

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้ประโยชน์ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์สำหรับอุตสาหกรรมยาง  
MICROCRYSTALLINE WAX FOR RUBBER INDUSTRY



นางสาวงามแก้ว พจน์โยธิน  
นางสาวศรัณยา คงโคตร

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **61973**  
วัน,เดือน,ปี **25 ก.พ. 2549**

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การใช้ประโยชน์ไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์สำหรับอุตสาหกรรมยาง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MICROCRYSTALLINE WAX FOR RUBBER INDUSTRY**



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2004**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง  
โดย

การใช้ประโยชน์ไมโครคริสตัลไลน์เวกซ์สำหรับอุตสาหกรรมยาง  
น.ส.ชามแก้ว พจน์โยธิน

อาจารย์ที่ปรึกษา

น.ส.ศรัณยา คงโคตร

ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร



.....ประธานกรรมการ  
(ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ  
(รศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)

.....กรรมการ  
(อ.รินฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การใช้ประโยชน์ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์สำหรับอุตสาหกรรมยาง
โดย	น.ส.ชามแก้ว พจนีโยธิน
	น.ส.ศรัณยา คงโคตร
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ปริญญาานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษา เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับแว็กซ์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมในกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานภายในประเทศ โดยนำตัวอย่างแว็กซ์มาศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติเปรียบเทียบกับไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับอุตสาหกรรมยางและเป็นการลดการนำเข้าผลิตภัณฑ์แว็กซ์จากต่างประเทศอีกทางหนึ่ง โดยนำตัวอย่างแว็กซ์จากโรงงานผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานภายในประเทศ มาทดสอบคุณสมบัติด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter) เพื่อศึกษาอุณหภูมิการหลอมเหลว และค่าความร้อนของการหลอมเหลว พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ในช่วง 40-60°C และค่าความร้อนการหลอมเหลวอยู่ในช่วง 110-160 จูลต่อกรัม สำหรับการประยุกต์ใช้ตัวอย่างแว็กซ์ในอุตสาหกรรมยางในโครงการนี้ได้นำตัวอย่างแว็กซ์ผสมสูตรกับยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบกับยางที่ผสมสูตรกับตัวอย่างแว็กซ์ในเชิงพาณิชย์ การผสมสูตรยางธรรมชาติกับสารเคมีต่างๆ ทำได้โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสองลูกกลิ้งโดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของแว็กซ์ที่ 9 และ 15 phr ตามลำดับ นำยางผสมสูตร (Compounded Rubber) ไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแบบแผ่นร้อนที่อุณหภูมิคงที่ 150°C เป็นเวลานาน 15 นาที (Curing) จากนั้นนำยางวัลคาไนซ์ (Vulcanize Rubber) มาศึกษาการแพร่ของแว็กซ์โดยอบแรงยางวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิคงที่ 40°C เป็นเวลานาน 36 ชม. และศึกษาสันฐานวิทยาของการแพร่ของแว็กซ์บนพื้นผิวยางวัลคาไนซ์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (SEM) เพื่อประมาณความหนาของชั้นแว็กซ์และอัตราการแพร่ (Blooming rate) ตามลำดับ

จากผลการทดลอง พบว่าความหนาของชั้นแว็กซ์ที่แพร่ออกมาเคลือบบนผิวของยางวัลคาไนซ์มีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.0-6.0 ไมครอน และพบว่าความหนาของชั้นแว็กซ์เพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแว็กซ์และเวลาในการอบแรงเพิ่มมากขึ้น โดยมีแนวโน้มความหนาคงที่ที่เวลาการอบแรงมากกว่า 36 ชม. อัตราการแพร่ของแว็กซ์ตัวอย่างสามารถแสดงได้โดยการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแว็กซ์ (Diffusion coefficient) จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแว็กซ์มีค่าอยู่ในช่วง  $10^{-8} - 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการแพร่ของแว็กซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางทั่วไป ความหนาของชั้นแว็กซ์ที่เคลือบบนผิวยางวัลคาไนซ์และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแว็กซ์ที่ได้จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างแว็กซ์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจากกระบวนการกลั่นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางได้

