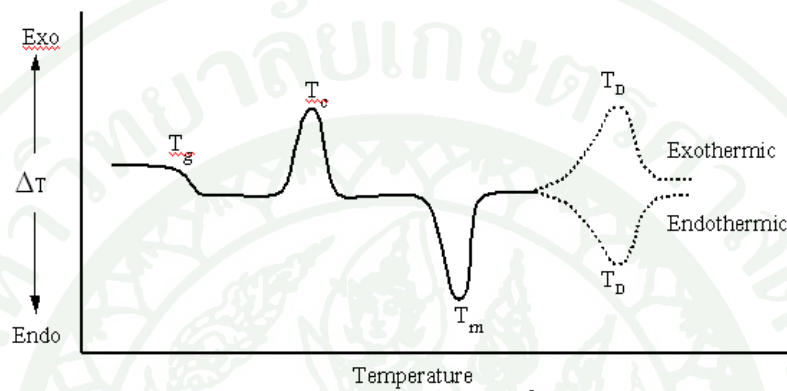
ที่มา: Fifield and Kealey (1995)



ภาพที่ 16 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง DSC

ที่มา: Fifield and Kealey (1995)

จากข้อมูลที่ถูกนำมาพลอตกราฟกับอุณหภูมิ คือ ΔT (สำหรับ DTA) หรือ dQ/dt (สำหรับ DSC) กราฟที่ได้เรียกว่า เทอร์โมแกรม (Thermogram) ข้อดีของเทคนิค DSC คือ พื้นที่ใต้พีคจะสัมพันธ์โดยตรงกับเอนทัลปี (Enthalpy) หรือการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความจุความร้อน ความร้อนของการหลอมเหลว หรือ เอนทัลปีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ตัวอย่างของเทอร์โมแกรมที่ได้จาก DSC แสดงดังภาพที่ 17 (Fifield and Kealey, 1995)



ภาพที่ 17 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC

ที่มา: Fifield and Kealey (1995)

ตัวอย่างงานที่ทดสอบ ได้แก่

1. วิเคราะห์อุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุ (Melting temperature หรือ T_m)
2. วิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว (Heat of fusion)
3. วิเคราะห์ปริมาณผลึกของวัสดุโพลีเมอร์ (%Crystallinity)
4. วิเคราะห์อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของวัสดุ (Glass transition temperature, T_g)
5. วิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึกของวัสดุ (Crystallization temperature, T_c)
6. วิเคราะห์ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific heat capacity หรือ C_p)
7. วิเคราะห์ค่า Oxidative Induction Time ของวัสดุ (Oxidative Induction Time, OIT)
8. วิเคราะห์ค่าความบริสุทธิ์ (Purity) ของสาร
9. ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (crosslink) ของวัสดุประเภทเทอร์โมเซตติง
10. ศึกษาและทำนายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประเภทเทอร์โมเซตติง

4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical tests)

คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ก็คือ พฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุที่สามารถแสดงออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำ ได้แก่

4.3.1 ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

ความทนต่อแรงดึงของโพลิเมอร์ สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก โดยอาศัย 2 เทอมที่สัมพันธ์กัน คือ ความเค้น (stress : σ) และความเครียด (strain : ϵ)

ความเค้น คือ แรงที่ใช้ในการดึงหรือยืดตัวอย่าง ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด เป็นลักษณะของแรงต้านที่อยู่ภายในของโลหะ ที่มีความพยายามในการต้านทานต่อแรงภายนอก ที่มากระทำต่อวัสดุนั้นๆ

$$\text{ความเค้น} = \frac{\text{แรง (F)}}{\text{พื้นที่หน้าตัด (A)}} \quad (1)$$

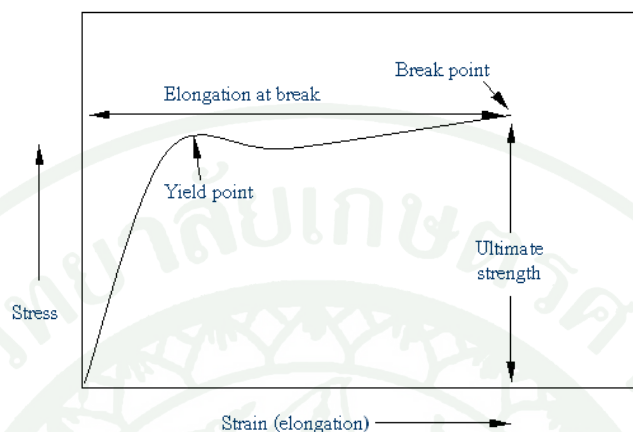
ความเครียด (ϵ) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้น เช่น เกิดการยืดตัวออก (Elongation) หรือหดตัวเข้า (Contraction)

$$\text{ความเครียด} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป } (\Delta L)}{\text{ความยาวเดิม (L)}} \quad (2)$$

$$\text{โมดูลัส (Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น } (\sigma)}{\text{ความเครียด } (\epsilon)} \quad (3)$$

เนื่องจากพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุเป็นลักษณะที่ขึ้นกับเวลา อัตราเร็วที่ความเค้นหรือแรงถูกให้กับตัวอย่างจึงมีผลต่อการยืดของตัวอย่าง หรือความเครียดเป็นอย่างมาก ในการทดสอบความเค้นและความเครียดของโพลิเมอร์ ปลายของตัวอย่างถูกยึดด้วยที่จับ และจะถูกดึงให้ยืดออกด้วยแรงที่รู้ขนาดแน่นอน จากนั้นจึงนำข้อมูลไปพลอตกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain curve) นอกจากความเค้นและความเครียดแล้วยังมีเทอมที่แสดงสมบัติเชิงกลประเภทอื่นของโพลิเมอร์อีก เช่น โมดูลัส (modulus) หรือความแข็ง (stiffness)

ซึ่งแสดงโดยค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียด (หรือความชันในช่วงแรกของเส้นกราฟ) และความเหนียว (toughness) ซึ่งแสดงถึงความต้านทานต่อการยืดจนขาด ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

ที่มา: เพลินพิศ (2550)

4.3.2 ความแข็ง (Hardness test)

การหาค่าความแข็งของยางที่วัลคาไนซ์แล้วด้วย ASTM D1415 ปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่นิยมใช้ International Hardness Scale มีหน่วยเป็น International Rubber Hardness Degree (IRHD) โดยวัดความลึกของหัวเข็มที่กดลงบนชิ้นงานภายใต้น้ำหนักคงที่ ความลึกที่วัดได้จะถูกเปลี่ยนเป็นความแข็งโดยความลึกจะแปรผกผันกับความแข็ง สเกลเริ่มจาก 0 (Infinity soft) จนถึง 100 (Infinity hard) ซึ่งความแข็งปกติอยู่ในช่วง 30-85 IRHD หัวเข็มซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มม. ภายใต้แรงอัด 7.5 นิวตัน จะเป็นการทดสอบกับชิ้นทดสอบที่มีความหนาน้อย 4 มม. และอาจใช้การทดสอบระดับไมโครเมตรที่มีหัวเข็มมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.395 มม. ด้วยแรงกดเพียง 153mN กับชิ้นงานบางๆ

ยางที่มีความแข็งต่ำหรือสูงกว่าปกติ จะใช้มาตรฐานการทดสอบที่แตกต่างกัน คือ ใช้ ISO 1818 หรือ ISO 1400 ตามลำดับ สำหรับยางที่มีความแข็งต่ำ (10-35 IRHD) จะใช้หัวเข็มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็น 5 มม. แต่ยางที่มีความแข็งมาก (85-100 IRHD) หัวเข็มจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลดลงเหลือ 1 มม.

ผลการทดสอบโดยวิธีการกดนี้จะขึ้นกับความหนาของชิ้นทดสอบ ยกเว้นชิ้นทดสอบมีความหนามากกว่าความลึกของรอยกดมาก ดังนั้นจึงควรใช้ความหนาตามที่มีมาตรฐานกำหนดไว้ และบอกความหนาของชิ้นทดสอบไว้ในรายงานด้วย โดยเครื่องวัดความแข็งอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากคือ Shore durometer แสดงดังภาพที่ 19



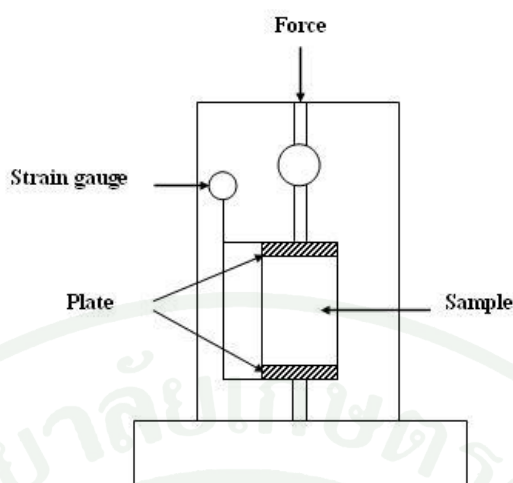
ภาพที่ 19 แสดงเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness meter)

ที่มา: Scilution (2008)

สเกลที่ใช้บอกความแข็ง เรียกว่า Shore Scales ซึ่งมีอยู่ 2 สเกลในการใช้วัดความแข็งของยางและพลาสติก shore A ใช้บอกค่าความแข็งของยางที่ไม่แข็งมากนัก (ซึ่งตรงกับสเกลของ IRHD ที่มีค่าความแข็งปกติ) และ shore D ใช้บอกค่าความแข็งของวัสดุที่มีความแข็งมาก เช่น พลาสติกแข็ง หรือยางแข็ง (มากกว่า 90 IRHD)

4.3.3 การยุบตัวถาวร (Compression set)

การทดสอบการยุบตัวถาวรของยาง หมายถึง การคืนตัว (Recoverability) ของยางหลังจากที่ได้เอาแรงกดออกแล้วหลังการทดสอบ การทดสอบการคืนตัวมีไว้เพื่อวัดความสามารถของผลิตภัณฑ์ยางที่จะรักษาสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้ระยะเวลาคนานๆ การทดสอบโดยทั่วไปมักจะกระทำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง และทำการกดยางลงไปในระยะ 25% ของความหนาเดิม โดยระยะเวลาทดสอบอาจเป็น 1 วัน จนถึง 7 วัน เป็นต้น ถ้ายางเกิดการคืนตัวมาก แสดงว่าค่าการทดสอบการคืนตัวของยาง (Compression test) จะมีค่าน้อย นั่นคือ ยางมีสภาพอีลาสติกสูง สามารถคืนตัวหลังการปล่อยแรงกระทำจากภายนอก (เพลินพิศ, 2550.)



ภาพที่ 20 การทดสอบการคั่นตัวของยาง (Compression test)

ที่มา: Mohamed (2007)

4.3.4 การทดสอบสมบัติการคงรูป (Curing time)

การทดสอบสมบัติการคงรูป (สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2544) กำหนดวิธีวัดสมบัติการคงรูปของยางโดยใช้เครื่องมือทดสอบหาเวลาและลักษณะการคงรูป (rheometer) ตัวอย่างที่ทดสอบเป็นยางผสมสารเคมี ซึ่งมีการผสมได้ 2 แบบ คือ สูตร ACS#1 ใช้สำหรับยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม หรือผสมสารตัวเติมชนิดที่ไม่ใช่เขม่าดำ และสูตร ACS#2 ใช้สำหรับยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม

ตารางที่ 1 สูตรยางผสมเคมีเพื่อการทดสอบสมบัติการคงรูป

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (ส่วนโดยน้ำหนัก)	
	สูตร ACS#1	สูตร ACS#2
ยางธรรมชาติ	100.00	100.00
ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)	6.00	5.00
กำมะถัน (sulphur)	3.50	2.25
กรดสเตียริก (stearic acid)	0.50	2.00
เขม่าดำ เอชเอเอฟ (carbon black HAF)	-	35.00
เอ็มบีที (MBT)	0.5	-
ทีบีบีเอส (TBBS)	-	0.70
รวม	110.50	144.95

หมายเหตุ MBT คือ 2-mercaptobenzthiazole
TBBS คือ N-tert-butyl-2-benzthiazylsulphenamide

ที่มา: การทดสอบตามมาตรฐานยางแท่งเอสทีอาร์, สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสกัด CNSL ได้มีการศึกษาโดย Gedam และ Sampathkumaran (1986) ได้เสนอผลการสกัดสารจาก CNSL ที่ได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ สิ่งที่ได้พบจากการสกัดคือ กรดอนาคาร์ดิก คาร์ดานอล คาร์ดอล และ 2-เมทิลคาร์ดอล กรดอนาคาร์ดิกมีสัดส่วนมากที่สุดโดยมีสัดส่วนประมาณ 90% รองลงมาคือ คาร์ดานอล ส่วนคาร์ดอล และ 2-เมทิลคาร์ดอล มีอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก สำหรับกรดอนาคาร์ดิกมีสัดส่วนโครงสร้างที่ต่างจากหมู่อัลคิลมาเกาะสูตรโครงสร้างของหมู่อัลคิลมาที่เกาะคือ $C_{15}H_{31-n}$ โดยที่ n มีค่าเท่ากับ 0, 2, 4, 6 ตามลำดับ หลังจากนั้นมีการศึกษาวิธีการสกัด CNSL ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น

การสกัดด้วยการบีบอัดโดยใช้เครื่องมือ ซึ่งสามารถบีบสกัดน้ำมัน CNSL ออกจากเปลือกได้ประมาณ 12-15% ของน้ำหนักเมล็ดรวมเปลือก วิธีการสกัดเป็นวิธีการที่ได้น้ำมัน CNSL มากที่สุด

การสกัดด้วยความร้อน โดยการใช้ไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 270°C นาน 90 นาที หรือการนำเปลือกเมล็ดลงไปจุ่มน้ำมัน CNSL ที่เดือด 180-190°C เป็นเวลานาน 90 นาที ซึ่งวิธีการทั้งสองนี้จะสามารถสกัดน้ำมัน CNSL ได้ประมาณ 7-12% ของน้ำหนักเมล็ดรวมเปลือก แต่ทำให้มีการสลายตัวของกรดอนุคาร์ดิก

สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤติ วิธีนี้จะได้น้ำมัน CNSL ประมาณ 10-15% ทำให้มีความบริสุทธิ์สูง แต่มีค่าใช้จ่ายสูงในการสกัด

การสกัดด้วยตัวทำละลาย วิธีนี้อาศัยตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว มาสกัดน้ำมัน CNSL ออกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยส่วนใหญ่นิยมใช้เฮกเซน วิธีนี้สามารถสกัด CNSL ได้ 25-40%

สกัดด้วยวิธี Vacuum Pyrolysis วิธีนี้มีข้อเสียคือเกิดการสลายตัวของกรดอนุคาร์ดิกและมี การเกิด Polymerization ในองค์ประกอบของน้ำมัน CNSL ได้ง่าย

จากวิธีการข้างต้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้การสกัดน้ำมัน CNSL ด้วยการใช้ตัวทำละลาย เนื่องจากในงานวิจัยนี้ต้องการนำกรดอนุคาร์ดิกมาเป็นมอนอเมอร์ ดังนั้นจึงเลือกวิธีการสกัดที่ไม่ทำให้กรดอนุคาร์ดิกเกิดการสลายตัว และเป็นวิธีการสกัดที่ได้น้ำมัน CNSL ปริมาณมากที่สุดโดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว

วิธีการสกัดแยกกรดอนุคาร์ดิกจากน้ำมัน CNSL มีหลายวิธี เช่น การแยกสารโดยใช้ตัวทำละลายที่เป็นเอทานอล งานวิจัย Paramashivappa (2001) ได้เสนอวิธีการสกัดแยกกรดอนุคาร์ดิก คาคอล และคาคานอล ที่อาจนำมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมโดยการเปลี่ยนกรดอนุคาร์ดิกให้อยู่ในรูปของแคลเซียมอนุคาร์เตต (Calcium Anacardate) ที่เป็นของแข็งไม่ละลายน้ำ และสามารถเปลี่ยนรูปกลับเป็นกรดอนุคาร์ดิกได้ในสารละลายของกรดเกลือเข้มข้น 11 M กับเอทิลอะซิเตต (Ethyl Acetate) โดยวิธีการนี้ จาก 100 กรัมของน้ำมัน CNSL ที่ได้จากการสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยตัวทำละลาย จะสามารถทำการสกัดแยกได้ กรดอนุคาร์ดิก 60 กรัม คาคอล 20 กรัมและคาคานอล 10 กรัม

ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้การแยกสารโดยใช้ตัวทำละลายที่เป็นเอทานอล เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายไม่มากและให้ปริมาณกรดอนุคาร์ดิกมาก ซึ่งการสกัดเหมาะที่จะนำไปใช้ในระดับ

อุตสาหกรรม พร้อมทั้งมีการศึกษาโครงสร้างทางเคมี และคุณสมบัติทางด้านการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานทางอุตสาหกรรม โดยมีรายละเอียดงานวิจัยที่ผ่านมานี้

Ansell and Bisanda (1992) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของสารประกอบเชิงซ้อนของ sisal-CNSL พบว่า CNSL เป็นแหล่งมอนอเมอร์ตามธรรมชาติในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน เมื่อทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะผลิตเรซินแบบเทอร์โมเซตที่มีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า 200°C และมีค่า T_g เท่ากับ 70.95°C จากนั้นทำการผสมกับ sisal fiber จะได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีราคาถูกลงและสามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย โดยมีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า 230°C ค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ 24.5 MPa ค่ายัง มอดุลัสเท่ากับ 8.8 GPa และมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการโค้งงอ (bending stress = 13.9 MPa) ที่สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผนังหลังคาได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์ DMA โดยการประเมินค่าผลกระทบจากการจำลองแสงอาทิตย์บนสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา พบว่า เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลานาน จะมีการเสื่อมสภาพทางความร้อนลงเล็กน้อย

Sathiyalekshmi (1993) ได้ทำการศึกษาวิจัยโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และเชิงกล ของ CNSL โนโวแลก เรซิน โดยใช้กรดซัลฟอนิกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ 2 อัตราส่วนโดยโมลของคาร์ดานอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ คือ 1:0.6 และ 1:0.8 ตามลำดับ โดยใช้ 1% กรดซัลฟอนิกของน้ำหนักคาร์ดานอล จากการทดลองพบว่า คาร์ดานอล ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วน 1:0.8 จะมีลักษณะการแข็งตัว รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันที่ดี ซึ่งการเชื่อมโยงจะเกิดขึ้นในตำแหน่งออโร-ออโร และออโร-พาราของคาร์ดานอลแต่ละโมเลกุล เมื่อทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค IR สเปกตรัมพบว่า เรซินที่ได้จะเกิดการเชื่อมต่อโมเลกุลในตำแหน่งออโร-ออโรสูง จากนั้นนำเรซินที่สังเคราะห์ได้มาขึ้นรูปกับ glass fabric laminate ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลได้ค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ $14.65 \pm 2.85\text{ KN/cm}^2$ และค่าความยืดหยุ่น $3.8 \pm 0.8\%$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เรซินที่ได้จะทำให้ค่าความแข็งแรงของสารประกอบเชิงซ้อนมีค่าต่ำลง แต่ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact resistance) มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟีนอลิก เรซิน มีเสถียรภาพทางความร้อน และสามารถป้องกันน้ำได้ดี

Menon *et al.* (2002) ได้นำ CNSL และ CNSL-formaldehyde resin (CNSLF) มาผสมกับยางธรรมชาติในปริมาณ 5-15 phr เพื่อศึกษาความสามารถในการแปรรูป และสมบัติทางกายภาพหรือสมบัติเชิงกลของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว จากการทดลองพบว่า เรซินช่วยลดความหนืด

และกำลังไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการผสมด้วยเครื่อง brabender การใส่ CNSL ปริมาณ 15 phr และ CNSLF ปริมาณ 5-10 phr จะเพิ่มความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และระยะยืดจน จุดขาด ให้สูงขึ้นมากกว่ายางที่ไม่ได้ใส่สารดังกล่าว อีกทั้ง CNSL และ CNSLF ยังช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติให้ดีขึ้นอีกด้วย

เสาวรจน์ (2004) ได้ทำการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ที่เตรียมจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยทำการสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินทั้งชนิดรีโซลและโนโวแลค โดยใช้เบสและกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ ซึ่งจากผลการสังเคราะห์ พบว่า เปอร์เซ็นต์ผลได้กลับมามากที่สุดของรีโซลเรซิน คือ 75.37% โดยการใช้อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์ต่อคาร์ดานอลเท่ากับ 2.0 ภายได้ pH เท่ากับ 8.0 ณ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเปอร์เซ็นต์ผลที่ได้กลับมามากที่สุดของโนโวแลคเรซิน คือ 79.68% โดยการใช้อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์ต่อคาร์ดานอลเท่ากับ 0.8 ภายได้ pH เท่ากับ 2.2 ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง และใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีในการหาลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างทางเคมีของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่เตรียมได้ เมื่อนำเรซินผสมกับยางธรรมชาติ พบว่า สามารถเข้ากันได้ดีที่อัตราส่วนต่างๆ สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรง ความทนแรงดึง มอดูลัสที่ความเครียด 100% และ 300% เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม ระยะยืดที่จุดขาด และการคืนตัวลดลง