Report Title                      Microcrystalline Wax for Rubber Industry  
Student                              Miss Khamkaew Photyotin  
   Miss Saranya Kongkort  
Degree                                Bachelor Degree of Engineering  
Major                                 Chemical Engineering  
Year                                  2004  
Advisor                               Dr. Surat Areerat  
Report for                            Bachelor's Degree of Chemical Engineering  
   Department of Chemical Engineering  
   Faculty of Engineering  
   King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

#### Abstract

This research proposes a study of utilization of petroleum wax which is by-product from domestic lube base oil refinery process. Wax samples were determined in terms of their composition and characteristic which compared to the microcrystalline wax. Since microcrystalline wax is generally used in rubber industries, therefore by-product waxes would be applied for rubber industries which aims to replace imported wax. Wax samples were characterized by the differential scanning calorimeter (DSC) for melting temperature and heat of melting. From investigated results, it found that melting point range within 40 to 60 °C, and heat of melting range from 110 to 160 J/g. For investigation of applying by-product waxes, wax samples were compounded with natural rubber (NR) which aims to compare with commercial wax. Compounding of rubber chemical with NR was performed by two-roll mill mixer at given wax concentrations 9 and 15 phr, respectively. After that, the rubber compounds were cured by compression molding machine at constant temperature 150°C with curing time 15 min. Investigations of wax blooming rate of vulcanized rubber were done by oven accelerated test at constant temperature 40°C for 36 hrs duration. The morphology of wax blooming upon rubber surface was evaluated by scanning electron microscope (SEM). From SEM micrograph images, the thickness of blooming wax layer could be determined.

From experimental results, the thickness of blooming wax layers were approximated about 2.0-6.0 µm, wax layer thickness increases when wax concentration and duration time in oven increasing. The wax layer thickness trends to be constant when duration time over than 36 hrs. Wax blooming rate could be experimentally determined in term of diffusion coefficient. The diffusion coefficient for by-product waxes could be obtained with the range  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  cm<sup>2</sup>/s. From those resulted wax layer thickness and obtained diffusion coefficient which closes to be general wax blooming behavior for rubber industries therefore it could be implied that by-product waxes from the lube base refinery process can be applied for rubber industries.

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องนี้ สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณะอาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ทางทีมงานวิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือดังนี้ คือ บริษัท ไทยลูปเบส จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้สารตัวอย่างเพื่อนำมาใช้ในการทดลอง คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หน่วยงานต่างๆที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ ดังนี้

- เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
  - เจ้าหน้าที่กลุ่มวิเคราะห์เชิงเพอเลกซ์เคมี กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ กระทรวงพลังงาน
  - เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
  - คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรมและพอลิเมอร์เทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำตลอดมา

คณะผู้จัดทำ

นางสาวชามแก้ว พงษ์โยธิน

นางสาวศรัณยา คงโคตร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขต.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 ยาง.....	3
2.1.1 ประเภทของยาง.....	3
2.1.2 กระบวนการวัลคาไนเซชัน.....	4
2.1.3 สารเติมแต่งสำหรับยาง.....	4
2.1.4 ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ผสมยาง.....	5
2.1.5 การเสื่อมสภาพของยาง.....	7
2.1.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง.....	9
2.1.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไอโซเนชันของยาง.....	10
2.1.8 การเลือกใช้สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ.....	11
2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ยาง.....	13
2.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM).....	13
2.3 แวกซ์.....	14
2.3.1 ประเภทของปิโตรเลียมแวกซ์.....	14
2.3.2 ประโยชน์ของปิโตรเลียมแวกซ์.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊ส.....	15
2.4.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC).....	15
2.4.2 แก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS).....	17
2.4.3 เครื่องมือ จีโนมิก พีวีที.....	19
2.5 การรวมตัวของแก๊สและยาง.....	22
2.6 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่.....	23
บทที่ 3 การทดลอง.....	28
3.1 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา.....	28
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา.....	28
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา.....	28
3.4 วิธีการทดลอง.....	29
3.4.1 การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของแก๊ส.....	29
3.4.2 การผสมแก๊สลงในยาง.....	29
3.4.3 การขึ้นรูปยาง.....	30
3.4.4 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การแพร่ของแก๊สบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยาง..	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	31
4.1 การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของแก๊ส.....	31
4.1.1 การหาค่าคุณสมบัติของแก๊ส โดยใช้เทคนิค DSC.....	31
4.2 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การแพร่ของแก๊สในผลิตภัณฑ์ยาง.....	34
4.2.1 ลักษณะสัญญาณวิทยาของการแพร่ของแก๊สบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยาง..	34
4.2.2 การประมาณค่าอัตราการแพร่.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	44
5.1 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา.....	44
5.1.1 คุณลักษณะของตัวอย่างแก๊ส.....	44
5.1.2 การผสมระหว่างแก๊สและยาง.....	44
5.1.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊ส.....	45
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษา.....	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	46
ภาคผนวก ก.....	48
ภาคผนวก ข.....	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างกลไกการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง เปลี่ยนพันธะเชื่อมโยง พอลิซัลฟิดิกเป็นไมโนซัลฟิดิก.....	8
รูปที่ 2.2 กลไกการเสียหายของยางเนื่องจากไอโซน.....	11
รูปที่ 2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด.....	13
รูปที่ 2.4 เครื่องดีฟเฟอร์เรนเทียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	15
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผลที่ได้การวิเคราะห์ด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเทียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	16
รูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์หีบไตรเลียมแวกซ์ด้วยดีฟเฟอร์เรนเทียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์...	17
รูปที่ 2.7 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	17
รูปที่ 2.8 โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์พาราฟินแวกซ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี- แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	19
รูปที่ 2.9 เครื่องมือ จินอิมิก พีวีที.....	19
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ PVT ของ $C_{14}H_{30}$ .....	20
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ PVT ของ $C_{44}H_{90}$ .....	21
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ PVT ของ $C_{14}H_{30}$ และ $C_{44}H_{90}$ ที่ความดันแก๊ 0 MPa.....	21
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ PVT ของ $C_{14}H_{30}$ และ $C_{44}H_{90}$ ที่ความดันแก๊ 80 MPa.....	22
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\lambda_{\infty}$ และ $\left(\frac{d\lambda}{dy}\right)_0$ ที่ได้จากกรอินทิเกรต สมการที่ 2.15.....	27
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแวกซ์ SLW 150BS ด้วยเครื่อง DSC .....	31
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแวกซ์ SLW 500N ด้วยเครื่อง DSC .....	32
รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของแวกซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ 9 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ในระยะเวลาต่างๆ.....	34
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของแวกซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ 15 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ในระยะเวลาต่างๆ.....	35

## สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของแวกซ์ SLW 150 BS 9 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ในระยะเวลาต่างๆ.....	35
รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของแวกซ์ SLW 150 BS 15 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ในระยะเวลาต่างๆ.....	36
รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของแวกซ์ SLW 500 N 15 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ในระยะเวลาต่างๆ.....	36
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของแวกซ์ SLW 500 N 15 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ใน ระยะเวลาต่างๆ.....	37
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบยางและความหนาของชั้นแวกซ์ ที่เกิดขึ้นจากการผสมแวกซ์ปริมาณ 9 phr.....	37
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบยางและความหนาของชั้นแวกซ์ ที่เกิดขึ้นจากการผสมแวกซ์ปริมาณ 15 phr.....	38
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบความหนาของชั้นแวกซ์ เมื่อตัวอย่างแวกซ์ SLW 500N ที่ผสมลงในยางมีความเข้มข้นของแวกซ์ต่างกัน.....	39
รูปที่ 4.12 อัตราการแพร่ของแวกซ์แต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นแวกซ์ 9 phr และที่อุณหภูมิอบคงที่ 40°C.....	40
รูปที่ 4.13 อัตราการแพร่ของแวกซ์แต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นแวกซ์ 15 phr และที่อุณหภูมิอบคงที่ 40°C.....	40
รูปที่ 4.14 อัตราการแพร่ของแวกซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่แพร่ออกมา เมื่อ อุณหภูมิอบคงที่ 40°C ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน.....	41
รูปที่ 4.15 อัตราการแพร่ของแวกซ์ SLW 150BS ที่แพร่ออกมา เมื่อ อุณหภูมิอบคงที่ 40°C ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน.....	41
รูปที่ 4.16 อัตราการแพร่ของแวกซ์ SLW 500N ที่แพร่ออกมา เมื่ออบที่ อุณหภูมิคงที่ 40°C ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน.....	42