Gopalakrishnan *et al.* (2004) ได้ทำการสังเคราะห์ และศึกษาคุณสมบัติทางความร้อน เคมี และเชิงกลของพอลิยูรีเทนที่ได้จากการใช้คาร์ดานอลเป็นมอนอเมอร์ พบว่า คาร์ดานอลเป็นโมโนเมอร์ที่ดีในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ เมื่อนำคาร์ดานอล 100.7 กรัม ผสมกับ 40% ฟอร์มัลดีไฮด์ 22.5 มิลลิลิตร โดยใช้ 1% กรดคลอโรติกของน้ำหนักรคาร์ดานอลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ลักษณะเรซินที่มีเป็นอโร-โนโวแลค เรซินสูง จากนั้นนำเรซินที่สังเคราะห์ได้มาทำการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนแบบแข็ง (CRPU) กับพอลิยูรีเทนแบบเหนียว (CTPU) โดยทำปฏิกิริยากับไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานาต (diphenylmethane diisocyanate, MDI) และทำการทดสอบความต้านทานทางเคมี คุณสมบัติทางความร้อน และคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านแรงดึง ความทนแรงยืดจนขาด ความต้านทานแรงฉีกขาด และความแข็งแรงพบว่า พอลิยูรีเทนแบบแข็งมีความแข็งแรง ทนทานสารเคมี และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าพอลิยูรีเทนแบบเหนียว

Liu Hongbo *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการเสื่อมสภาพทางความร้อนของฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน (PFR) โดยใช้เทคนิค Thermogravimetry analysis (TGA) และตรวจสอบการ

เปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีของการเสื่อมสภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared rays (FTIR) และเทคนิค Solid-state ^{13}C nuclear magnetic resonance (^{13}C -NMR) จากการทดลองพบว่า การเสื่อมสภาพของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซินแบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยช่วงแรก พันธะที่เชื่อมโครงสร้างเชื่อมขวาง และโมเลกุลขนาดเล็กที่ได้จากการทำให้รวมตัวของเรซินจะถูกสลายตัวในช่วงแรก จากนั้นส่วนช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวของพันธะเมทิลีน($-\text{CH}_2-$) ที่ใช้ในการเชื่อมโมเลกุลของฟีนอลกลายเป็นกลุ่มเมทิล ส่วนการสลายตัวของฟีนอลจะเกิดในช่วงสุดท้าย ซึ่งจากผลการตรวจสอบด้วย ^{13}C -NMR และ FTIR พบว่า กระบวนการสลายตัวส่วนใหญ่ของฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซินเป็นปฏิกิริยาการสลายตัวของพันธะเมทิลีน ซึ่งเกิดการแทนที่ของออกซิเจนอย่างอัตโนมัติ (auto-oxidation) ของพันธะเมทิลีน

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยการทดลองเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. การสกัดกรดอนุคาร์ดิกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
2. การสังเคราะห์อนุคาร์ดิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน
3. การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่นๆ
4. การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

1. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 ชุดเครื่องแก้วในการสังเคราะห์และการกลั่น
- 1.2 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 1.3 กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- 1.4 ขวดชมพู่ (Flask)
- 1.5 บีกเกอร์ (Beaker)
- 1.6 คอนเดนเซอร์ (Condenser)
- 1.7 เครื่องกวนพร้อมให้ความร้อน (Hotplate stirrer, model HTS-1003)
- 1.8 แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)
- 1.9 เครื่องอบความร้อน (Hot air oven ,model Memmert)
- 1.10 เครื่องชั่งแบบดิจิตอล (Digital weigh scales, model Adventurer ARC120)
- 1.11 เครื่องบดละเอียด (Cross Beater mill, model Retsch muhle)
- 1.12 เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacumm pump, model VP-35L Daikawa)
- 1.13 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) รุ่น PERKIN-ELMER DSC7
- 1.14 เครื่อง Gel permeation chromatograph (GPC) รุ่น Shimadzu/LC-10A dvp
- 1.15 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8X20 นิ้ว (Model R11-3FF)
- 1.16 เครื่องทดสอบหาเวลาการวัดคาบในซังยางผสม (Monsanto Oscillating Disk Reometer)
- 1.17 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Tensile Tester, Model 1101)
- 1.18 เครื่องทดสอบการคืนตัว (Compression Set Tester, Milano/Italia)
- 1.19 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester, Model 917 Maximum Hardness Indicator)

2. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 2.1 เปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ จากบริษัท เมธี ภูเก็ต จำกัด
- 2.2 เอทานอล 96-98% Commercial grade (เกรดทางการค้า) จาก Merck
- 2.3 กรดไฮโดรคลอริก 37% GR for analysis grade จาก Merck
- 2.4 เอทิลอะซิเตท AR grade จาก Merck
- 2.5 แอนไฮดริสโซเดียมซัลเฟต จาก Ajax Finechem
- 2.6 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ AR grade จาก Ajax finechem
- 2.7 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ AR grade จาก Ajax finechem
- 2.8 ฟอรั่มลดีไฮด์ 36% AR grade จาก Merck
- 2.9 สารละลายแอมโมเนีย 25% GR for analysis grade จาก Merck
- 2.10 โทลูอีน (Toluene) AR grade จาก Merck
- 2.11 ขงธรรมชาติ (STR 5L) จากบริษัท บางกอก รับเบอร์ จำกัด
- 2.12 เรซินจากอุตสาหกรรม จากบริษัทฮันต์สแมน (Huntsman) ประเทศไทย จำกัด
- 2.13 กำมะถัน (vulcanizing agent) เกรดทางการค้า จากบริษัท สยามเคมี จำกัด
- 2.14 ซิงก์ออกไซด์ (activator) เกรดทางการค้า จากบริษัท Univenture Public Co.,Ltd.
- 2.15 MBT (accelerator) เกรดทางการค้า จากห้างหุ้นส่วน กิลไพบลีย์เคมี จำกัด
- 2.16 TMTD (accelerator) เกรดทางการค้า จากห้างหุ้นส่วน กิลไพบลีย์เคมี จำกัด
- 2.17 Steric acid (activator) เกรดทางการค้า จากห้างหุ้นส่วน กิลไพบลีย์เคมี จำกัด

3. วิธีการทดลอง

3.1 การสกัดกรดอนุคาร์ดิกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

3.1.1 การเตรียมตัวอย่างเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ มาบดอย่างละเอียด เพื่อลดขนาด ด้วยเครื่องบดละเอียด (Cross Beater mill)

3.1.2 วิธีการสกัดกรดอนุคาร์ดิกจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

3.1.2.1 การสกัดสารจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction)

1. ชั่งน้ำหนักเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ได้จากการบด 125 กรัม ในขวดปริมาตรทรงกรวยขนาด 1000 มิลลิลิตร
2. นำเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ชั่งได้ ละลายในตัวทำละลายเอทานอล 1000 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำสารตัวอย่างที่ได้จากการกวน มากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ
4. เก็บสารละลายที่ผ่านการกรอง (filtrate) ที่คือ cashew nut shell liquid เพื่อทำการสกัดกรดอนุคาร์ดิก

3.1.2.2 การสกัดกรดอนุคาร์ดิกจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

1. นำสารละลายที่ผ่านการกรอง (filtrate) เดิมเคลือบไฮดรอกไซด์ 31.25 กรัม จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องกวนด้วยความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
2. นำสารตัวอย่างที่ได้จากการกวน มากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และกลั่นด้วยเอทานอล 2-3 ครั้ง
3. นำตะกอนที่ได้จากการกรอง (แคลเซียม อนุคาร์เตต) มาอบแห้งที่ อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนน้ำหนักของตะกอนคงที่ และจดบันทึกข้อมูล
4. นำตะกอนแคลเซียม อนุคาร์เตต มาทำการสกัดเป็นกรดอนุคาร์ดิก โดยเตรียมสารในอัตราส่วน แคลเซียม อนุคาร์เตต 1 กรัม : กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 11 โมลาร์ 1.09 มิลลิลิตร : เอทิลอะซิเตต 2.8 มิลลิลิตร : น้ำปราศจากไอออน 3.6 มิลลิลิตร
5. ทำการกวนสารตัวอย่างที่เตรียมได้ ด้วยเครื่องกวนด้วยความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. เมื่อตั้งทิ้งไว้ สารตัวอย่างที่ได้จากการกวน จะเกิดการแยกชั้นเป็น 2 ชั้น นำสารละลายมาแยกชั้นด้วยกรวยแยก โดยกรดอนุคาร์ดิกเป็นสารละลายสีน้ำตาลดำที่อยู่ชั้นบน และทำการแยกซ้ำ 3-5 ครั้งด้วยน้ำปราศจากไอออน
7. นำสารละลายสีน้ำตาลดำ มาเติมโซเดียม ซัลเฟต แอนไฮดรัส เพื่อจำกัดน้ำส่วนเกิน จากนั้นทำการกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศอีกครั้ง

8. นำสารละลายที่ได้มากลั่นโดยใช้อุณหภูมิไม่เกิน 135°C เพื่อกำจัดเอทิล อะซิเตต เมื่อกลั่นเสร็จ จะได้กรดอนาคาร์ดิก

3.2 การสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน

การสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ชนิดรีโซล เป็นการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยใช้ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์มากเกินไป และสารละลายแอมโมเนีย และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนเพื่อหาอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม เพื่อให้ได้เรซินที่ได้จากการสังเคราะห์มีความเสถียรทางความร้อนมากที่สุด หลังจากนั้น นำเรซินที่ได้ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR, ตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยด้วยเทคนิค GPC และตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

3.2.1 หาอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์

ทำปฏิกิริยาระหว่างกรดอนาคาร์ดิกกับฟอร์มัลดีไฮด์เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการทดลองที่มีการกวนและให้ความร้อนคงที่ ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยการใส่ 3% ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเทียบกับน้ำหนักของกรดอนาคาร์ดิกที่เตรียมได้ ในอัตราส่วนโดยโมลต่างๆ ดังตารางที่ 2 หลังจากทำปฏิกิริยาครบเวลา นำของผสมที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และตรวจสอบคุณสมบัติด้วยเทคนิค DSC และ GPC

ตารางที่ 2 อัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์

อัตราส่วนโดยโมลของ กรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์	กรดอนาคาร์ดิก (กรัม)	ฟอร์มัลดีไฮด์ (กรัม)
1.0 : 1.6	30	4.16
1.0 : 1.8	30	4.68
1.0 : 2.0	30	5.20
1.0 : 2.2	30	5.77
1.0 : 2.4	30	6.24

3.2.2 หาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

ทำการทดลองเหมือนข้อ 3.2.1 แต่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์บิกต่อฟอร์มาลดีไฮด์ ที่ให้ค่า T_g ของเรซินมากที่สุด มาทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์-ไรเซชันที่ 80, 90 และ 100°C หลังจากนั้นนำผลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาครบ 8 ชั่วโมง มาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และตรวจสอบคุณสมบัติด้วยเทคนิค DSC และ GPC

3.2.3 หาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

ทำการทดลองเหมือนข้อ 3.2.2 แต่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์บิกต่อฟอร์มาลดีไฮด์และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ให้ค่า T_g ของเรซินมากที่สุด มาทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็น 4 6 8 10 และ 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นเมื่อทำปฏิกิริยาครบชั่วโมง นำผลที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และตรวจสอบ DSC และ GPC

3.3 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติ และสารเคมีอื่นๆ

ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ STR 5L จากสถาบันวิจัยยาง โดยงานวิจัยนี้จะนำอนาคาร์บิก-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซินที่ได้จากการสังเคราะห์มาใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง ความเสถียรทางความร้อน ความยืดหยุ่น ให้กับยางธรรมชาติ โดยมีสูตรสารประกอบอย่างคร่าว 3 แบบดังนี้

แบบที่ 1 คือ ไม่ใส่สารเพิ่มความแข็งแรง

แบบที่ 2-4 คือ ใส่อนาคาร์บิก-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน

แบบที่ 5-7 คือ ใส่เรซินที่ใช้ตามอุตสาหกรรมทั่วไป

โดยสารเคมีที่ใช้ในการผสมกับยางธรรมชาติ มีองค์ประกอบ คือ ZnO, Stearic acid, Sulphur, MBT (Mercaptobenzothiazole) และ TMTD (Tetra Methyl Thiuram Disulfide) แสดงอัตราส่วนผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชนิดและปริมาตรสารเคมีที่ใช้ทำสารประกอบยางสูตรต่างๆ

ส่วนประกอบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)						
	1	2	3	4	5	6	7
STR 5L	100	100	100	100	100	100	100
ANAC Polymer	-	5	10	15	-	-	-
Epoxy resin	-	-	-	-	5	10	15
Sulphur	2	2	2	2	2	2	2
ZnO	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2
MBT	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
TMTD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

3.4 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากการผสมองค์ประกอบสารเคมี ทำการเปรียบเทียบยางธรรมชาติในแต่ละรูปแบบ โดยมีการทดสอบดังนี้

- 1.1 Tensile strength (ความต้านทานแรงดึง)
- 1.2 Modulus of elasticity (อีลาสติค มอดุลัส) โดยทำการทดสอบ 300% มอดุลัส
- 1.3 Elongation at break (ระยะยืดตัว ณ จุดขาด หรือความทนแรงยืดจนขาด)
- 1.4 Hardness test (ความแข็งแรง)
- 1.5 Compression set (การคืนตัว หรือการยุบตัวถาวร)

ผลและวิจารณ์

ผลจากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนีย (NH_3) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี FTIR, DSC และ GPC มีรายละเอียดดังนี้

1. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน

อนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างกรดอนุคาร์บอนิกกับพอร์มัลดีไฮด์ที่อัตราส่วนโดยโมลต่างๆ โดยใช้ สารละลายแอมโมเนีย และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีลักษณะเป็นของแข็งสีน้ำตาลแกมดำ ผิวหน้าเรียบมันวาวเมื่อทำการสัมผัส และไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ดีในสารไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน และโทลูอีน เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ลักษณะของอนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่สังเคราะห์ได้

จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางเคมีด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนีย 3% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง FTIR รุ่น

PERKIN ELMER มีลักษณะหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคล้ายคลึงกับการสังเคราะห์คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน (Archana and Deepak, 2006) แสดงดังภาพที่ 22 พบว่า

ความยาวคลื่นที่ปรากฏขึ้นในช่วง $1070-1150\text{ cm}^{-1}$ และ 1638 cm^{-1} เป็น CO stretching จากหมู่เมทิลอล (CH_2OH) แสดงถึง เมทิลโลเลท อนาคาร์ดิก (Methylolated Anacardic) หรือหมู่เมทิล-อลบนวงอโรมาติกของอนาคาร์ดิก

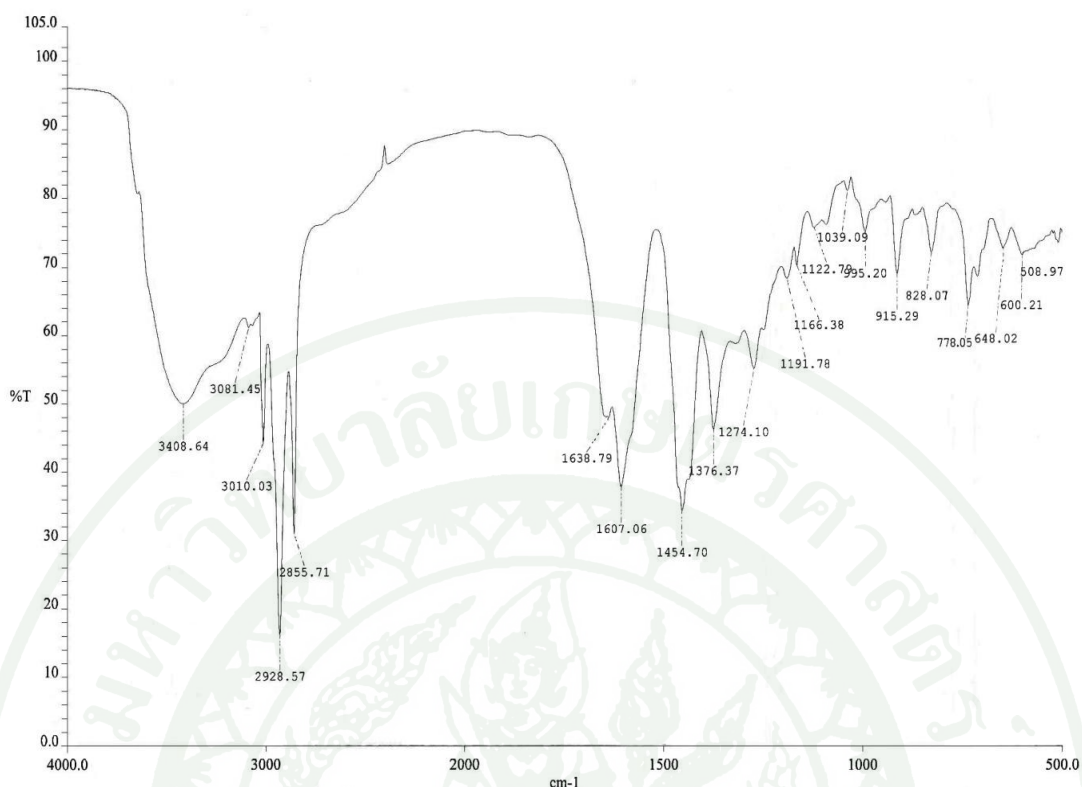
ความยาวคลื่นที่ 1454 และ 995 cm^{-1} แสดงถึงปฏิกิริยาการเติม หรือเข้าแทนที่ H ด้วยหมู่เมทิลอล (CH_2OH) ในตำแหน่งออโร หรือพารา บนวงแหวนอโรมาติกของอนาคาร์ดิก

ความยาวคลื่นที่ 1607 cm^{-1} เป็น C=C stretching ที่สายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าของอนาคาร์ดิก, ความยาวคลื่น 3010 cm^{-1} เป็น C-H stretching ของอัลคีนที่สายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าของ อนาคาร์ดิก และความยาวคลื่น 778 cm^{-1} เป็น C-H out of plane deformation ที่สายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าของอนาคาร์ดิก ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของการสังเคราะห์ อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินเกิดขึ้นจากการแทนที่ของหมู่เมทิลอลบนวงแหวนอโรมาติกของอนาคาร์ดิก โดยไม่ได้เกิดผ่านตำแหน่งที่ไม่อ้อมตัวของสายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าของอนาคาร์ดิก

ความยาวคลื่นที่ 2855 cm^{-1} และ 1039 cm^{-1} แสดงถึง C-H stretching ในพันธะเมทิลีน และ/หรือพันธะอีเทอร์ในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นของการสร้างพันธะเชื่อมโยงระหว่างเมทิลโลเลท อนาคาร์ดิก กับอนาคาร์ดิก หรือเมทิลโลเลท อนาคาร์ดิก กับเมทิลโลเลท อนาคาร์ดิกโมเลกุลอื่น

ความยาวคลื่นที่ 2928 cm^{-1} เป็น C-H stretching บนวงแหวนอโรมาติกของอนาคาร์ดิก

ความยาวคลื่นที่ 3408 cm^{-1} เป็น O-H stretching แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนวงแหวนอโรมาติกของอนาคาร์ดิก (Archana and Deepak, 2006; Priti *et al.* 2010)



ภาพที่ 22 FTIR สเปกตรัมของของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางเคมีด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) รุ่น PERKIN ELMER แสดงดังภาพที่ 23 พบว่า

ความยาวคลื่นที่ปรากฏขึ้นในช่วง $1050-1180\text{ cm}^{-1}$ และ 1638 cm^{-1} เป็น CO stretching จากหมู่เมทิลอล (CH₂OH) แสดงถึง เมทิลโอเลท อนาคาร์ดิก (Methylolated Anacardic)

ความยาวคลื่นที่ 1458 และ 992 cm^{-1} แสดงถึงปฏิกิริยาการเติม หรือเข้าแทนที่ H ด้วย CH₂OH ในตำแหน่งออโซ หรือพารา บนวงแหวนอโรมาติกของอนาคาร์ดิก

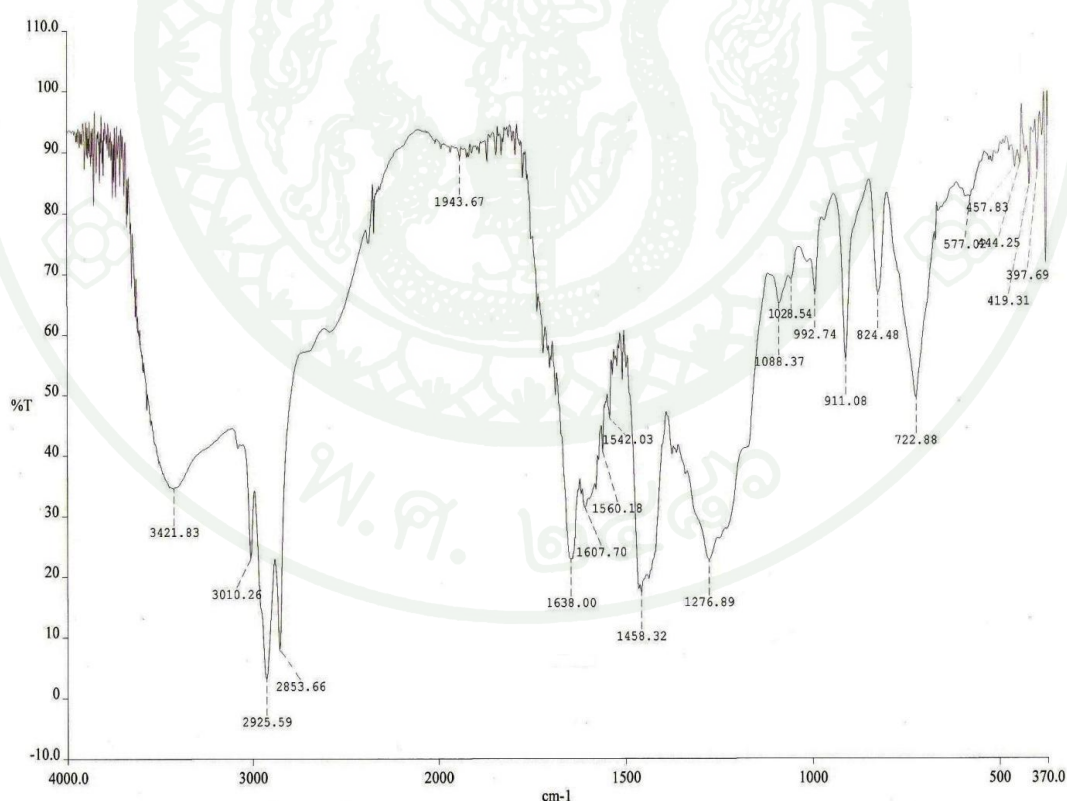
ความยาวคลื่นที่ 1607 cm^{-1} เป็น C=C stretching ที่สายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าของอนาคาร์ดิก, ความยาวคลื่น 3010 cm^{-1} เป็น C-H stretching ของอัลคีนที่สายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าของ อนาคาร์ดิก และความยาวคลื่น 722 cm^{-1} เป็น C-H out of plane deformation ที่สายโซ่ยาวตรง