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของพาราฟินแวกซ์ และไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์.....	14
ตารางที่ 2.2 จำนวนคาร์บอนอะตอมของนอร์มอลอัลเคนที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ในการต่อต้านไอโซน ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	23
ตารางที่ 3.1 สูตรการผสมพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง.....	29
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแวกซ์ ที่วัดได้จากเครื่อง DSC.....	33
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ในช่วงเริ่มต้นที่ได้จากการคำนวณตาม สมการที่ 2.18.....	43



## สัญลักษณ์

$phr$	1phr คือ หนึ่งในส่วนในยาร้อยส่วน	
$ppm$	หนึ่งในส่วนในล้านส่วน	
$T$	อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใด ๆ	$^{\circ}C$
$T_m$	อุณหภูมิจุดหลอมเหลว	$^{\circ}C$
$M_i$	ปริมาณของแว็กซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยาง ต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย	$mg/cm^2$
$d$	ความหนาของชั้นแว็กซ์	$cm$
$t$	เวลาที่ใช้ในการอบ	$s$
$w_0$	ความเข้มข้นของแว็กซ์ ณ จุดเริ่มต้น	$g/cm^2$
$s_0$	ค่าความสามารถในการละลายของแว็กซ์ในยาง	$g/cm^2$
$D$	ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่	$cm^2/s$
$\pi$	ค่าคงที่เท่ากับ 3.14	
$D_T$	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางเทอร์โมไดนามิกส์	$cm^2/s$
$F$	Free-energy gradient	
$c$	ความเข้มข้นของแว็กซ์ที่เกิดการแพร่	$g/cm^3$
$x$	ระยะทางการแพร่	$cm$
$\mu$	ค่าศักย์ทางเคมีต่อโมล	$J/mol$
$p$	ค่าความเค้นอีลาสติก	$N/cm^2$
$V$	ปริมาตรเป็นโมลาร์ของแว็กซ์	$mol/cm^3$
$\lambda$	เป็นตัวแปรทางกายภาพที่ใช้อธิบายการขยายตัวของเนื้อยางเพื่อให้เกิดการแพร่ผ่านของแว็กซ์	
$G$	ค่าโมดูลัสของแรงเฉือน	$N/cm^2$
$n$	จำนวนของเม็ดทรงกลมของแว็กซ์ต่อ ปริมาตร 1 ลูกบาศก์หน่วย ที่รัศมีของแว็กซ์เริ่มต้น	
$r_0$	รัศมีของแว็กซ์ที่จุดเริ่มต้น	$cm$
$\rho_w$	ความหนาแน่นของแว็กซ์	$g/cm^3$
$f$	สัญลักษณ์แทนค่า $n\left(\frac{4}{3}\right)\pi\rho_w r_0^3$	