ตำแหน่งเมต้าของอนาคาร์ดิค ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของการสังเคราะห์ อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินเกิดขึ้นจากการแทนที่ของหมู่เมทิลอลบนวงแหวนอโรมาติกของ อนาคาร์ดิค โดยไม่ได้เกิดผ่านตำแหน่งที่ไม่อ้อมตัวของสายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าของอนาคาร์ดิค

ความยาวคลื่นที่ 2853 cm^{-1} และ 1028 cm^{-1} แสดงถึง C-H stretching ในพันธะเมทิลีน และ พันธะอีเทอร์ในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นของการสร้างพันธะเชื่อมโยง ระหว่างเมทิลโลเลท อนาคาร์ดิค กับอนาคาร์ดิค หรือเมทิลโลเลท อนาคาร์ดิค กับเมทิลโลเลท อนา คาร์ดิคโมเลกุลอื่น

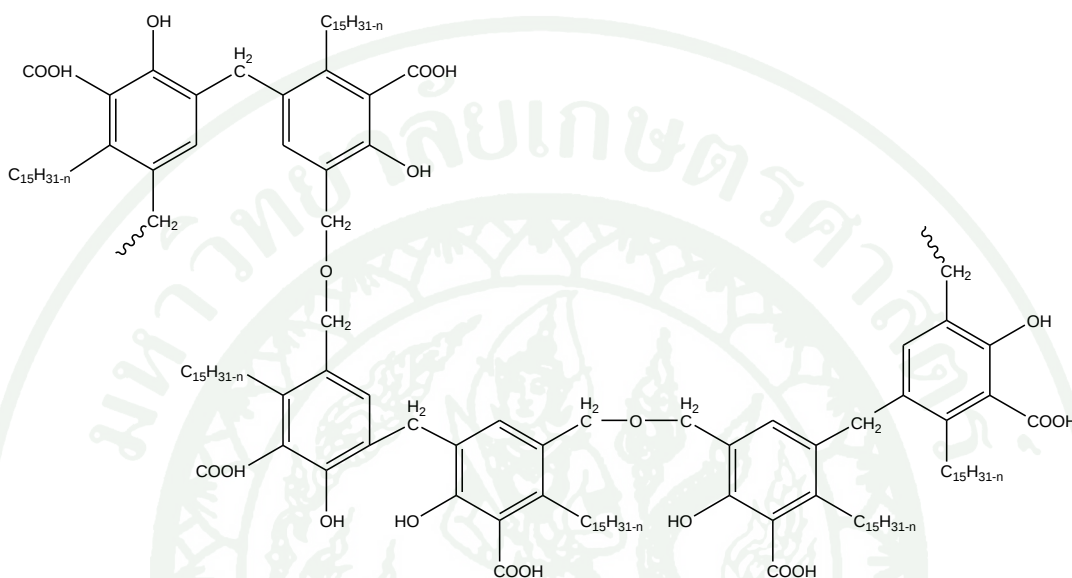
ความยาวคลื่นที่ 2925 cm^{-1} เป็น C-H stretching บนวงแหวนอโรมาติกของอนาคาร์ดิค

ความยาวคลื่นที่ 3421 cm^{-1} เป็น O-H stretching แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนวง แหวนอโรมาติกของอนาคาร์ดิค (Archana and Deepak, 2006; Priti *et al.*, 2010)



ภาพที่ 23 FTIR สเปกตรัมของของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันจาก FTIR สเปกตรัม ทำให้ทราบว่า มีการเกิดพันธะเมทิลีน และ/หรือพันธะอีเทอร์ ในการสร้างพันธะเชื่อมโยงระหว่างมอนอเมอร์ จนกลายเป็นอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ทั้งการใช้สารละลายแอมโมเนีย และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้น แสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 โครงสร้างทางเคมีของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน

2. การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนีย และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การหาสถานะการทดลองด้วยการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนที่ให้ค่า T_g มากที่สุด โดยการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินทางด้านอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิคต่อฟอร์มัลดีไฮด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยใช้สารละลายแอมโมเนีย และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากค่า T_g เป็นสมบัติทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์สุดท้ายภายใต้สภาวะความร้อนและเมื่อใช้เวลานาน จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ศึกษาค่า T_g ของการสังเคราะห์อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน

จากการศึกษาการสังเคราะห์อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1% เทียบ

กับน้ำหนักของโมโนเมอร์ เช่นเดียวกับการสังเคราะห์คาร์บอนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน (Menon *et al.*, 2000) ด้วยเทคนิค DSC พบว่า เทอร์โมแกรมไม่แสดงลักษณะฟิสิกส์ใดเกิดขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากโมเลกุลของกรด อนุคาร์ดิกเนื่องต่อการทำปฏิกิริยา จึงทำการสังเคราะห์อนุคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้สารละลายแอมโมเนีย 3% และ 5% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารละลายแอมโมเนีย 3% และ 5% มีค่า T_g ใกล้เคียงกันคือ 143.01°C และ 143.75°C ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์อนุคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้ สารละลายแอมโมเนีย 3% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1 คุณสมบัติทางความร้อนของอนุคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการสังเคราะห์อนุคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ณ สภาพการทดลองแตกต่างกัน โดยทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางความร้อน (T_g) ของเรซินที่สังเคราะห์ได้ และหาสภาพการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผสมกับยางธรรมชาติ (STR 5L) โดยมีการศึกษา 3 ปัจจัย ดังต่อไปนี้

2.1.1 การสังเคราะห์ อนุคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ณ อุณหภูมิ 90°C ที่อัตราส่วนโดยโมลแตกต่างกัน

จากการสังเคราะห์อนุคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนุคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนดังตารางที่ 4 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่า T_g จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนุคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่เพิ่มขึ้น) เนื่องจากฟอร์มัลดีไฮด์จะเปลี่ยนเป็นหมู่เมทิลอลที่ใช้ในการสร้างเชื่อมโยงพันธะระหว่างมอนอเมอร์ (พันธะเมทิลีน หรือพันธะอีเทอร์) จนกลายเป็นพอลิเมอร์ (Byng-Dae *et al.*, 2001; Manfredi *et al.*, 1999) แต่เมื่อถึงอัตราส่วนโดยโมล 1.0 : 2.0-2.4 ค่า T_g จะมีค่าคงที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเรซินที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรทางโครงสร้างและการทำปฏิกิริยาใกล้ถึงจุดสมบูรณ์หรืออิมตัวของเรซินที่สังเคราะห์ขึ้น จึงทำให้คุณสมบัติทางความร้อน

ของเรซินที่สังเคราะห์ได้ ณ อัตราส่วนโดยโมล 1.0 : 2.0-2.4 มีค่าใกล้เคียงกันทั้งหมด (Mwaikambo *et al.*, 2001)

ตารางที่ 4 ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกันของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์

กรดอนาคาร์ดิก : ฟอร์มัลดีไฮด์	NH ₃
	T_g (°C)
1.0 : 1.6	122.57
1.0 : 1.8	134.47
1.0 : 2.0	143.01
1.0 : 2.2	143.75
1.0 : 2.4	143.56

จากผลการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ จะได้ค่า Glass transition temperature (T_g) สูงสุด คือ 143°C โดยขั้นตอนต่อไปได้นำอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ที่ T_g เท่ากับ 143°C ที่มีการใช้ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์น้อย แต่มีค่า T_g ใกล้เคียงกับอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.2-2.4 นำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เรซิน ณ อุณหภูมิ 80, 90 และ 100 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

2.1.2 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

จากการสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ที่อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ 80, 90 และ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ
ต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}\text{C}$)	NH_3
	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
80	140.59
90	143.01
100	143.68

จากผลการตรวจสอบ DSC โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน จะสังเกตเห็นได้ว่า ค่า T_g จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลที่เกี่ยวข้องเนื่องมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate of reaction) ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ในการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้ค่า T_g ของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 90°C และ 100°C มีค่าใกล้เคียงกัน อาจเป็นเหตุผลมาจากเรซินที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรทางโครงสร้าง การทำปฏิกิริยาใกล้ถึงจุดสมบูรณ์หรืออิมตัวของเรซินที่สังเคราะห์ขึ้น (Mwaikambo *et al.*, 2001) และความใหญ่ของโซ่ตรงยาวของหมู่แอลคิลที่ตำแหน่งเมต้าเป็นตัวขัดขวางการสร้างพันธะเมทิลีน หรือพันธะอีเทอร์ต่อการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ ซึ่งอาจทำให้การเกิดปฏิกิริยายากขึ้น (Raymond *et al.*, 1972) จึงทำให้คุณสมบัติทางความร้อนของเรซินที่สังเคราะห์ได้ ณ อุณหภูมิ 90°C และ 100°C มีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ได้ค่า Glass transition temperature (T_g) สูงสุด คือ 143°C โดยขั้นตอนต่อไปได้อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C ที่ T_g เท่ากับ 143.01°C นำไปศึกษาเวลาที่ใช้การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

2.1.3 เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

จากการสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ที่อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ 90°C ที่เวลา 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง โดยใช้ $3\%\text{NH}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงการทดสอบสมบัติทางความร้อนดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ 90°C ที่เวลาการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	NH ₃
	$T_g (^\circ\text{C})$
4	127.52
6	138.00
8	143.01
10	146.35
12	145.48

จากผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อน โดยการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน พบว่า ค่า T_g จะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มเวลาในการเข้าทำปฏิกิริยาของฟอร์มัลดีไฮด์บนวงแหวนอโรมาติกของอนาคาร์ดิกในการเปลี่ยนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นหมู่เมทิลอล และการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นในการสร้างพันธะเชื่อมโยงของเรซินมากขึ้น จึงเป็นผลทำให้ค่า T_g จะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น (Vikram *et al.*, 2005; Guoyuan *et al.*, 2007; Byng-Dae *et al.*, 2001) โดยที่เวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 10 และ 12 ชั่วโมงจะมีค่า T_g ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเรซินที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรทางโครงสร้าง และการทำปฏิกิริยาใกล้ถึงจุดสมบูรณ์หรืออิมตัวของโครงสร้างเรซินที่สังเคราะห์ขึ้น (Mwaikambo *et al.*, 2001) และอาจมีการขัดขวางของ steric effect จากสายโซ่ตรงยาวของหมู่แอลคิลที่ตำแหน่งเมต้าของอนาคาร์ดิกเมื่อโครงสร้างพอลิเมอร์ใหญ่ขึ้น (Raymond *et al.*, 1972) จึงทำให้เรซินที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกัน ซึ่งเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง เป็นเวลาที่ทำให้ค่า Glass transition temperature (T_g) สูงสุด คือ 146.35°C

จากการศึกษาทั้ง 3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางความร้อน พบว่าสภาวะการทดลองที่ให้ค่า T_g มากที่สุด คือ การสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ที่อัตราส่วนโดยโมล 1.0 : 2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงนำสภาวะการทดลองนี้มาทำการผสมกับยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติต่อไป

2.2 คุณสมบัติทางความร้อนของอนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ณ สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่า T_g ของการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซิน และหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการนำเรซินที่สังเคราะห์ได้ไปผสมกับยางธรรมชาติ มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การสังเคราะห์ อนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ณ อุณหภูมิ 90°C ที่อัตราส่วนโดยโมลแตกต่างกัน

คุณสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอนุคาร์บอนต่อพอร์มัลดีไฮด์แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกันของกรดอนุคาร์บอนต่อพอร์มัลดีไฮด์

กรดอนุคาร์บอน : พอร์มัลดีไฮด์	KOH
	T_g (°C)
1.0 : 1.6	108.71
1.0 : 1.8	121.04
1.0 : 2.0	134.42
1.0 : 2.2	134.55
1.0 : 2.4	133.92

จากผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า ค่า T_g เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนุคาร์บอนต่อพอร์มัลดีไฮด์ที่เพิ่มขึ้น (ปริมาณพอร์มัลดีไฮด์ที่เพิ่มขึ้น) เนื่องจากปริมาณพอร์มัลดีไฮด์ที่เพิ่มขึ้นจะตอบสนองต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของพอร์มัลดีไฮด์กับวง อะโรมาติกของอนุคาร์บอนในการเปลี่ยนเป็นเมทิลโอเลท อนุคาร์บอนมากขึ้น จึงทำให้ค่า T_g เพิ่มขึ้นตาม (Byng-Dae *et al.*, 2001; Manfredi *et al.*, 1999) อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนโดย

โมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นถึง 1.0:2.0-2.4 จะมีค่า T_g ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเรซินที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรทางโครงสร้าง และการทำปฏิกิริยาใกล้ถึงจุดสมบูรณ์หรืออิมตัวของเรซินที่สังเคราะห์ขึ้น (Mwaikambo *et al.*, 2001) จึงทำให้คุณสมบัติทางความร้อนของเรซินที่สังเคราะห์ได้ ณ อัตราส่วนโดยโมล 1.0 : 2.0-2.4 มีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ได้ค่า Glass transition temperature (T_g) สูงสุด คือ 134°C โดยขั้นตอนต่อไปได้นำอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ 1.0:2.0 ที่ T_g เท่ากับ 134°C ที่มีการใช้ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์น้อย แต่มีค่า T_g ใกล้เคียงกับอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.2-2.4 นำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เรซิน ณ อุณหภูมิ 80, 90 และ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

2.2.2 อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

จากการสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับ 1.0:2.0 เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่แตกต่างกัน แสดงคุณสมบัติทางความร้อนจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC ดังตารางที่ 8 ซึ่งจะสังเกตให้เห็นว่า ค่า T_g จะเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับวงอโรมาติกของอนาคาร์ดิกมีเพิ่มมากขึ้น และเปลี่ยนเป็นหมู่เมทิลอลบนวงอโรมาติกของอนาคาร์ดิก หรือเมทิลโอเลท อนาคาร์ดิกในการสร้างพันธะเชื่อมโยงเป็นพอลิเมอร์มากขึ้น (Byng-Dae *et al.*, 2001; Manfredi *et al.*, 1999; Mwaikambo *et al.*, 2001)

ตารางที่ 8 ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ
ต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ($^{\circ}\text{C}$)	KOH
	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
80	126.43
90	134.42
100	135.04

จากผลการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน จะได้ค่า Glass transition temperature (T_g) สูงสุด คือ 134 และ 135°C ซึ่งมีค่า T_g ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในขั้นตอนต่อไป จึงนำอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C ที่ T_g เท่ากับ 134.38°C นำไปศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

2.2.3 เวลาที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางความร้อนของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาต่างๆ โดยใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 9 พบว่า ค่า T_g จะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลทำให้เวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดอนาคาร์ดิกกับฟอร์มัลดีไฮด์ในการสังเคราะห์เรซินเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น (Vikram *et al.*, 2005; Guoyuan *et al.*, 2007; Byng-Dae *et al.*, 2001) แต่อย่างไรก็ตาม เวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 10 และ 12 ชั่วโมงจะมีค่า T_g ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเรซินที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรทางโครงสร้าง การทำปฏิกิริยาใกล้ถึงจุดสมบูรณ์หรืออิ่มตัวของเรซินที่สังเคราะห์ขึ้น และอาจมีการขัดขวางของ steric effect จากสายโซ่ตรงยาวของหมู่แอลคิลที่ตำแหน่งเมต้าของอนาคาร์ดิกเมื่อโครงสร้างพอลิเมอร์ใหญ่ขึ้น จึงทำให้เรซินที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติทางความร้อนใกล้เคียงกัน (Mwaikambo *et al.*, 2001; Raymond *et al.*, 1972)

ดังนั้นการสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ที่อัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง

โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสภาวะการทดลองที่ค่า T_g สูงสุด จึงถูกเลือกในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ (STR 5L)

ตารางที่ 9 ค่า T_g ของอัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ ณ อุณหภูมิ 90°C ที่เวลาการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ

เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	KOH
	T_g (°C)
4	123.62
6	130.12
8	134.42
10	135.56
12	135.68

จากการศึกษาปัจจัยทั้ง 3 ชนิด ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางความร้อนของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่สังเคราะห์ได้ พบว่า อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่สังเคราะห์ในสภาวะการทดลองอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ค่า T_g สูงสุดเท่ากับ 146°C ส่วน อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่สังเคราะห์ในสภาวะการทดลองอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้ค่า T_g สูงสุดเท่ากับ 135°C ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจาก ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ประกอบด้วย 2 ชนิด คือ ปฏิกิริยาการเติม (addition reaction) ฟอร์มัลดีไฮด์เข้าแทนที่ H กลายเป็น CH_2OH (หมู่เมทิลอล) บนวงอโรมาติกของอนาคาร์ดิก ส่วนอีกปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาควบแน่นที่เกิดขึ้นระหว่างกรดอนาคาร์ดิกกับเมทิลโลเลท อนาคาร์ดิก หรือเมทิลโลเลท อนาคาร์ดิกกับเมทิลโลเลท อนาคาร์ดิกอีกโมเลกุลหนึ่ง โดยมีการควบแน่นน้ำและฟอร์มัลดีไฮด์ออกมา ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยานี้จะเกิดพร้อมๆ กัน โดยในการสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ที่มีลักษณะการเร่งปฏิกิริยาความชอบในการเข้าตำแหน่งอโร หรือพาราของวงอโรมาติกที่แตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติทางความร้อนที่ได้มีค่าแตกต่างกันด้วย โดยสารละลายแอมโมเนียมีความชอบในการเข้าเติมตำแหน่งอโรของวงอโร-มาติกมากกว่า ส่วนสารจำพวกโลหะ ไฮดรอกไซด์ (KOH) มีความชอบในการเข้าเติมตำแหน่งพาราของวงอโรมาติกมากกว่า (Astrarloa-Aierbe *et al.*, 1997 and 1999) ซึ่งการเข้าเติม

ตำแหน่งพารา อาจจะถูกขัดขวางจากสายโซ่ยาวที่ไม่อ้อมตัวตรงตำแหน่งเมต้าของวงอโรมาติก (Raymond *et al.*, 1972) เป็นสาเหตุทำให้ค่า T_g ที่ได้จากสังเคราะห์เรซินโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าน้อยกว่าการสังเคราะห์เรซินโดยใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3. มวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน

3.1 มวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยและการกระจายตัวโมเลกุลของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะการทดลองแตกต่างกัน ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromatograph (GPC) แสดงผลดังตารางที่ 10 จะสังเกตเห็นได้ว่า มวลโมเลกุลเฉลี่ย (M_n และ M_w) จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิคต่อฟอร์มัลดีไฮด์ (ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่เพิ่มขึ้น) และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่เพิ่มขึ้น จะตอบสนองต่อการเกิดปฏิกิริยาการเติมในการเปลี่ยนฟอร์มัลดีไฮด์เป็นหมู่เมทิลอลบนวงอโรมาติก และปฏิกิริยาควบแน่นในการสร้างพันธะเมทิลีน หรือพันธะอีเทอร์ เชื่อมโยงโมเลกุลจนกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงร่างตาข่ายขนาดใหญ่ขึ้นของการสังเคราะห์อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิคต่อฟอร์มัลดีไฮด์ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิคต่อฟอร์มัลดีไฮด์และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีมวลโมเลกุลเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งมวลโมเลกุลเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) ที่เพิ่มขึ้นด้วย (Mwaikambo *et al.*, 2001; Byng-Dae *et al.*, 2001)

ตารางที่ 10 มวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่ง
ปฏิกิริยาที่สภาวะการทดลองต่างๆ

AnAc:F Ratio	Reaction Temperature (°C)	Reaction Time (hr)	M _n	M _w	M _w /M _n (PDI)
1.0:1.6	90	8	970	1845	1.90206
1.0:1.8	90	8	1125	2273	2.02019
1.0:2.0	90	8	1389	2944	2.11894
1.0:2.2	90	8	1324	2934	2.21548
1.0:2.4	90	8	1360	2896	2.12943
1.0:2.0	80	8	1286	2643	2.05521
1.0:2.0	100	8	1373	2957	2.15368
1.0:2.0	90	4	1059	2098	1.98057
1.0:2.0	90	6	1208	2475	2.05884
1.0:2.0	90	10	1456	3184	2.18682
1.0:2.0	90	12	1472	3129	2.12568

นอกจากนี้ มวลโมเลกุลเฉลี่ย (M_n และ M_w) ยังเพิ่มขึ้นตาม เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ที่เพิ่มขึ้นในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของการสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-พอร์มัลดีไฮด์เรซินที่ เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสร้างพันธะเชื่อมโยงโครงร่างตาข่ายจนเกิดเป็นพอลิเมอร์ขึ้น (Vikram *et al.*, 2005; Guoyuan *et al.*, 2007; Byng-Dae *et al.*, 2001) โดยในส่วนที่มวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ ดิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน มีค่าใกล้เคียงกัน อาจเป็นเพราะการทำปฏิกิริยาใกล้สมบูรณ์ของมอนอเมอร์ (กรด อนาคาร์ดิก) ในการสร้างพันธะเชื่อมโยงจนอิ่มตัว ทำให้เรซินที่สังเคราะห์ได้มีความ เสถียรภาพ (Mwaikambo *et al.*, 2001) และการขีดขวางของความใหญ่สายโซ่ยาวของหมู่แอลคิล ตรงตำแหน่งเมต้าบนวงอโรมาติกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อโครงสร้างของพอลิเมอร์มีการเชื่อมโยง พันธะมากขึ้น (Raymond *et al.*, 1972) จึงทำให้เรซินที่สังเคราะห์ได้มีมวลโมเลกุลเฉลี่ยและสมบัติ ทางความร้อนใกล้เคียงกัน โดยเรซินที่สังเคราะห์ได้ในทุกอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิก ต่อพอร์มัลดีไฮด์มีการกระจายตัวมวลโมเลกุลของทุกสภาวะการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ เท่ากับ 2.0 อยู่ในช่วงกระจายตัวโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ยอมรับได้ตามอุตสาหกรรม (PDI= 1-10) และมีลักษณะเป็น Polydisperse คือ ค่า Polydispersity index (PDI) มากกว่า 1 ซึ่งเรซินจะมีความ

ยาวของแต่ละโมเลกุลไม่เท่ากัน และน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน จึงต้องทำการเปลี่ยนน้ำหนักโมเลกุลทั้งหมดของเรซิน

3.2 มวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลและการกระจายตัวของมวลโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC ของการสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ณ สภาวะการทดลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 มวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน โดยใช้ 3% KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะการทดลองต่างๆ

AnAc:F Ratio	Reaction Temperature (°C)	Reaction Time (hr)	M_n	M_w	M_w/M_n (PDI)
1.0:1.6	90	8	1043	1627	1.55992
1.0:1.8	90	8	1888	2850	1.50960
1.0:2.0	90	8	2127	3326	1.56398
1.0:2.2	90	8	2061	3265	1.58418
1.0:2.4	90	8	2109	3280	1.55479
1.0:2.0	80	8	1670	2596	1.55451
1.0:2.0	100	8	2158	3255	1.50804
1.0:2.0	90	4	1680	2430	1.44642
1.0:2.0	90	6	1915	3074	1.60522
1.0:2.0	90	10	2223	3567	1.60439
1.0:2.0	90	12	2256	3417	1.51469

จากผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายตัวมวลโมเลกุลของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน โดยใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มวลโมเลกุลเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเวลาที่

ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น มีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกับการสังเคราะห์เรซินโดยใช้ NH_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) ที่เพิ่มขึ้นตาม (Mwaikambo *et al.*, 2001; Byng-Dae *et al.*, 2001) และบางส่วนของสภาวะการทดลองมีมวลโมเลกุลเฉลี่ยใกล้เคียงกันที่เป็นผลมาจากเรซินที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียร และการทำปฏิกิริยาใกล้สมบูรณ์ของมอนอเมอร์ (กรดอนาคาร์ดิก) ในการสร้างพันธะเชื่อมโยงจนอิ่มตัว และความใหญ่สายโซ่ยาวของหมู่แอลคิลตรงตำแหน่งเมต้าบนวงอะโรมาติกขัดขวางมากขึ้น (Raymond *et al.*, 1972) เมื่อโครงสร้างพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับการสังเคราะห์เรซิน โดยใช้ NH_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการกระจายตัวโมเลกุลของเรซิน (PDI) จะมีค่าใกล้เคียงกันหมด ประมาณ 1.50 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า น้ำหนักหรือความยาวของเรซินที่สังเคราะห์โดยใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีขนาดของน้ำหนักและน้ำหนักของโมเลกุลใกล้เคียงกันมากกว่า เรซินที่สังเคราะห์โดยใช้ NH_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อยู่ในระหว่างการกระจายตัวโมเลกุลที่อุตสาหกรรมสามารถยอมรับได้โดยมีค่า PDI ประมาณ 1-10

จากการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยและการกระจายตัวโมเลกุลของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้สารละลายแอมโมเนียและโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะสอดคล้องกับสมบัติทางความร้อน (T_g) เมื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน และเป็นการยืนยันผลจากการสังเคราะห์เรซินว่าเกิดเป็นพอลิเมอร์ขึ้นจริง

4. ลักษณะการคงตัวของยาง

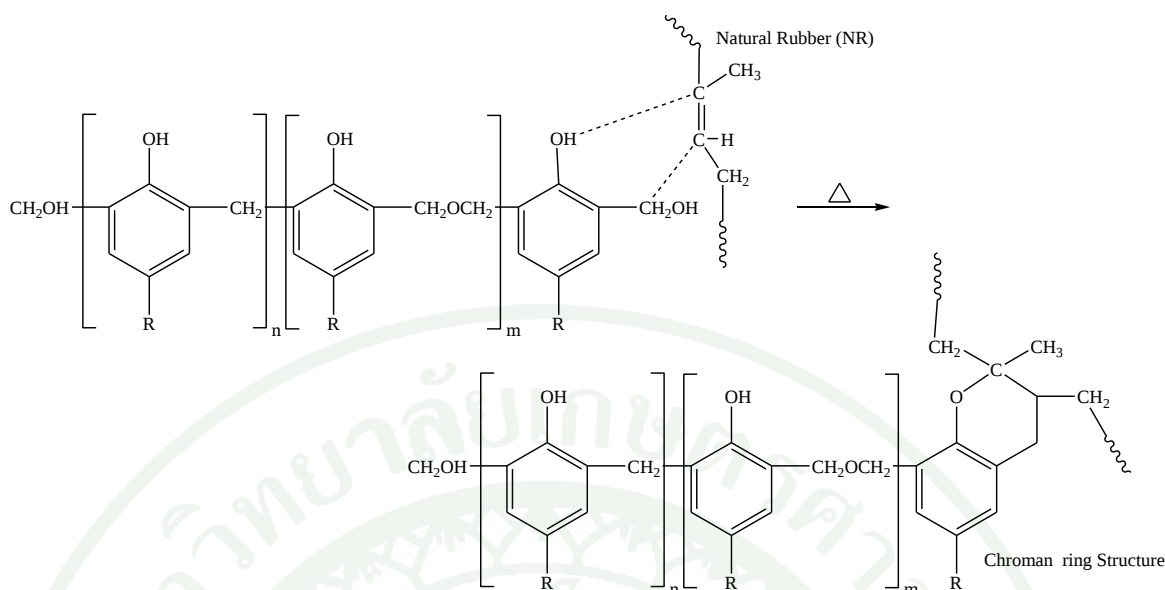
จากการนำยางที่ผ่านการผสมกับเรซินที่สังเคราะห์ได้ และเรซินจากอุตสาหกรรมทั่วไป มาทดสอบหาเวลาวัลคาไนซ์ เพื่อใช้ในการขึ้นรูปยางคงรูป แสดงดังตารางที่ 12 พบว่า ยางผสมอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน และยางผสมเรซินจากอุตสาหกรรมจะใช้เวลาวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางแท่ง STR 5L (ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมเรซิน) โดยเวลาวัลคาไนซ์จะลดลง ตามปริมาณ อนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน และเรซินจากอุตสาหกรรมที่ได้ผสมกับยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณ 5-15 phr เนื่องจากอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน และเรซินจากอุตสาหกรรม (bis-phenol A) มีหมู่เมทิลอลที่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาสร้างพันธะเชื่อมโยงกับส่วนที่ไม่อิ่มตัวของสายโซ่ของยางธรรมชาติด้วยโครงสร้างวงแหวนโครแมน ดังภาพที่ 25 (Charoen *et al.*, 2006) เป็นการสร้างพันธะเชื่อมโยงนอกเหนือจากพันธะซัลฟิดิก (sulphidic linkages) จึงทำให้ใช้เวลาในการวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมเรซิน นอกจากนี้สายโซ่ยาวของหมู่ไม่มีอิมตัวของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดี

ไฮด์เรซินยังสามารถเข้าไปพัวพันยุ่งเหยิงในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ เพื่อสร้างโครงสร้างตาข่าย (entangled network structure) เชื่อมโยงกับสายโซ่หลักของยางธรรมชาติ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เวลาวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมเรซิน จากเหตุผลข้างต้นจึงทำให้ยางธรรมชาติที่ผสมกับเรซินมีค่าเวลาวัลคาไนซ์ลดลง ตามลำดับปริมาณของเรซินที่เพิ่มขึ้นในการผสมยางธรรมชาติ (STR 5L) (Menon *et al.*, 1997 and 2002)

อย่างไรก็ตาม เวลาวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ผสมอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน จะมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติที่ผสมกับเรซินจากอุตสาหกรรม เนื่องจากเรซินจากอุตสาหกรรมมีมอนอเมอร์เป็น Bis-phenol A (วงโรมาติก 2 วง) เมื่อทำการสังเคราะห์เป็นเรซิน อาจมีหมู่เมทิลอลมากกว่า 2 ตำแหน่ง ส่วนอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน มีมอนอเมอร์เป็นกรดอนาคาร์ดิก (วงโรมาติก 1 วง) จึงมีหมู่เมทิลอลน้อยกว่า ทำให้เรซินจากอุตสาหกรรมสามารถสร้างพันธะเชื่อมโยงกับสายโซ่ยางธรรมชาติด้วยโครงสร้างวงแหวนโครแมนมากกว่า ส่งผลให้ลดเวลาการวัลคาไนซ์ลงเพิ่มอัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้บางส่วนของสายโซ่ยาวอลิฟาติกที่ไม่อิมตัวของอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์กับยางธรรมชาติยังสามารถขัดขวางการเชื่อมโยงระหว่างยางธรรมชาติในส่วนที่ไม่อิมตัวที่สามารถเกิดพันธะซัลฟิดิกได้ (Aigbodion *et al.*, 2000) ดังนั้นจึงเป็นเหตุทำให้เวลาวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ผสมกับเรซินจากอุตสาหกรรมน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ผสมกับอนาคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน

ตารางที่ 12 เวลาวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ผสมกับเรซิน ที่อัตราส่วนต่างๆ

ปริมาณเรซินที่ผสมกับยางธรรมชาติ STR 5L (phr)	เวลาวัลคาไนซ์ (นาท)		
	NH ₃	KOH	BPA
0	5.62	5.62	5.62
5	4.63	5.14	2.10
10	4.50	4.51	2.04
15	4.28	4.09	1.86



ภาพที่ 25 โครงสร้างวงแหวนโครแมนที่เกิดขึ้นระหว่างยางธรรมชาติกับเรซิน

ที่มา: Charoen, Krungjit and Azizon (2006)

5. การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของยางผสม

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม (Rubber compound) ระหว่างอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่ได้จากสังเคราะห์ โดยใช้สารละลายแอมโมเนีย และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับยางธรรมชาติ (STR 5L) และยางผสมระหว่างเรซินจากอุตสาหกรรมกับยางธรรมชาติ (STR 5L) เพื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ STR 5L ที่ไม่ได้ผสมกับเรซินในอัตราส่วนต่างๆ ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป และนำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นรูปมาวิเคราะห์สมบัติเชิงกลทางด้านความเค้นดึงเมื่อมีการยืดร้อยละ 300 (300% Modulus, MPa), การต้านทานแรงดึง (Tensile Strength, MPa), การทนต่อแรงยืดจนขาด (Elongation at break, %), ความแข็ง (Hardness) และการยุบตัวหรือการคืนตัว (Compression set, %) แสดงดังตารางที่ 13

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม พบว่า อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่ใช้สารละลายแอมโมเนีย และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเรซินจากอุตสาหกรรม สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ (STR 5L) ในด้านการต้านทานแรงดึง และการทนต่อแรงยืดจนขาดอย่างเห็นได้ชัด โดยการต้านทานแรงดึงและการทนต่อแรงยืดจนขาดจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณเรซินที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากสายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าบวงอโรมาติกของ อนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินสามารถเข้าไปยึดเกาะพัวพันสร้างพันธะเชื่อมโยง

เป็นโครงสร้างที่ยึดเหนี่ยวกับสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ และหมู่เมทิลอลบนวงอโรมาติกที่อยู่ปลายหัวท้ายของ อนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ที่สร้างพันธะเชื่อมโยงกับโมเลกุลยางธรรมชาติ ส่งผลทำให้ยางที่ผสมกับเรซินสามารถยืดตัว ยึดหยุ่นและเคลื่อนตัวได้ดีกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมเรซิน ส่วนเรซินจากอุตสาหกรรม จะมีหมู่เมทิลอลบนวงอโรมาติกที่อยู่ปลายหัวท้ายของเรซิน แต่ไม่มีสายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าที่เพิ่มความยืดหยุ่นเหมือนอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ทำให้ค่าการทนต่อแรงยืดจนขาดของยางธรรมชาติที่ผสมกับเรซินจากอุตสาหกรรมมีค่าน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ผสมกับ อนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน เมื่อใช้ปริมาณสารเท่ากัน นอกจากนี้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) ของเรซิน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์รูปแบบหนึ่ง จึงมีความแข็งแรงจากโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ยางธรรมชาติที่ผสมกับเรซินสามารถต้านทานแรงดึงได้มากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมเรซิน (Menon *et al.*, 1997 and 2002; Charoen *et al.*, 2006)

ค่า 300% มอดูลัสของยางธรรมชาติที่ผสมด้วยอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์เรซิน มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากยางธรรมชาติที่ไม่ผสมเรซิน อาจเป็นเพราะอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซินมีสายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าบนวงอโรมาติกที่เป็นพลาสติกไซเซอ์ตามธรรมชาติ การดึงขึ้นงานจึงไม่ได้ใช้แรงมากก็สามารถยืดตัวได้ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางยังสามารถเคลื่อนที่ได้ไม่ยากนัก ส่วนยางธรรมชาติที่ผสมด้วยเรซินจากอุตสาหกรรม จะมีค่า 300% มอดูลัส เพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุลของพอลิเมอร์ ที่เป็นโครงสร้างร่างแหทำให้เกิดความแข็งแรงของโครงสร้างที่มีมากกว่าอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซินที่สายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าบนอโรมาติกที่เพิ่มความยืดหยุ่น อ่อนตัวให้กับโครงสร้างของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์เรซิน จึงส่งผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น มีความยืดหยุ่นน้อยลง การดึงขึ้นงานให้ยืดออกต้องใช้แรงมากขึ้น ทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าสูงขึ้นตาม (Menon *et al.*, 1997 and 2002; Charoen *et al.*, 2006)

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางจากการผสมยางธรรมชาติกับอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน และเรซินจากอุตสาหกรรม

สมบัติ	ตัวอย่างทดสอบ									
	AR0	AR1 _N	AR2 _N	AR3 _N	AR1 _K	AR2 _K	AR3 _K	BPR1	BPR2	BPR3
Hardness (Shore A)	44	44	44	48	44	43	45	44	46	45
300% Modulus (MPa)	2.9	3.1	3.0	3.3	3.1	3.1	3.2	3.1	3.7	4.4
Tensile strength (MPa)	12.2	20.6	24.2	28.2	21.1	20.1	24.6	21.1	22.6	22.4
Elongation at break (%)	517	605	680	700	640	660	700	554	615	640
Compression set 100°C, 22hr. (%)	23.7	33.3	47.8	52.4	34.3	49.0	58.0	23.5	25.8	28.3

หมายเหตุ: AR_N = ยางธรรมชาติ (STR 5L) ผสมอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้ NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

AR_K = ยางธรรมชาติ (STR 5L) ผสมอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน โดยใช้ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

AR0-3 = ยางธรรมชาติ (STR 5L) ผสมอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน 0 5 10 และ 15 phr ตามลำดับ

BPR1-3 = ยางธรรมชาติ (STR 5L) ผสมเรซินจากอุตสาหกรรม 5 10 และ 15 phr ตามลำดับ

ความแข็ง (Hardness) เป็นการทดสอบความแข็งจากการกดบนพื้นผิวของยางผสม ดังนั้นยางธรรมชาติที่ผสมกับอนาคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน และเรซินจากอุตสาหกรรม จึงมีค่าใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากนักกับยางธรรมชาติที่ไม่ผสมเรซิน เนื่องจากเรซินทั้งสองชนิด เป็นสารเติมแต่งที่ใช้เป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ทำให้ยางนิ่มลง และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย

การยุบตัวถาวร หรือการคืนตัวของยาง (Compression set) คือ สมบัติในการคงสภาพความเป็นอีลาสติคของยางภายใต้แรงอัด ณ อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ถ้าเปอร์เซ็นต์การคืนตัวต่ำแสดงว่า ยางสามารถคืนตัวได้ดี แต่ถ้าเปอร์เซ็นต์การคืนตัวสูงแสดงว่า ยางคืนตัวได้ไม่ดี จากผลทดสอบการยุบตัวถาวรของยาง พบว่า ค่าการยุบตัวถาวรของยางที่ผสมกับอนาคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน และเรซินจากอุตสาหกรรมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเรซินที่เพิ่มขึ้น โดยยางผสมอนาคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซินจะมีค่าการยุบตัวถาวรสูงกว่ายางผสมเรซินจากอุตสาหกรรม เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ภายในสายโซ่โมเลกุลอยู่มาก และอาจเกิดการขัดขวางของสายโซ่ยาวตรงตำแหน่งเมต้าของอนาคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซินในการสร้างพันธะซัลฟิดิกของยางธรรมชาติ ดังนั้น เมื่อยางธรรมชาติได้รับความร้อน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (thermal oxidation) ทำให้เกิดพันธะที่มีพลังงานต่ำ (C-O และ O-O) ซึ่งผลของปฏิกิริยานี้ จะทำให้ยางธรรมชาติเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล (chain scission) ส่งผลทำให้ความเป็นอีลาสติคของยางธรรมชาติที่ผสมอนาคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซินมีค่าลดลง นอกจากนี้ระบบวัลคาไนซ์ที่ใช้ซัลเฟอร์เป็นสารเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายจะประกอบด้วยพันธะ C-S-C และ C-S_x-C ระหว่างโมเลกุลยาง ซึ่งพันธะ C-S และ S-S จะมีความเสถียรและความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะ C-C ระหว่างโมเลกุลของยาง (Kesinee, 2552; Varghese *et al.*, 2004) ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน จากเหตุผลข้างต้น ดังนั้นยางธรรมชาติที่ผสมอนาคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน จึงมีค่าการคืนตัวไม่ดีเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ผสมเรซินจากอุตสาหกรรม และยางธรรมชาติที่ไม่ผสมเรซิน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคทางสเปกโตรมิเตอร์ FTIR สามารถสังเคราะห์ อนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ชนิดรีโซล โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากกรดอนาคาร์ดิคที่ สกัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ได้ พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์ อนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิคต่อ พอร์มัลดีไฮด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และชนิดเบสที่ใช้เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) และมวลโมเลกุลเฉลี่ยของเรซินที่สังเคราะห์ได้ จะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนาคาร์ดิคต่อพอร์มัลดีไฮด์ (ปริมาณพอร์มัลดีไฮด์) อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น โดยอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดี ไฮด์ เรซิน ที่อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ $3\%\text{NH}_3$ เป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถให้ค่า T_g และ M_w สูงสุด เท่ากับ 146.35°C และ 3157 g/mol ตามลำดับ ส่วนอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ที่อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ $3\%\text{KOH}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถให้ค่า T_g และ M_w สูงสุด เท่ากับ 135.56°C และ 3567 g/mol ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เบสต่างชนิดกันจะมีผลต่อคุณสมบัติของเรซินที่สังเคราะห์ ทำให้คุณสมบัติทางความร้อน ความเสถียรทางความร้อนแตกต่างกัน

อนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซินสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับยางธรรมชาติได้ดี สามารถลดเวลาวัลคาไนซิง พร้อมทั้งยังสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านการต้านทานแรงดึง การทนต่อแรงยืดจนขาดอย่างเห็นได้ชัด แต่ค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความแข็งมีค่าคงที่ และการคืนตัวของยางไม่ดี เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ผสมเรซินจากอุตสาหกรรม และยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมเรซิน ดังนั้นอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน เป็นวัสดุตัวเลือกอีกรูปแบบหนึ่งที่เหมาะ สำหรับเป็นตัวพลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) ให้กับวัสดุอื่นๆ อีกทั้งยังเป็นวัสดุเหลือใช้จาก อุตสาหกรรมเกษตร เพื่อทดแทนปิโตรเลียมที่กำลังจะหมดลง

ข้อเสนอแนะ

สารประกอบฟีนอลิกโดยทั่วไปจะมีสมบัติที่เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์สำหรับเป็นสารเติมแต่งยางธรรมชาติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้มีการเติมสารแอนติออกซิแดนซ์เข้าผสม ซึ่งหากมีงานวิจัยต่อไป ควรมีการตรวจสอบสมบัติการต้านทานการออกซิแดนซ์ และความต้านทานความร้อนของยางธรรมชาติที่ผสมกับอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน หรือทดลองนำอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน ไปใช้ร่วมกับสารตัวเสริมแรงอื่นๆ

ปัญหาการยุบตัวถาวรของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อาจปรับปรุงได้โดยการเติมสารแอนติออกซิแดนซ์เข้าผสมร่วมกับสูตรสารเคมีที่ใช้ในการผสมยาง เช่น BTH, Santowhite crystals และ Antioxidant 2246 เป็นต้น เพื่อเพิ่มสภาพพลาสติก และความต้านทานความร้อนของยางธรรมชาติที่ผสมกับอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซินขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กองส่งเสริมพืชสวน กรมส่งเสริมการเกษตร. 2543. **คู่มือพืชสวนเศรษฐกิจ**. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

จินตนา ลีกิจวัฒน์. 2539. การหาน้ำหนักโมเลกุลของสารพอลิเมอร์โดย Gel Permeation Chromatography. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริหาร**. 44 (140): 23-24.

พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2547. ยาง: ชนิด สมบัติ การใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สกว., ปทุมธานี.

เพสินพิศ บุชาธรรม. 2550. **เทคโนโลยีการยาง**. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 2547. การวิเคราะห์สมบัติทางอุณหภูมิของพอลิเมอร์ (Thermal Analysis). แหล่งที่มา: http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_2.html, 10 มิถุนายน 2553.

แม่น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. 2549. **วัสดุวิศวกรรม (Principle of Materials Science and Engineering)**. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.

สถานีอุตุนิคมวิทยาระนอง. 2553. **อากาศระนอง**. แหล่งที่มา: <http://payakol.212cafe.com/archive/>, 6 สิงหาคม 2553

สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2544. **การทดสอบตามมาตรฐานยางแท่งเอสทีอาร์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.

เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. 2547. **การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนอล-ฟอรั่มัลดีไฮด์ เรซิน ที่เตรียมจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

- Aigbodion, A.I., A.R.R. Menon and C.K.S. Pillai. 2000. Processability Characteristics and Physico-mechanical Properties of Natural Rubber Modified with Rubber Seed Oil and Epoxidized Rubber Seed Oil. **Journal of Applied Polymer Science**. 77: 1413-1418.
- Ameem, H.A. 2008. Mechanical Properties of Composite Material Using Natural Rubber with Epoxy Resin. **Engineering and Technology**. 26 (2): 254-264.
- Archana, D. and S. Deepak. 2007. Studies on the blends of cardanol-based epoxidized noloac type phenolic resin and carboxyl-terminated polybutadiene (CTPB), I. **Materials Science and Engineering A**. 458: 336-347.
- Astarloa-Aierbe, G., J.M. Echeverria, J.L. Egiburu, M. Ormaetxea and I. Mondragon. 1997. Kinetics of phenolic resol resin formation by HPLC. **Polymer**. 39 (14): 3147-3153.
- Astarloa-Aierbe G., J.M. Echeverria and I. Mondragon. 1999. Kinetics of phenolic resol resin formation by HPLC. III: Zinc acetate. **Polymer**. 40: 5873-5878.
- Azam-Hi, S.H. and E.C. Judge. 2004. **Small-scale cashew nut processing**. Available Source: <http://www.fao.org/inpho/content/documents/vlibrary/ac306e/ac306e00.htm#Table of Contents>, June 12, 2010.
- Bisanda, E.T.N. and M.P. Ansell. 1992. **Properties of sisal-CNSL composites**. *Journal of Material Science*. 27: 1690-1700.
- Blazdell, P. 2000. The Mighty Cashew. **Interdisciplinary Science Reviews**. 25: 220-226.
- Blow, C.M. and Hepborn, C. 1982. **Rubber Technology and Manufacture**, 2nd edition. Butterworths, England.

- Byng-Dae, P., R. Bernard, S.K. Yoon and T.S Won. 2001. Effect of synthesis Parameters on Thermal Behavior of Phenol-Formaldehyde Resol Resin. **Journal of Applied Polymer Science**. 83: 1415-1424.
- Charoen, N., N. Krungjit, K. Azizon and K. Suda. 2006. Dynamic vulcanization of natural rubber/high-density polyethylene blends: Effect of compatibilization, blend ratio and curing system. **Polymer Testing**. 25: 782-796.
- Das, P. and Ganesh, A. 2003. Bio-oil from pyrolysis of cashew nut shell-A near fuel. **Biomass and Bioenergy**. 25: 113-117.
- Fifield, F.W. and Kealey, D. 1995. **Principle and Practice of Analytical Chemistry**, 4th edition. Acid-free text paper publishing, England.
- Gedam, P.H. and P.S. Sampathkumaran. 1986. Cashew Nut Shell Liquid: Extraction, Chemistry and Applications. **Progress in Organic Coatings**. 14: 115-157.
- Guoyuan, P., D. Zhongjie, Z. Chen, L. Congju, Y. Xiaoping and L. Hangquan. 2007. Synthesis, characterization and properties of novel novolac epoxy resin containing naphthalene moiety. **Polymer**. 48: 3686-3693.
- Intermediate Technology Development Group. 2009. **Cashew Nut Processing**. Available Source: <http://www.unctad.org/infocomm/francais/anacarde/Doc/ITDG.pdf>, May 27, 2010.
- Kesinee Kosonmetee. 2552. **Preparation and Mechanical Properties of Rubber Composites Made from Thermoplastic Natural Rubber Blended with Jute Fiber**. Prince of Songkla University.
- Lubi, C.M. and E.T. Thachil. 2000. Cashew nut shell liquid (CNSL)-a versatile monomer for polymer synthesis. **Designed Monomer and Polymers**. 3 (2): 123-153.

- Martin, B.R. and E.L. Timothy. 2003. Chemistry and Properties of Phenolic Resins and Networks, pp.375-425. In S. Lin-Gibson and J.S. Riffle, eds. **Synthetic methods in step-growth polymers**. John Wiley and Sons Inc. New Jersey, USA.
- Mattoon. 2009. **Cashew Tree**. Available Source: <http://www.oknation.net/blog/kangmatoom/2009/04/05/entry-1>, August 7, 2010.
- Manfredi, L.B., O. de la Osa, N.G. Fernandez and A. Vazquez. 1999. Structure-properties relationship for resols with different formaldehyde/phenol molar ratio. **Polymer**. 40: 3867-3875.
- Menon, A.R.R., C.K.S. Pillai and G.B. Nando. 1997. Modification of natural rubber with phosphatic plasticizers: a comparison of phosphorylated cashew nut shell liquid prepolymer with 2-ethyl hexyl diphenyl phosphate. **European Polymer Journal**. 34 (7): 923-929.
- Menon, A.R.R., A.I. Aigbodion, C.K.S Pillai and N.M. Mathew. 2002. Processability characteristics and physic-mechanical properties of natural rubber modified with cashewnut shell liquid and cashewnut shell liquid-formaldehyde resin. **European Polymer Journal**. 38: 163-168.
- Misra, A.K. and G.N. Pandey. 1985. Kinetic of Alkali-Catalyzed Cardanol-Formaldehyde Reaction. II. Mechanism of the Reaction. **Journal Applied Polymer Science**. 30: 969-977.
- MoHamed, A.S. 2007. **Solid properties**. Available Source: <http://osp.mans.edu.eg/geotechnical/Ch1%20A.htm>, August 7, 2010.
- Morton, M. 1987. **Rubber Technology**, 3rd edition. Van Norstand Reinhold, New York.

- Mwailambo, L.Y. and M.P. Ansell. 2001. Cure Characteristics of Alkali Catalyzed Cashew Nut Shell Liquid Formaldehyde Resins. **Journal of Materials Science**. 36: 3693-3698.
- Mythili, C.V., A.M. Retna and S. Gopalakrishnan. 2004. Synthesis, mechanical, thermal and chemical properties of polyurethanes based on cardanol. **Bulletin of Material Sciences**. 27 (3): 235-241.
- Nikorn, S. 2007. **Extraction and Purification of Anacardic Acid from Cashew Nut Shell.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Paramashivappa, R., P.P. Kumar, P.J. Vithayathil and A.S. Rao. 2001. Novel Method for Isolation of Major Phenolic Constituents from Cashew (*Anacardium occidentale* L.) Nut Shell Liquid. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 49: 2548-2551.
- Priti, S., S.B. Yadaw and S. Deepak. 2010. A Study on the Kinetics of Condensation Reaction of Phenol-Modified Cardanol-Formaldehyde Resin. **International Journal of Chemical Kinetics**. 10: 380-389.
- Peter, M. 2007. **Chromatography-laboratory**. Available Source: <http://academic.sun.ac.za/polymer/gpectref.htm>, April 25, 2010.
- Raymond, R.M. and J.S. Long. 1972. Phenolic resins for coatings, pp. 134-140. In S.H. Richardson and W.I. Wertz, eds. **Treatise on Coatings Volume 1, Film-Forming Compositons**. MARCEL DEKKER, New York.
- Sathiyalekshmi, K. 1993. Studies on Structure and Properties of CNSL Novolac Resins prepared with Succinic Acid Catalyst. **Bulletin of Material Sciences**. 16 (2): 137-150.
- Schultes, R. and R. Raffauf. 1990. **The Healing Forest: Medicinal and Toxic Plants of Northwestern Amazonia**. Oregon, Portland.

Scilution Company, Ltd. 2008. **Model HR-150A Rockwell Hardness Tester**. Available Source:
http://www.scilution.com/product.detail_40342_en_1410357, June 22, 2010.

Smith, N., J. Williams, D. Plucknett and J. Talbot. 1992. **Tropical Forests and Their Crops**.
 Comstock Publishing. New York.

Suresh, K.S, J.H.P. Tyman, D. Aziz and R.A. Johnson. 1986. Practical Liquid Chromatographic
 Separation of the Phenols in Technical Cashew Nut Shell Liquid from *Anacardium*
occidentale. **LIPIDS**. 21 (3): 241-246.

Tyman, J.H.P., R.A. Johnson, M. Mulr and R. Rokhgar. 1989. The Extraction of Natural Cashew
 Nut-Shell Liquid From the Cashew Nut (*Anacardium occidentale*). **Journal of the**
American Oil Chemists' Society. 66 (4): 553-557.

Varghese, S., A. Rosamma and K. Baby. 2004. Natural Rubber-Isotactic Polypropylene
 Thermoplastic Blends. **Journal of Applied polymer science**. 92:2063-2068.

Vikram, T. and G.B. Nando. 2005. Synthesis and Characterization of cardanol-Grafted Natural
 Rubber-The solution Technique. **Journal of Applied Polymer Science**. 105: 1280-1288.

Yangfei, C., C. Zhiqin, X. Shaoyi and L. Hongbo. 2008. A novel thermal degradation mechanism
 of phenol-formaldehyde type resins. **Thermochimica Acta**. 476: 39-43.





ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนุคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์

ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของกรดอนุคาร์ดิกต่อฟอร์มัลดีไฮด์

การคำนวณหาปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์อนุคาร์ดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน

น้ำหนักโมเลกุลของกรดอนุคาร์ดิกเท่ากับ	346.5	กรัมต่อโมล
น้ำหนักโมเลกุลของฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับ	30.03	กรัมต่อโมล
น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ	40	กรัมต่อโมล

การเปรียบเทียบกรดอนุคาร์ดิก 1 โมลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ 2.0 โมล

กรดอนุคาร์ดิก 346.5 กรัม มีฟอร์มัลดีไฮด์ 30.03 กรัม
 กรดอนุคาร์ดิก 30 กรัม มีฟอร์มัลดีไฮด์ $(30.03 \times 30) / 346.5 = 2.6$ กรัม
 $\therefore 2.0 \text{ โมล} = (2.6 \times 2.0) = 5.20 \text{ กรัม}$
 ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้ 5.20 กรัม

การเปรียบเทียบกรดอนุคาร์ดิก 1 โมลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3%

กรดอนุคาร์ดิก 30 กรัม มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ $0.03 \times 30 = 0.9$ กรัม
 $\therefore$ ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.9 กรัม

การเปรียบเทียบกรดอนุคาร์ดิก 1 โมลต่อสารละลายแอมโมเนีย 3%

กรดอนุคาร์ดิก 30 กรัม มีสารละลายแอมโมเนีย $0.03 \times 30 = 0.9$ กรัม
 $\therefore$ ปริมาณสารละลายแอมโมเนีย 0.9 กรัม

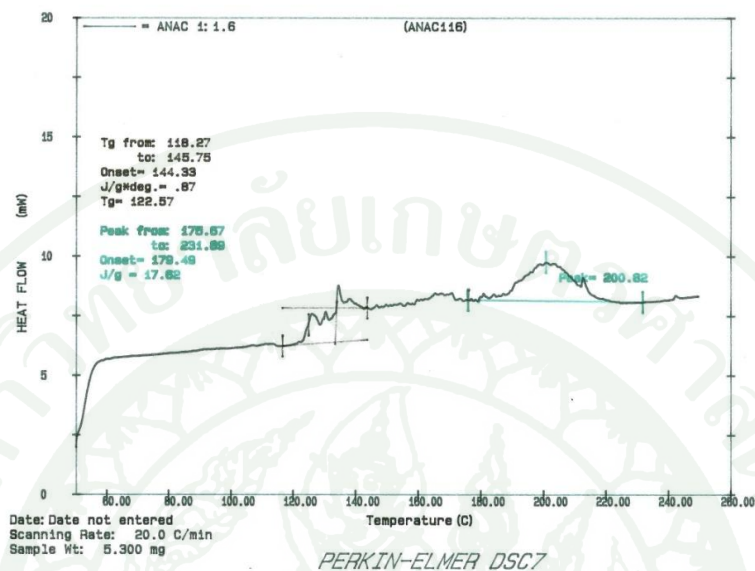


ภาคผนวก ข

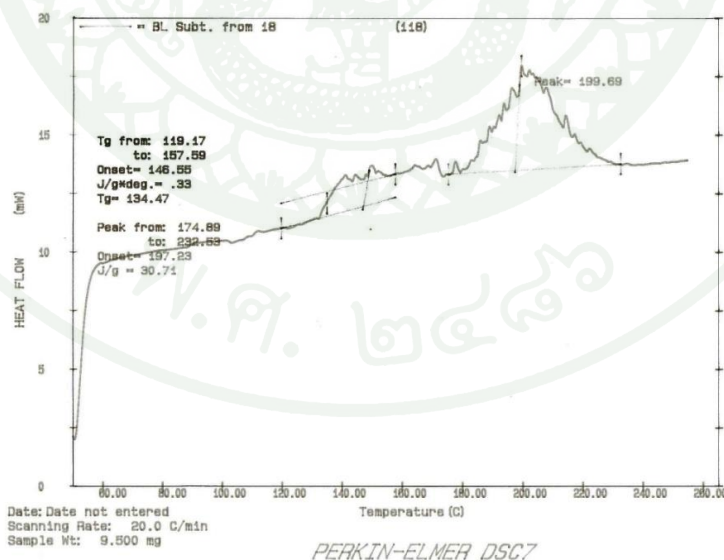
ภาพผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของอนุภาครีดิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน

ภาคผนวก ข

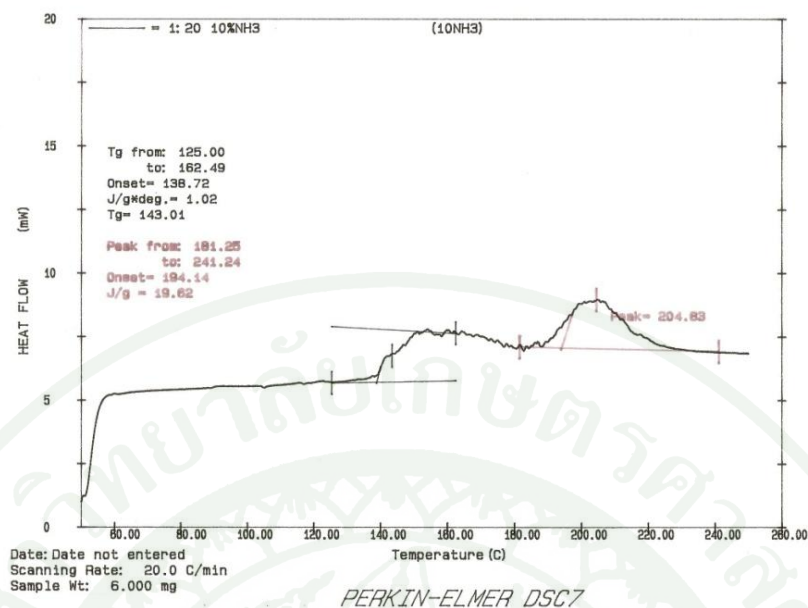
ภาพผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน



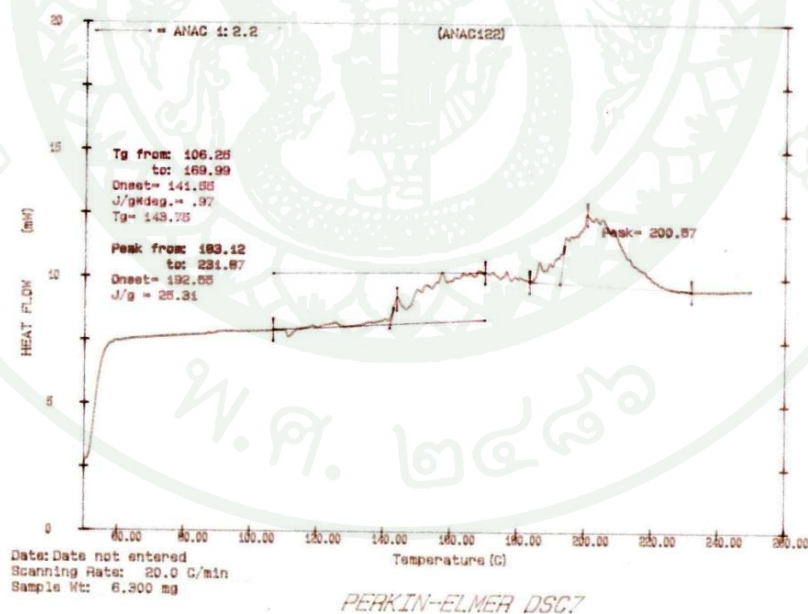
ภาพผนวกที่ ข1 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.6 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



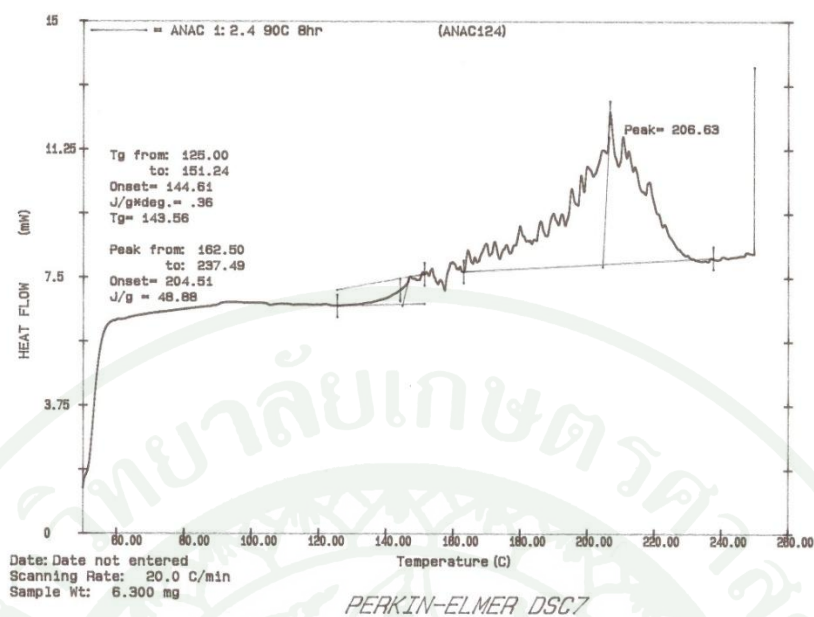
ภาพผนวกที่ ข2 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.8 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



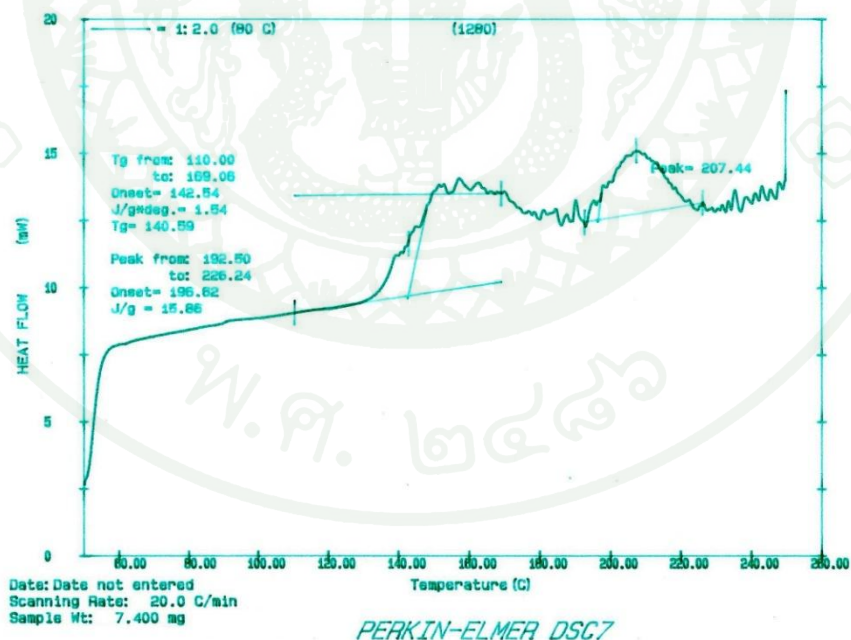
ภาพผนวกที่ ข3 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



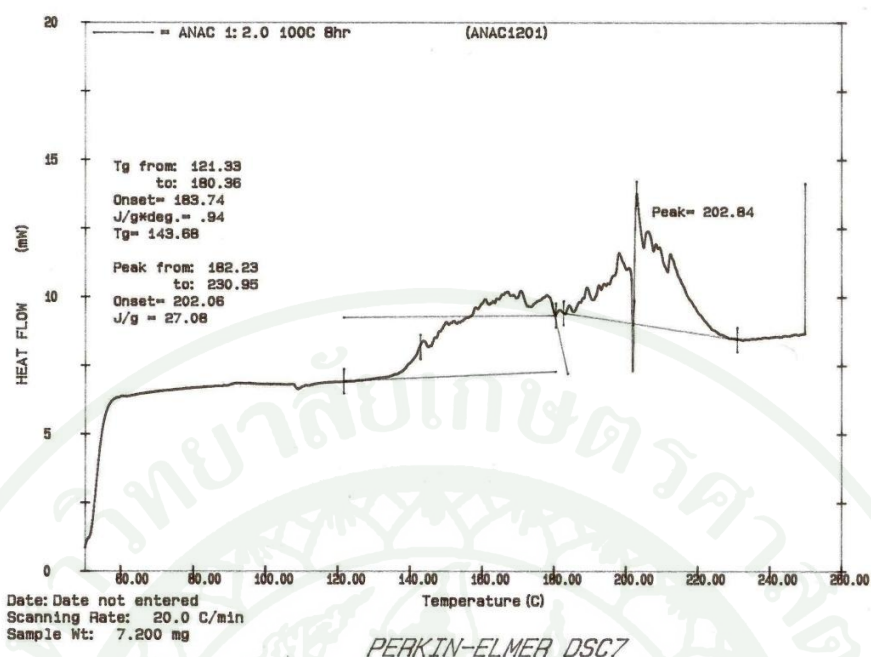
ภาพผนวกที่ ข4 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.2 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



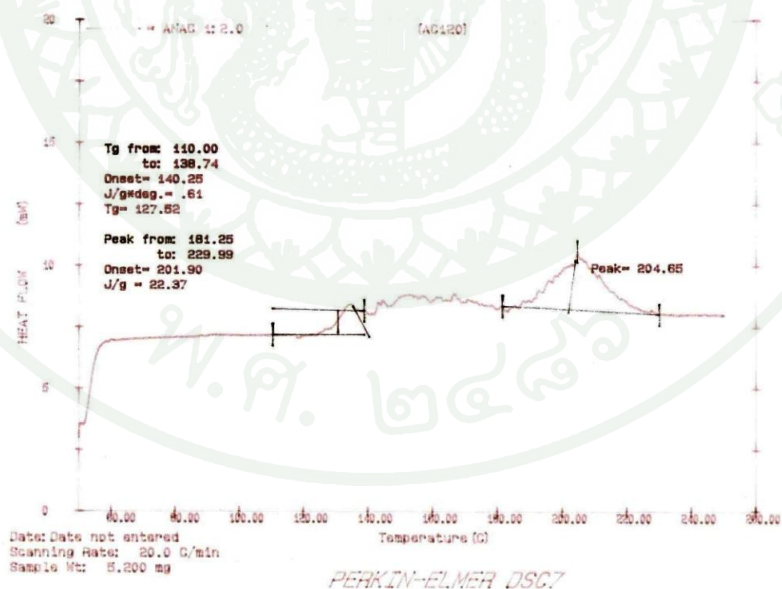
ภาพผนวกที่ ข5 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.4 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



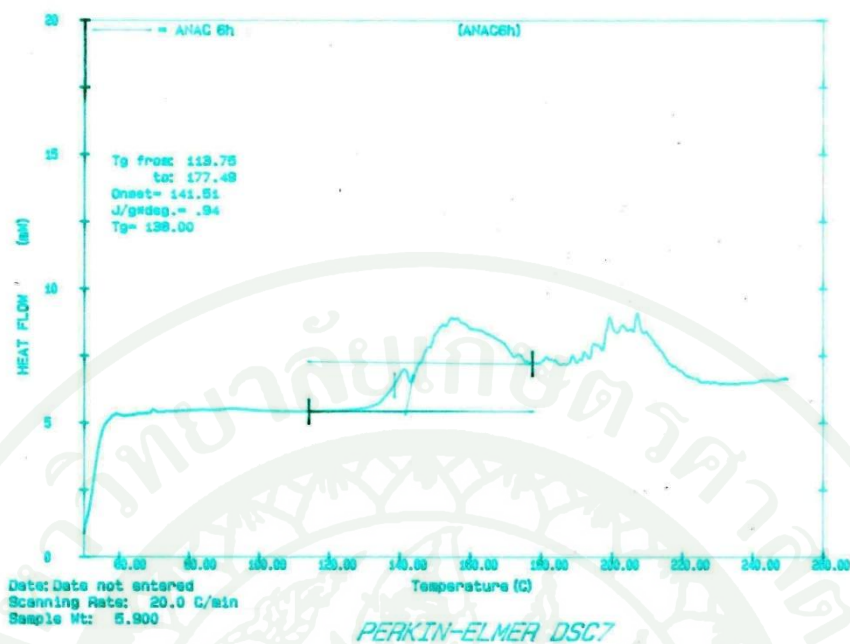
ภาพผนวกที่ ข6 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



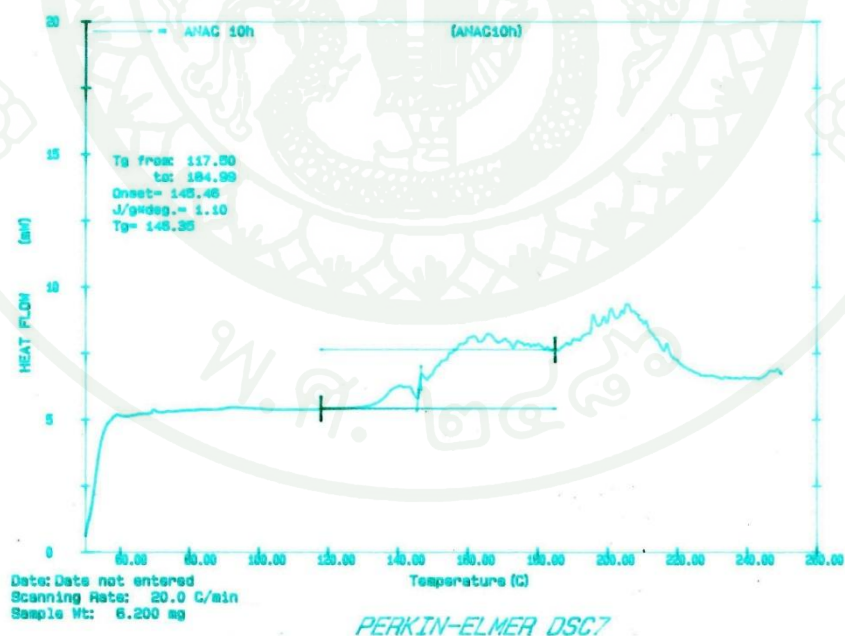
ภาพผนวกที่ ข7 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



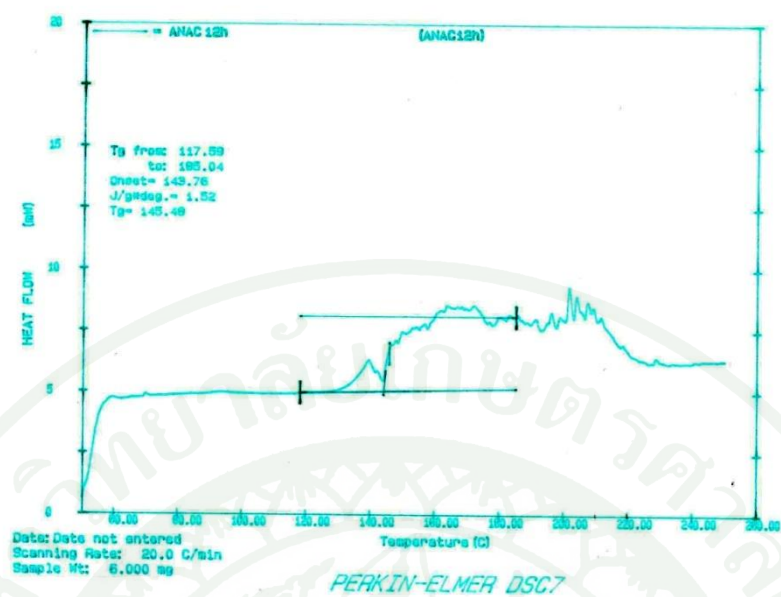
ภาพผนวกที่ ข8 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



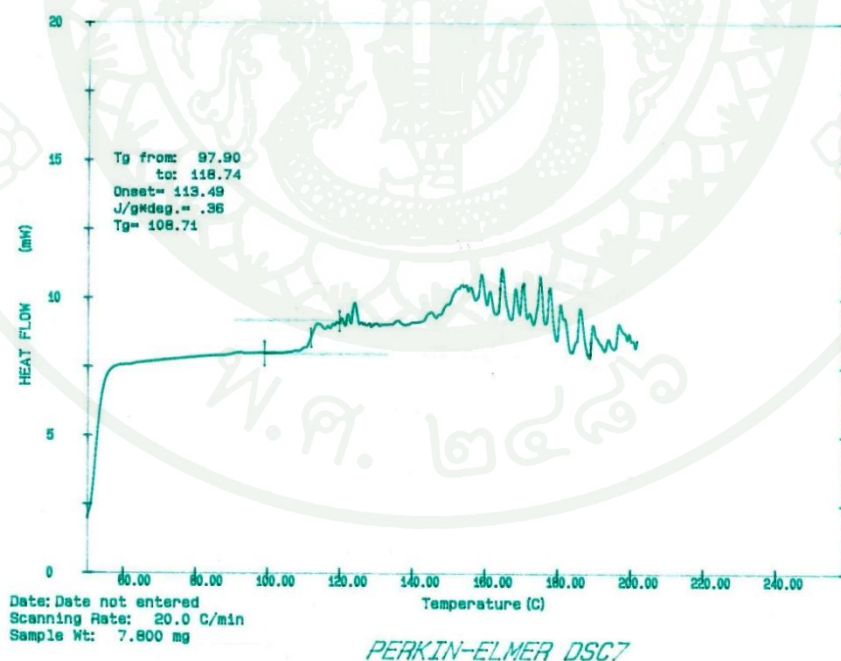
ภาพผนวกที่ ข9 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



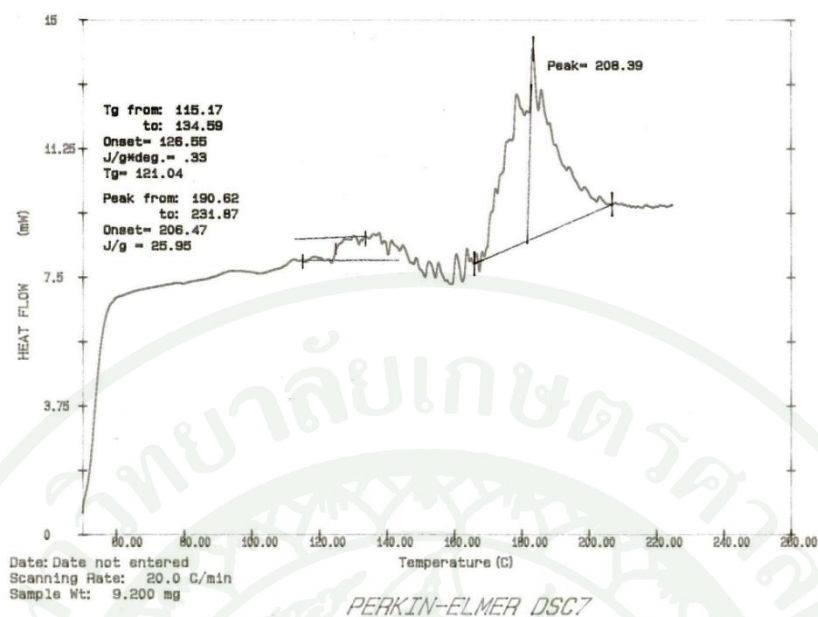
ภาพผนวกที่ ข10 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



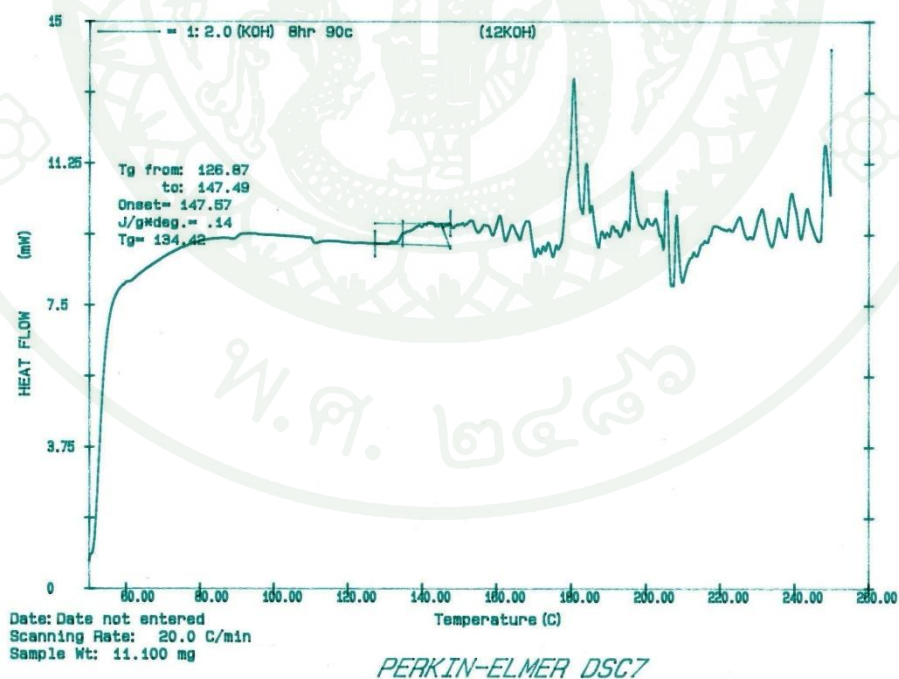
ภาพผนวกที่ ข11 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ $3\%\text{NH}_3$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



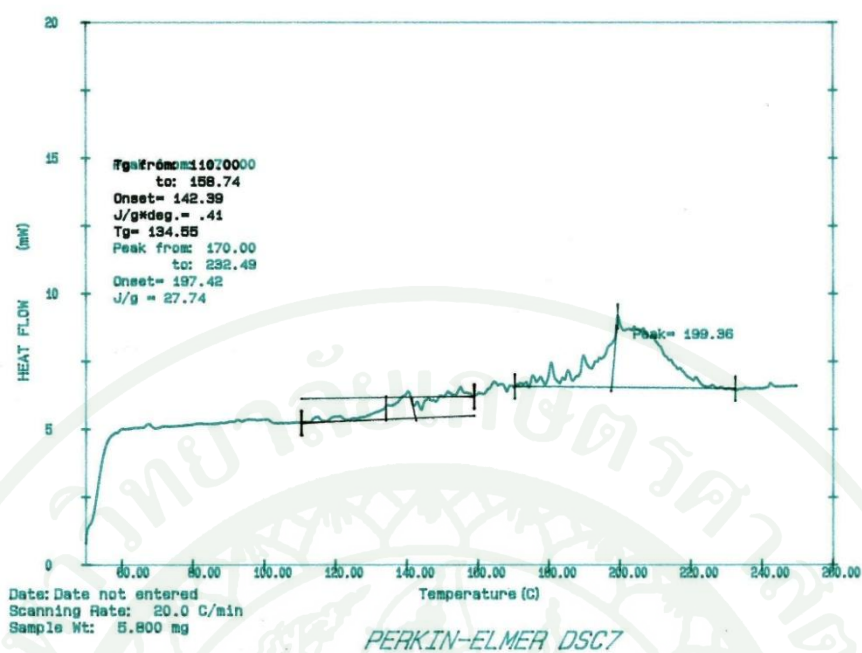
ภาพผนวกที่ ข12 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.6 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ $3\%\text{KOH}$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



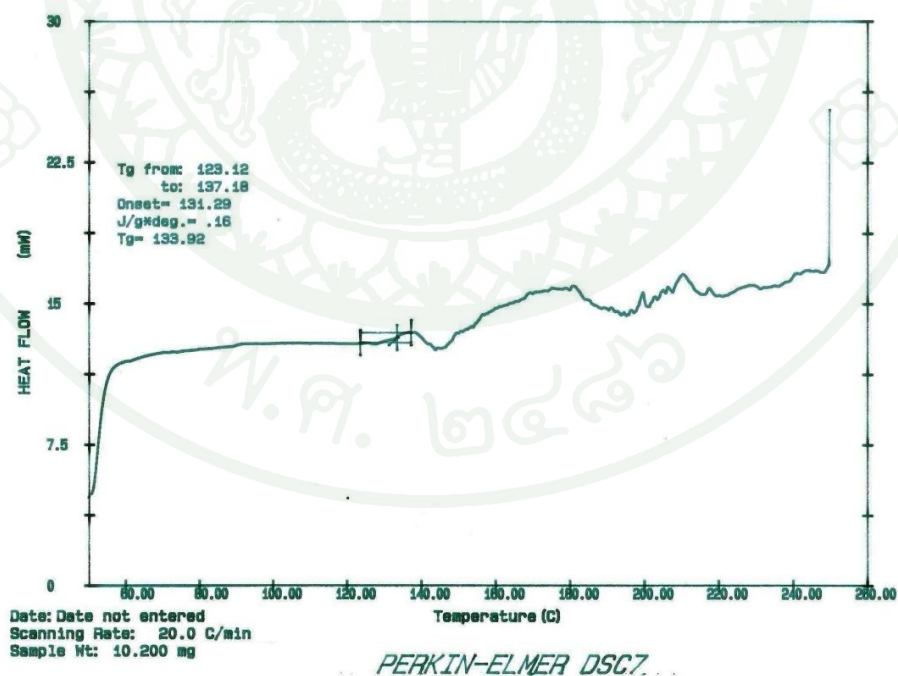
ภาพผนวกที่ ข13 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.8 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



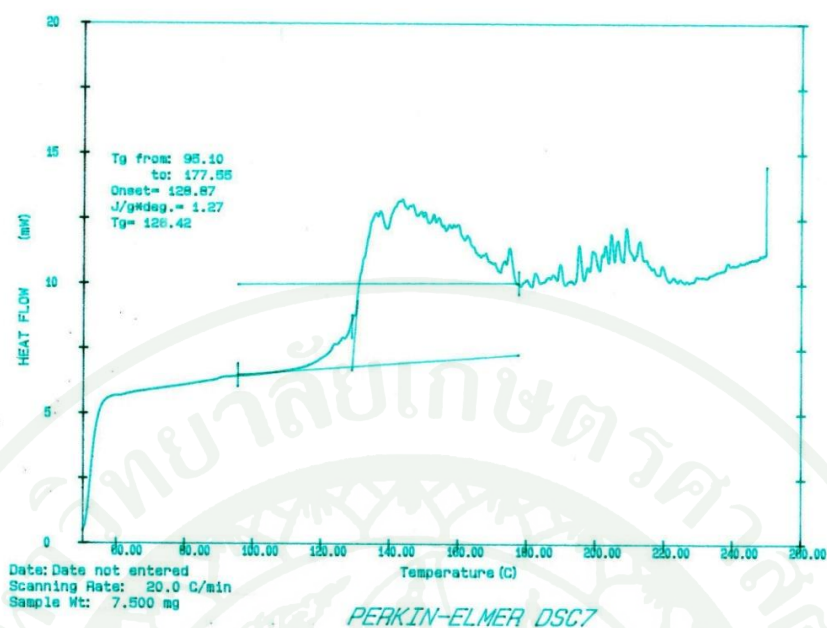
ภาพผนวกที่ ข14 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



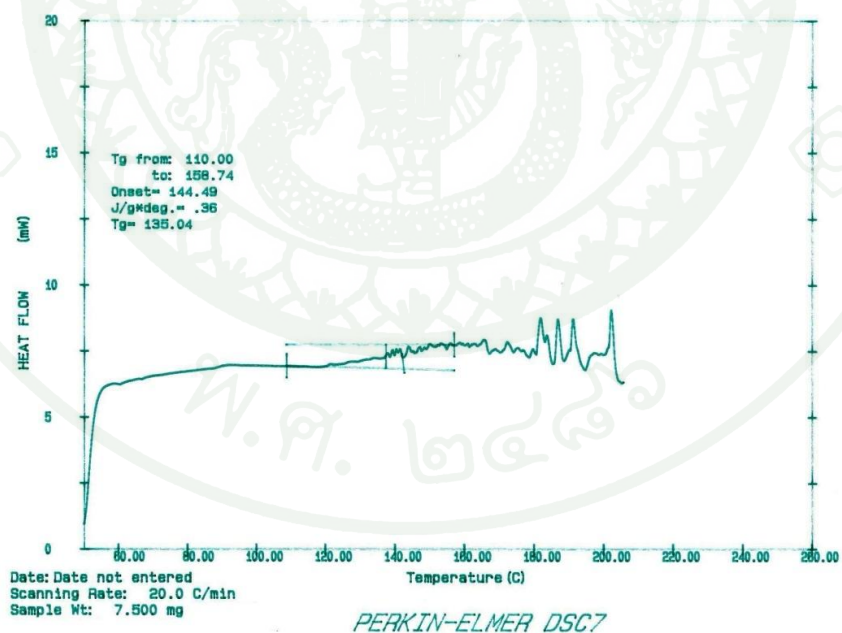
ภาพผนวกที่ ข15 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.2 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพผนวกที่ ข16 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.4 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



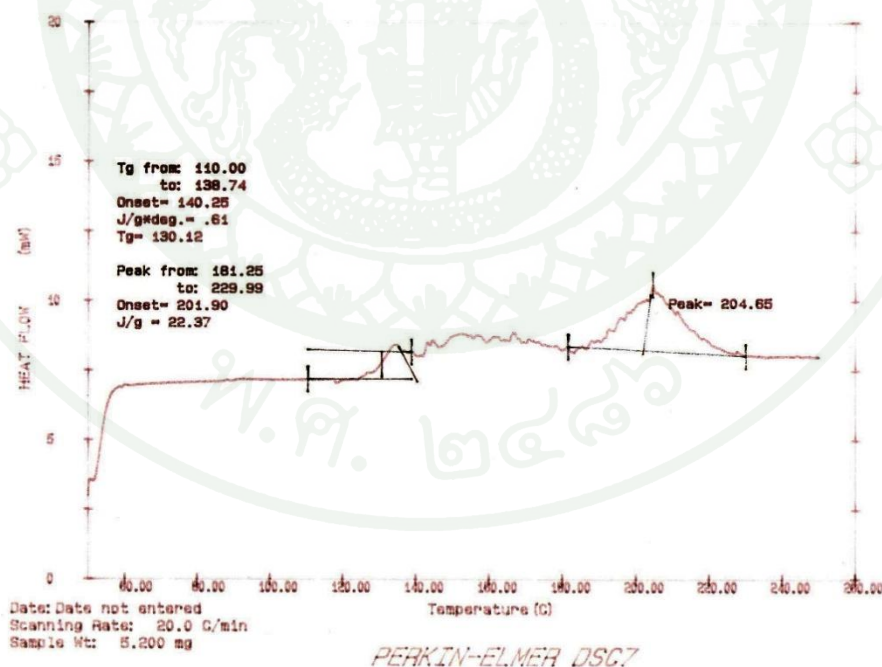
ภาพผนวกที่ ข17 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



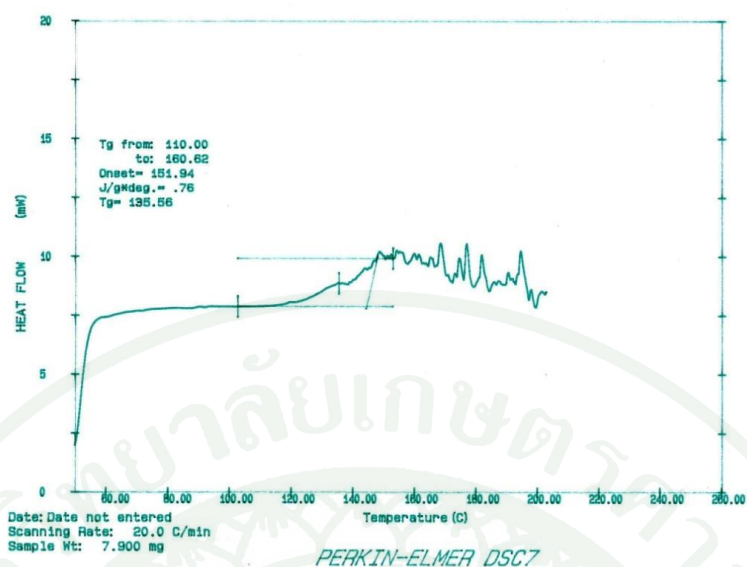
ภาพผนวกที่ ข18 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



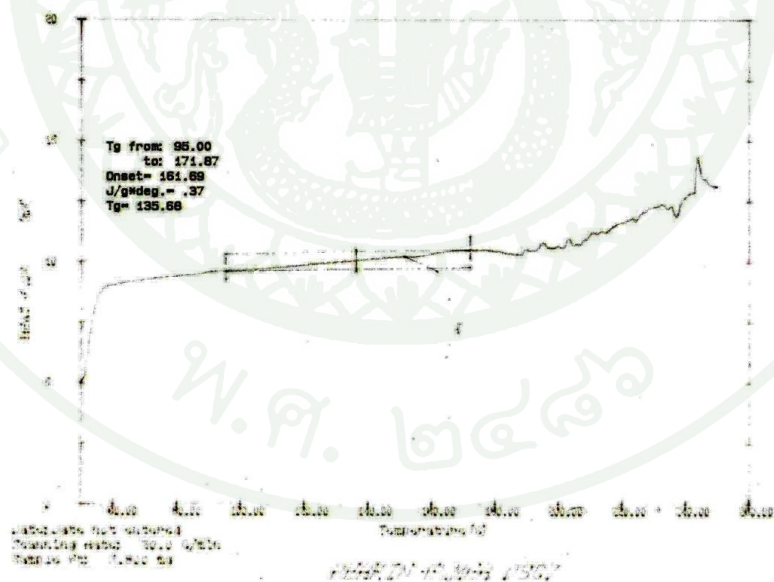
ภาพผนวกที่ ข19 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพผนวกที่ ข20 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพผนวกที่ ข21 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



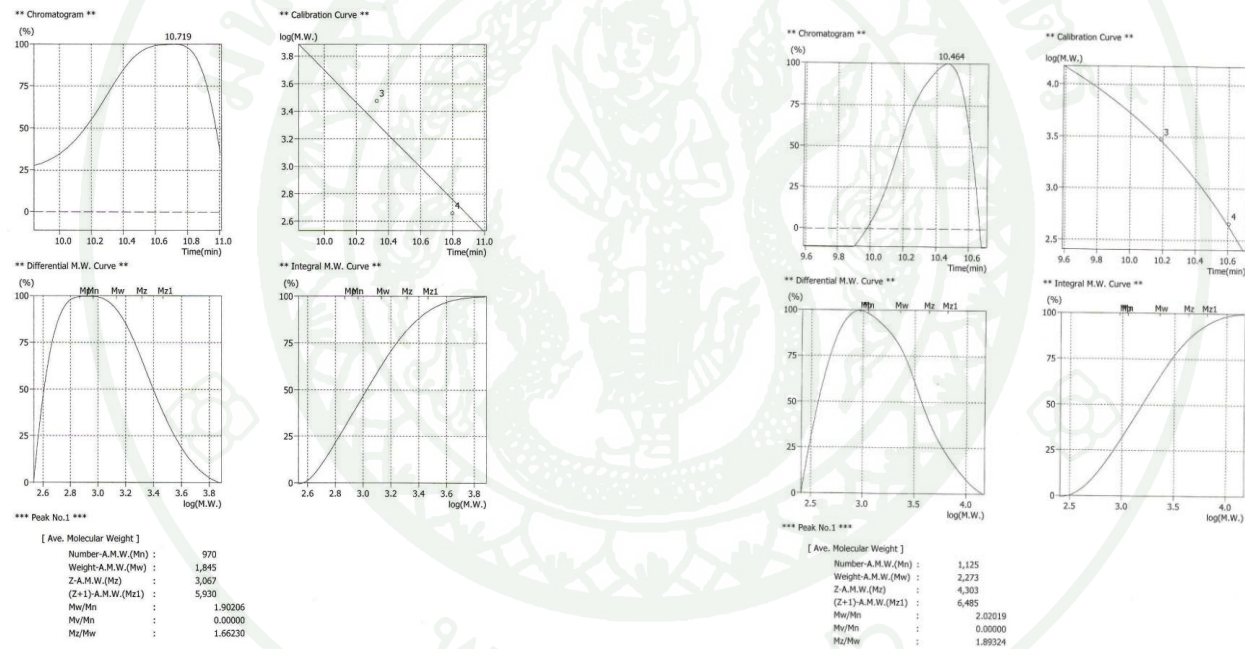
ภาพผนวกที่ ข12 ผลการวิเคราะห์ค่า T_g ของอนาคาร์บิก-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



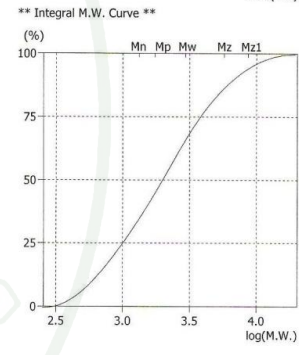
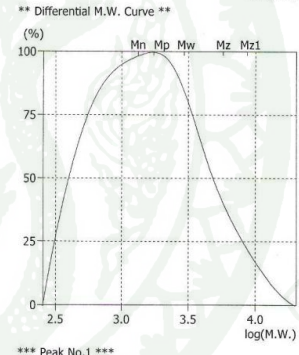
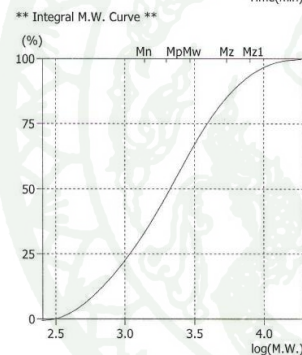
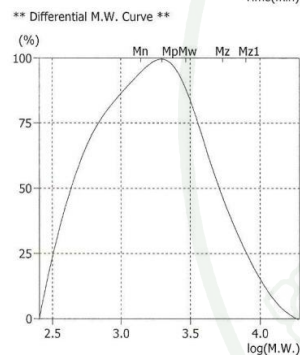
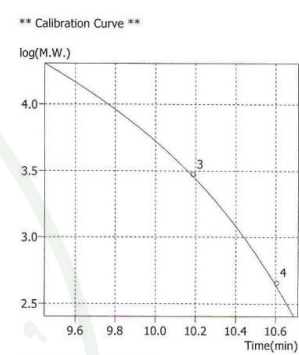
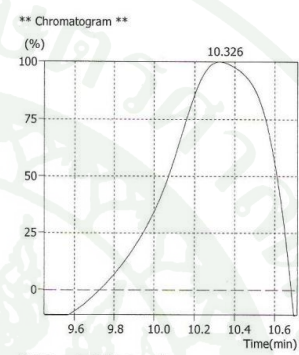
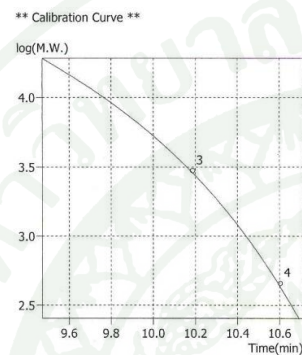
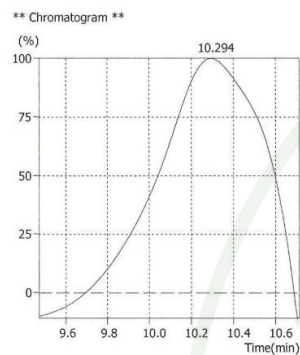
ภาคผนวก ค
ภาพผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนุภาคคาร์ดิก-พอร์มัลด์ไฮด์ เรซิน

ภาคผนวก ค

ภาพผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน



ภาพผนวกที่ ค1 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-พอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.6 และ 1.0:1.8 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

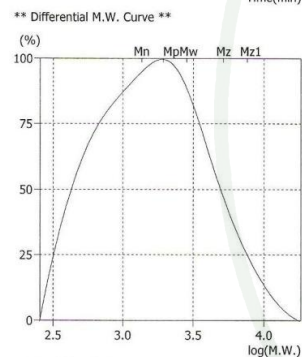
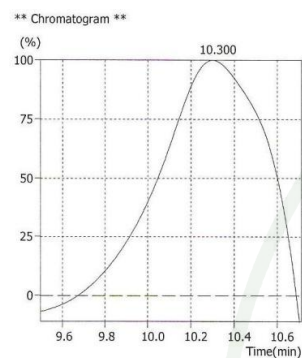
Number-A.M.W.(Mn) :	1,389
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,944
Z-A.M.W.(Mz) :	5,400
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	7,933
Mw/Mn :	2.11894
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.83444

*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	1,324
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,934
Z-A.M.W.(Mz) :	5,743
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	8,664
Mw/Mn :	2.21548
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.95743

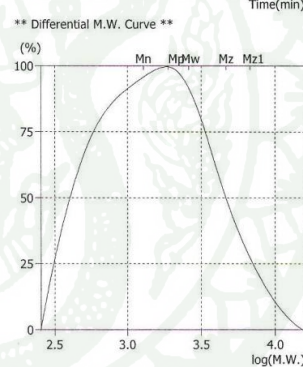
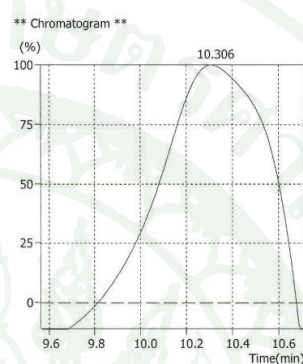
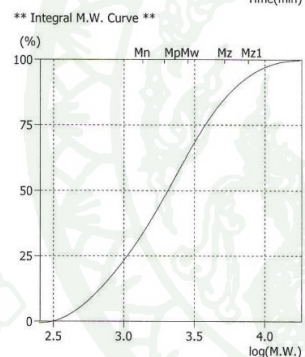
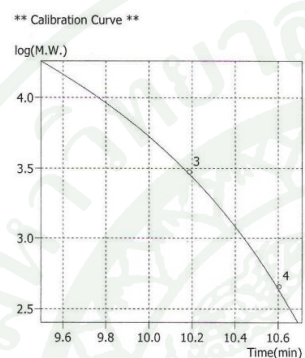
ภาพผนวกที่ ค2 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 และ 1.0:2.2 ณ อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

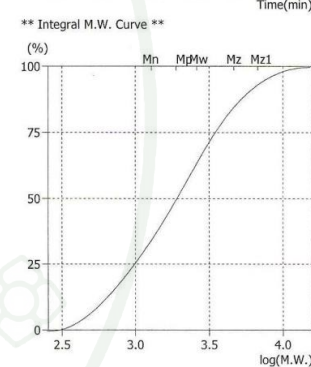
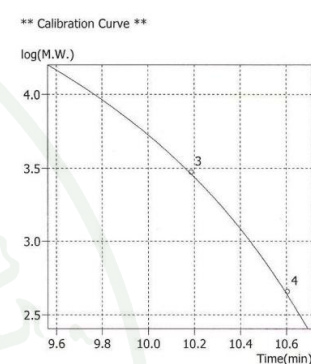
Number-A.M.W.(Mn) :	1,360
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,896
Z-A.M.W.(Mz) :	5,175
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	7,606
Mw/Mn :	2.12943
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.82309



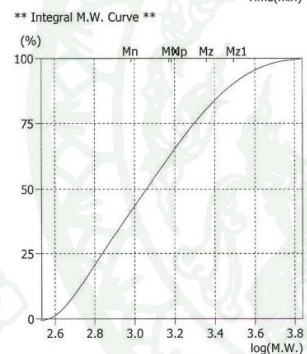
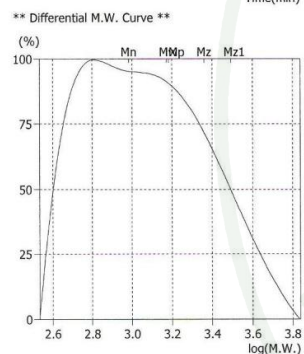
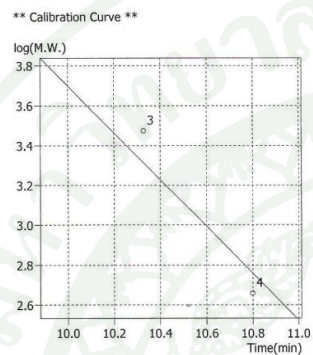
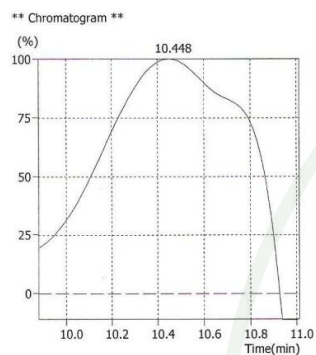
*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	1,286
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,643
Z-A.M.W.(Mz) :	4,660
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	6,768
Mw/Mn :	2.05521
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.78790



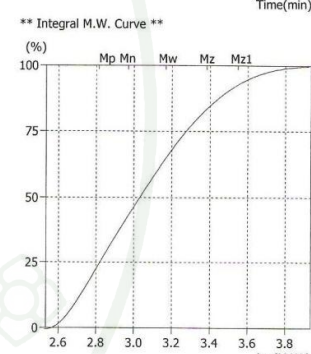
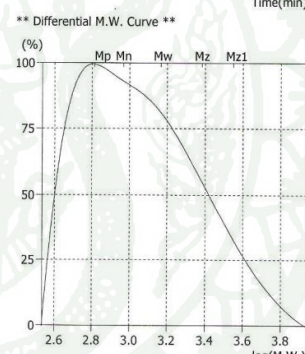
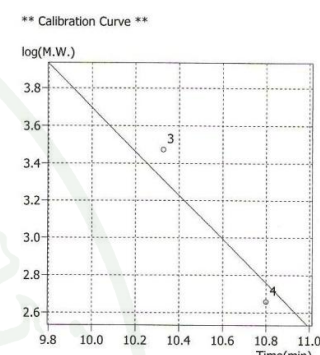
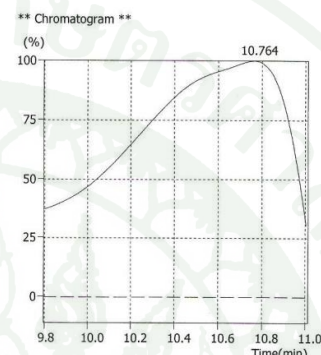
ภาพผนวกที่ ค3 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.4 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	1,373
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,957
Z-A.M.W.(Mz) :	4,787
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	6,119
Mw/Mn :	2.15369
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.61888

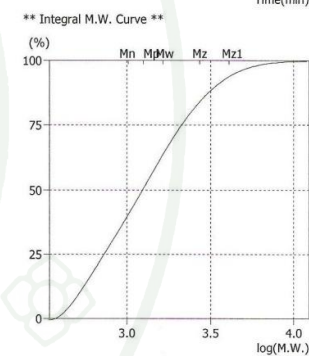
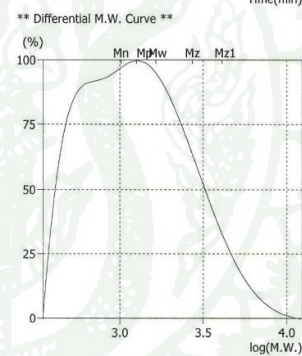
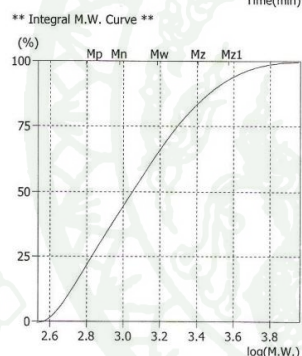
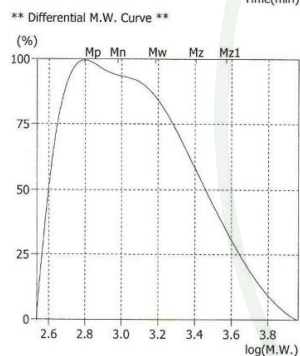
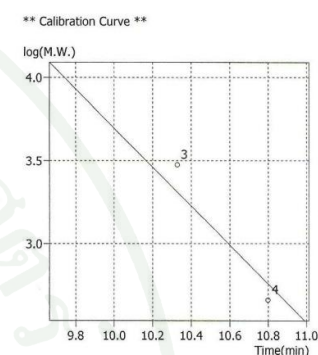
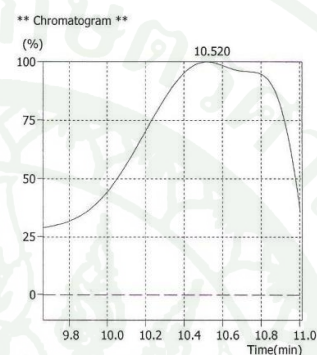
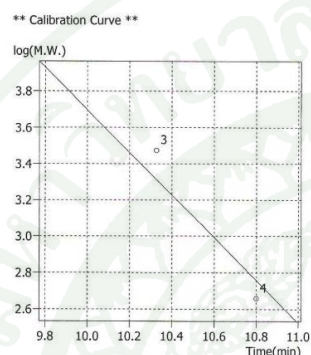
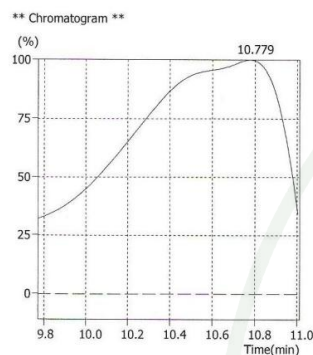


*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	1,059
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,098
Z-A.M.W.(Mz) :	4,416
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	5,535
Mw/Mn :	1.98057
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	2.10482

ภาพผนวกที่ ค4 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

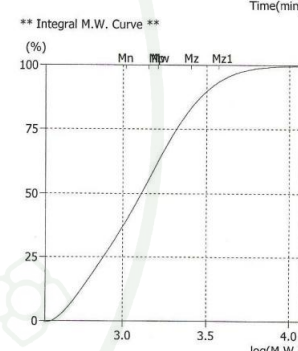
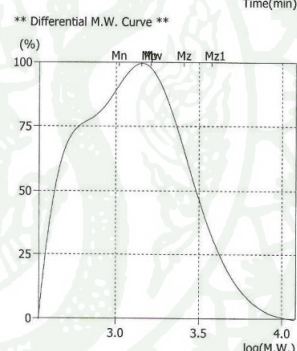
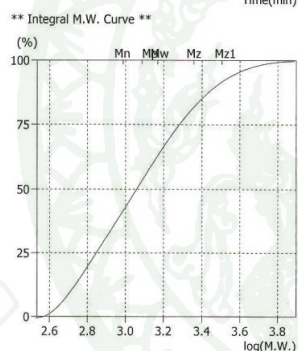
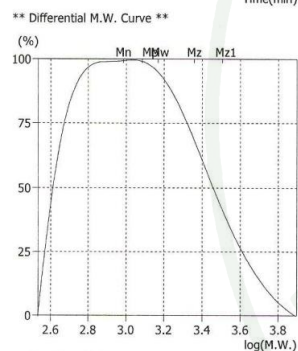
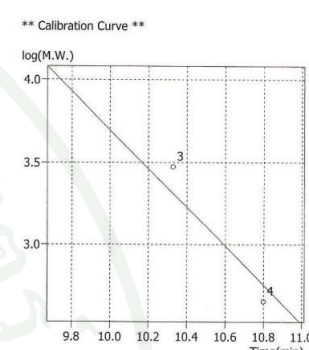
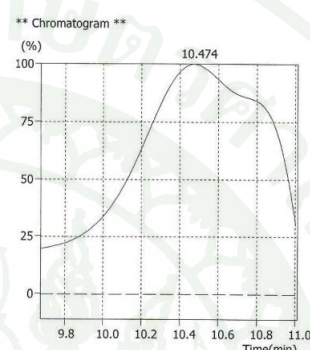
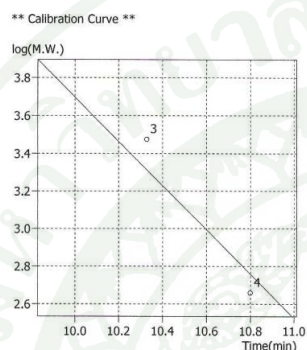
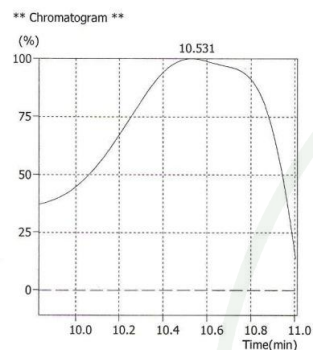
Number-A.M.W.(Mn) :	1,208
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,475
Z-A.M.W.(Mz) :	4,538
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	5,720
Mw/Mn :	2.05884
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.83354

*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	1,456
Weight-A.M.W.(Mw) :	3,184
Z-A.M.W.(Mz) :	5,727
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	7,895
Mw/Mn :	2.18682
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.79898

ภาพผนวกที่ ค5 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



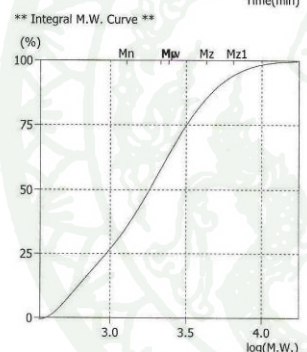
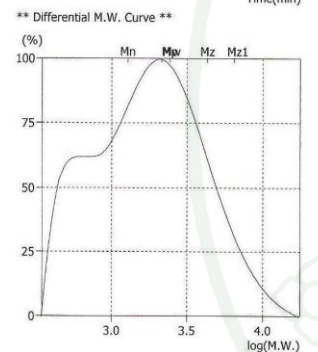
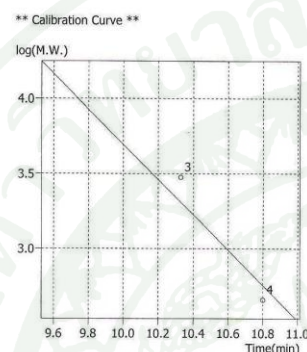
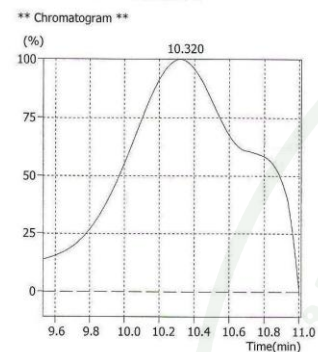
*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]
 Number-A.M.W.(Mn) : 1,472
 Weight-A.M.W.(Mw) : 3,129
 Z-A.M.W.(Mz) : 5,879
 (Z+1)-A.M.W.(Mz1) : 7,504
 Mw/Mn : 2.15678
 Mv/Mn : 0.00000
 Mz/Mw : 1.87885

*** Peak No.1 ***

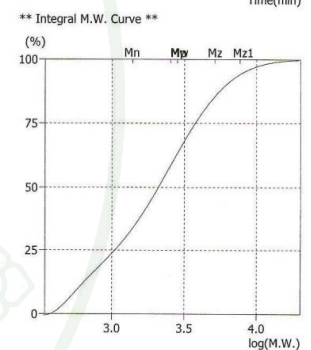
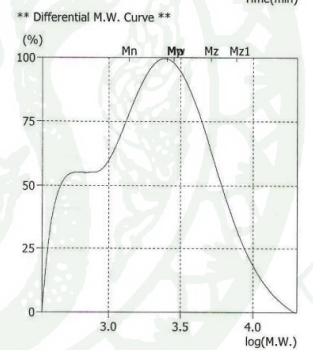
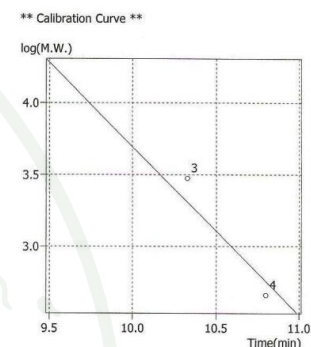
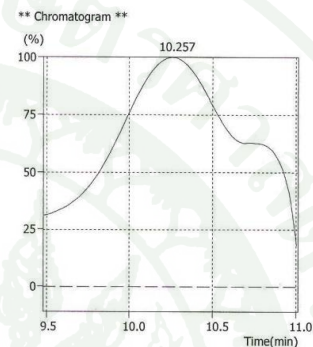
[Ave. Molecular Weight]
 Number-A.M.W.(Mn) : 1,043
 Weight-A.M.W.(Mw) : 1,627
 Z-A.M.W.(Mz) : 2,560
 (Z+1)-A.M.W.(Mz1) : 3,758
 Mw/Mn : 1.55965
 Mv/Mn : 0.00000
 Mz/Mw : 1.57358

ภาพผนวกที่ ค6 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ 3%NH₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ 1.0:1.6 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



*** Peak No.1 ***

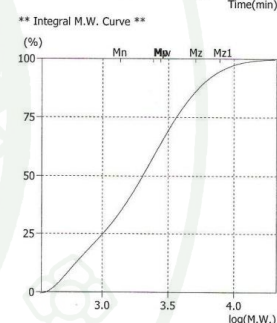
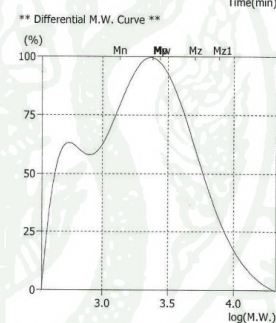
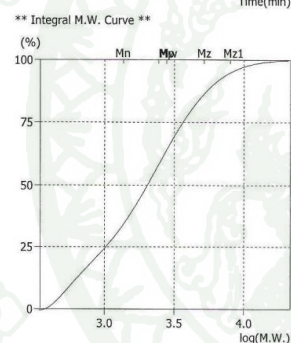
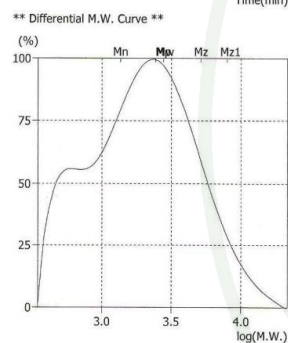
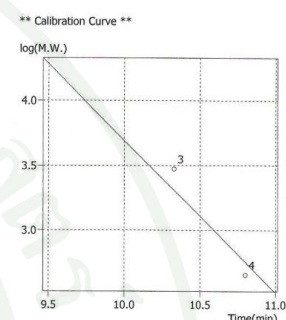
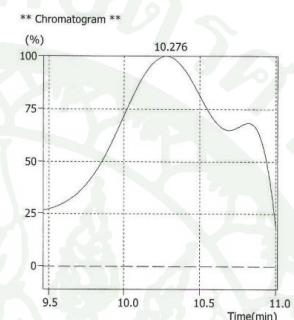
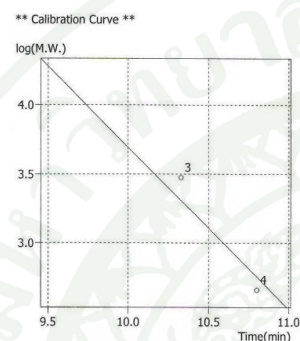
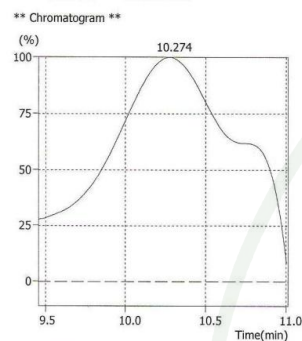
[Ave. Molecular Weight]	
Number-A.M.W.(Mn) :	1,888
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,850
Z-A.M.W.(Mz) :	4,458
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	6,519
Mw/Mn :	1.50960
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.56415



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]	
Number-A.M.W.(Mn) :	2,127
Weight-A.M.W.(Mw) :	3,326
Z-A.M.W.(Mz) :	5,288
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	7,699
Mw/Mn :	1.56398
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.58956

ภาพผนวกที่ ค7 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:1.8 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

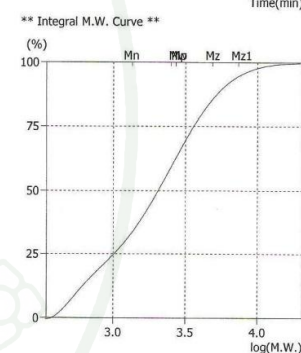
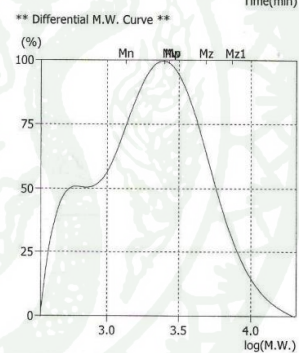
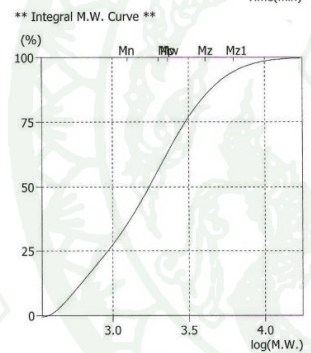
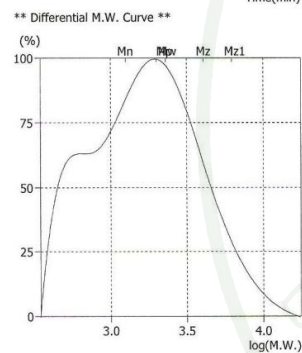
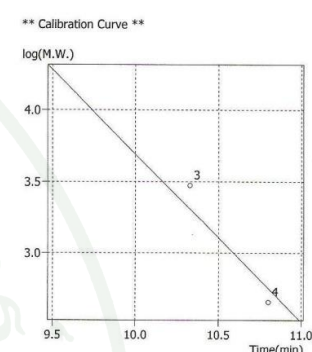
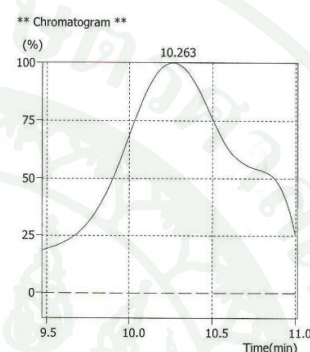
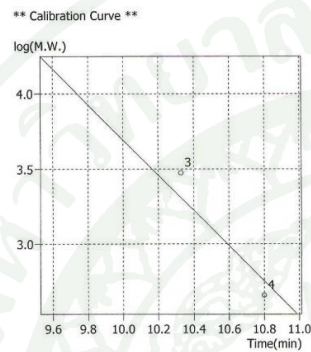
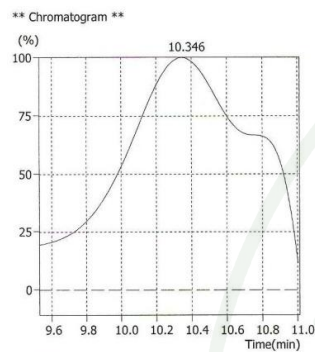
Number-A.M.W.(Mn) :	2,061
Weight-A.M.W.(Mw) :	3,260
Z-A.M.W.(Mz) :	5,324
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	7,987
Mw/Mn :	1.58118
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.63324

*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	2,109
Weight-A.M.W.(Mw) :	3,280
Z-A.M.W.(Mz) :	5,260
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	7,785
Mw/Mn :	1.55479
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.60391

ภาพผนวกที่ ค8 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.2 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.4 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

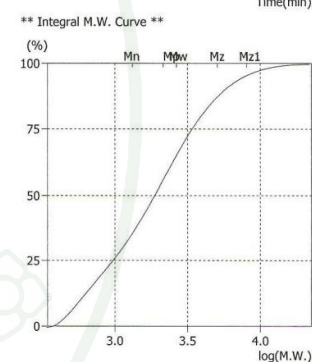
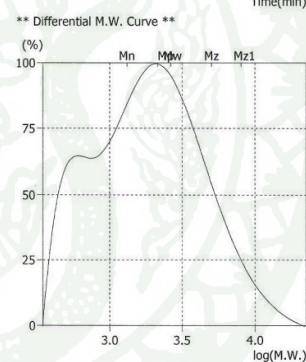
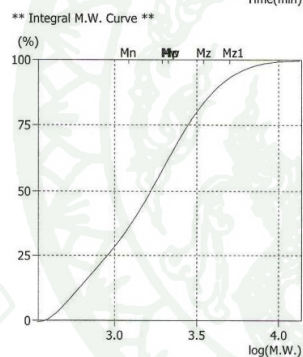
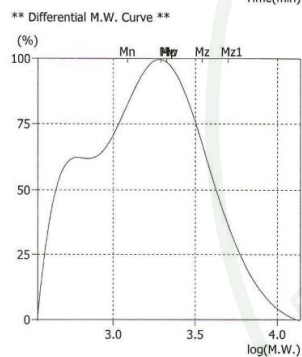
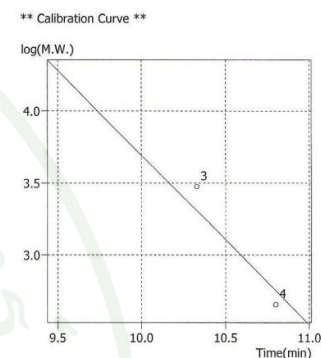
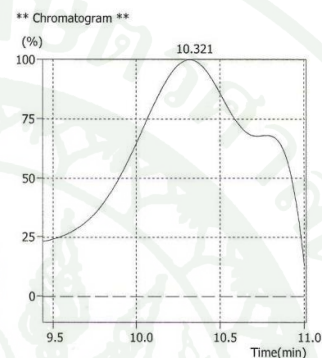
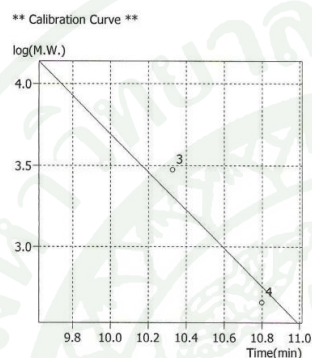
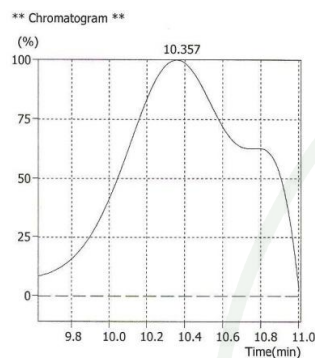
Number-A.M.W.(Mn) :	1,670
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,596
Z-A.M.W.(Mz) :	4,177
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	6,254
Mw/Mn :	1.55451
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.60889

*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	2,158
Weight-A.M.W.(Mw) :	3,255
Z-A.M.W.(Mz) :	5,059
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	7,410
Mw/Mn :	1.50804
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.55411

ภาพผนวกที่ ๑ ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนุภาคคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

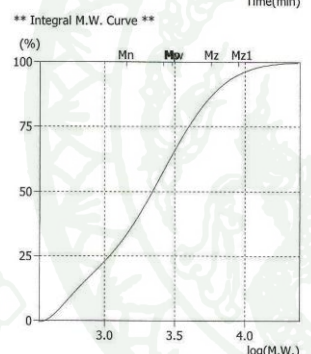
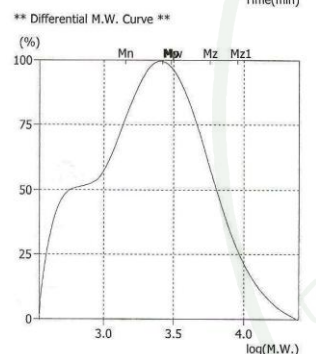
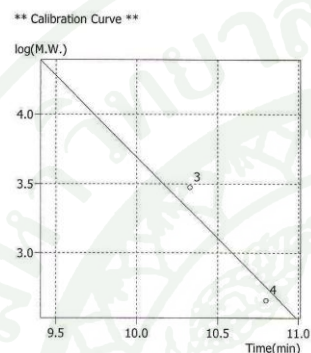
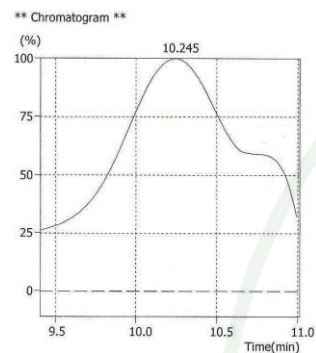
Number-A.M.W.(Mn) :	1,680
Weight-A.M.W.(Mw) :	2,430
Z-A.M.W.(Mz) :	3,596
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	5,044
Mw/Mn :	1.44662
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.47966

*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	1,915
Weight-A.M.W.(Mw) :	3,074
Z-A.M.W.(Mz) :	5,205
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	8,072
Mw/Mn :	1.60516
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.69332

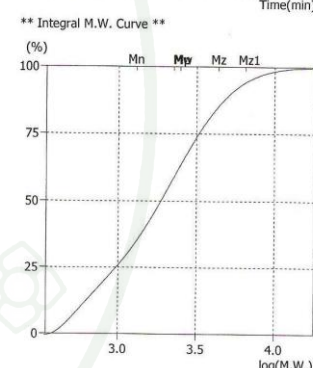
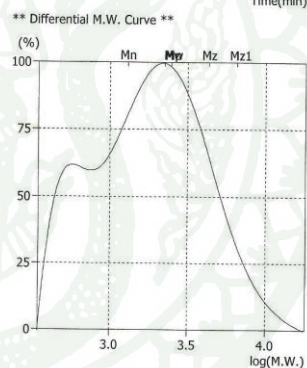
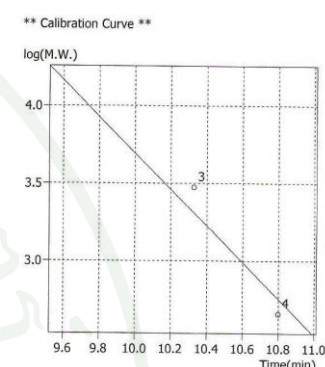
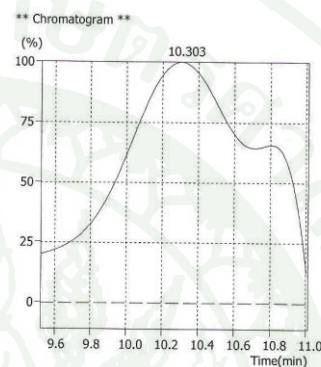
ภาพผนวกที่ ค10 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	2,223
Weight-A.M.W.(Mw) :	3,567
Z-A.M.W.(Mz) :	5,918
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	9,009
Mw/Mn :	1.60439
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.65909



*** Peak No.1 ***

[Ave. Molecular Weight]

Number-A.M.W.(Mn) :	2,256
Weight-A.M.W.(Mw) :	3,417
Z-A.M.W.(Mz) :	4,497
(Z+1)-A.M.W.(Mz1) :	6,551
Mw/Mn :	1.51469
Mv/Mn :	0.00000
Mz/Mw :	1.31605

ภาพผนวกที่ ค11 ผลการตรวจสอบมวลโมเลกุลเฉลี่ยของอนาคาร์ดิค-ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน อัตราส่วนโดยโมล 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และ 1.0:2.0 อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ 3%KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ ญัฐวัชต์ งามวงศ์น้อย
 เกิดวันที่ 22 กันยายน 2529
 สถานที่เกิด เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร
 ประวัติการศึกษา วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ตำแหน่งปัจจุบัน -
 สถานที่ทำงานปัจจุบัน -
 ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -
 ทู่นการศึกษาที่ได้รับ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง
 ทู่นวิจัยโครงการ IRPUS ประจำปีการศึกษา 2550
 ทู่นวิจัยโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (สกว.) ประจำปีการศึกษา 2553