## สัญลักษณ์ ( ต่อ )

$\lambda_{\infty}$	เป็นตัวแปรทางกายภาพที่ใช้อธิบายการขยายตัวของเนื้อเยื่อเพื่อให้เกิดการแพร่ผ่านของแก๊ซที่สภาวะอนันต์	
$c_{\infty}$	ค่าความเข้มข้นของแก๊ซที่เหลื่ออยู่ในยาง	$g/cm^3$
$c_0$	ค่าความเข้มข้นของแก๊ซเริ่มต้น	$g/cm^3$
$c$	ค่าความเข้มข้นของแก๊ซที่แพร่ออกมาที่ระยะเวลาอบ 36 ชม.	$g/cm^3$
$A$	พื้นที่หน้าตัด	$cm^2$
$m_0$	น้ำหนักของตัวอย่างยางเริ่มต้น	$g$
$m$	น้ำหนักของตัวอย่างยางที่ผสมกับแก๊ซ	$g$
$V_{Rb}$	ปริมาตรของตัวอย่างยางที่ผสมแก๊ซ	$cm^3$
$\rho_{Rb}$	ความหนาแน่นของยางที่ผสมแก๊ซแล้ว	$g/cm^3$
$\delta$	ความหนาของตัวอย่างยาง	$cm$
$\psi_w$	ปริมาณแก๊ซที่ออกมาเคลือบบนผิวของยาง	$g$
$M_{t,\infty}$	ปริมาณของแก๊ซที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย ที่สภาวะอนันต์	$g/cm^2$
$\psi_{\infty}$	ปริมาณแก๊ซที่เหลื่ออยู่ในตัวอย่างยาง	$g$
$\psi_i$	ปริมาณแก๊ซที่มีในตัวอย่างยางตอนเริ่มต้น	$g$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบัน กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในประเทศ ได้มีปริมาณผลิตภัณฑ์ร่วมประเภทแว็กซ์เป็นจำนวนมาก ซึ่งยังไม่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า และจากการวิเคราะห์ในเบื้องต้น พบว่า ผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจัดเป็นปิโตรเลียมแว็กซ์ (Petroleum Wax) ซึ่งมีจำนวนคาร์บอนอะตอมในช่วง 10-50 อะตอม โดยทั่วไปพบว่าผลิตภัณฑ์ร่วมที่เกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์แว็กซ์ที่ผสมกันในหลากหลายโครงสร้าง เช่น พาราฟินแว็กซ์ และบางส่วนจัดเป็นแว็กซ์ประเภทไมโครคริสตัลไลน์ (Microcrystalline) ซึ่งในกระบวนการผลิตปัจจุบัน ยังไม่มีการวิเคราะห์ลงไปในรายละเอียดถึงองค์ประกอบและคุณสมบัติภายในของแว็กซ์ประเภทนี้ รวมถึงประโยชน์และการนำไปใช้ โดยทางผู้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานต้องการที่จะเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากกระบวนการผลิตให้มีราคาสูงขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มผลกำไรให้แก่ทางผู้ผลิต และเนื่องจากในปัจจุบันนี้ ประเทศไทยยังมีการนำเข้าไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ และแว็กซ์อื่นๆ ในปริมาณมาก โดยนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยาง เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางกับโอโซน ซึ่งจะทำให้ยางเสื่อมคุณภาพและเกิดการสึกกร่อน จากสถิติของกรมศุลกากร พบว่าในปี 2547 มีการนำเข้าแว็กซ์ประมาณ 15,800 ตันต่อปี ด้วยมูลค่าประมาณ 980 ล้านบาท ดังนั้น จึงได้ทำวิจัยเป็นโครงการในหัวข้อ การใช้ประโยชน์ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์สำหรับอุตสาหกรรมยาง (Microcrystalline Wax for Rubber Industry) เพื่อที่จะนำแว็กซ์มาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งในอุตสาหกรรมยาง ช่วยลดปริมาณการนำเข้าและเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ร่วมจากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของแว็กซ์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน
2. เพื่อศึกษาอัตราการแพร่ของแว็กซ์ในช่วงเริ่มต้นที่แพร่ขึ้นมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง
3. เพื่อที่จะนำแว็กซ์ประเภทไมโครคริสตัลไลน์ มาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยาง

### 1.3 ขอบเขต

1. ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของตัวอย่างแว็กซ์ที่ใช้ในการผสมกับยาง โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี (Differential Scanning Calorimetry: DSC)
2. ทำการทดลองผสมตัวอย่างแว็กซ์กับยางที่สัดส่วนต่างๆ กัน โดยใช้เครื่องบดยาง 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)
3. ศึกษาปรากฏการณ์การแพร่ของแว็กซ์ที่แพร่ออกมาเคลือบบนพื้นผิวของยางหลังจากที่ได้ทำการผสมยางกับตัวอย่างแว็กซ์

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์และยาง
2. ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของตัวอย่างแว็กซ์ทั้ง 2 ชนิด และผลการทดลองเบื้องต้น
3. ทดลองผสมตัวอย่างแว็กซ์กับยางที่สัดส่วนต่างๆ กัน
4. ศึกษาปรากฏการณ์การแพร่ของแว็กซ์บนพื้นผิวของยางหลังจากที่ได้ผสมยางกับแว็กซ์
5. สรุปผลการดำเนินงาน

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีมูลค่าสูงขึ้น
2. ลดการนำเข้าไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์จากต่างประเทศ
3. สามารถนำไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์นี้มาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยางได้

## บทที่ 2

## ทฤษฎี

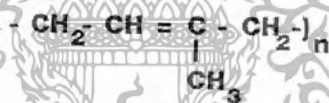
### 2.1 ยาง (Rubber) [2-4]

เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติยืดหยุ่นได้ทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ ยางพารา เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ใช้กันมานาน น้ำยางสดจากต้นยางมีลักษณะข้นขาว คล้ายน้ำนม มีสารหลายชนิดผสมอยู่ ทิ้งไว้นานจะบูดเน่า ถ้าต้องการเก็บไว้นานๆ จะต้องเติมแอมโมเนียลงไปเพื่อเป็นสารกันบูด การแยกเนื้อยางทำได้โดยเติมกรดแอซิดิก หรือฟอริกเจือจาง เพื่อจับเนื้อยางให้เป็นตะกอนแยกออกมา

#### 2.1.1 ประเภทของยาง

ยางแบ่งลักษณะการเกิดเป็น 2 ชนิด คือ

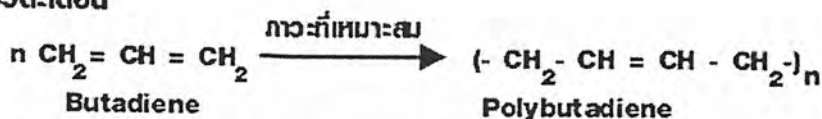
1. ยางธรรมชาติ เป็นพอลิเมอร์ไอโซพรีน ประกอบด้วยมอนอเมอร์ไอโซพรีนต่อเชื่อมในช่วงระหว่าง 1,500 – 15,000 หน่วย



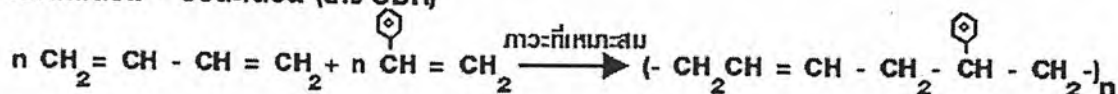
สมบัติ มีความยืดหยุ่น เพราะโครงสร้างโมเลกุลของยางมีลักษณะม้วนงอขดไปมาบิดเป็นเกลียวได้ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ สมบัติเปลี่ยนง่าย คือ เมื่อร้อนจะอ่อนตัวเหนียว และเมื่อเย็นจะแข็งและเปราะ เหมาะกับงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานที่มีการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร หรือใช้รองรับน้ำหนักงานทุกประเภท เช่น ยางแท่นเครื่องในรถยนต์ ยางปีกนก ยางกันโคลง ยางรองแผ่นวงจรถอเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

2. ยางสังเคราะห์ เกิดในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง เนื่องจากยางธรรมชาติเกิดการขาดแคลน จึงมีการสังเคราะห์ยางขึ้นมาใช้ทดแทนชนิดแรก คือ พอลิบิวตะไดอีน (Polybutadiene) โดยใช้บิวตะไดอีน (Butadiene) เป็นมอนอเมอร์ เมื่อนำมาผ่านการวัลคาไนซ์ จะได้ยางที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางธรรมชาติ

### พอลิบิวตะไดอีน



### พอลิซิสไตรีน - บิวตะไดอีน (ยาง SBR)



#### 2.1.2 กระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization)

คือ กระบวนการที่ใช้ในการเพิ่มคุณภาพของยางธรรมชาติ (ยางดิบ) ให้มีความยืดหยุ่นได้ดีขึ้น มีความคงตัวสูง ไม่สึกกร่อนง่าย และไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ สมบัติเหล่านี้จะยังคงอยู่ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงก็ตาม โดยนำยางมาทำปฏิกิริยากับกำมะถันในปริมาณที่พอเหมาะ ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถัน โดยกำมะถันที่เติมลงไปจะเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างโซ่ของพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene)



#### 2.1.3 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additives for Rubber) [5]

สารเติมแต่งสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่างๆ ที่ผสมลงไปนยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมแล้วไม่อาจใช้งานได้เว้นแต่สารเคมีเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับยางก่อน ซึ่งสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีเรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้วเรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanized rubber หรือ Cured rubber) ซึ่งสามารถจำแนกสารต่างๆ ที่ใช้ในการผสมยาง ได้ดังนี้

1. สารที่ทำให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซิง (Vulcanizing agent) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (Crosslink) ตรงตำแหน่งที่วงไวต่อปฏิกิริยา ได้แก่ สารกำมะถัน สารที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน และสารเพอร์ออกไซด์
2. สารเร่ง (Accelerator) ได้แก่ สารเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดช้า ปานกลาง หรือเร็ว เช่น กัวนีนีน (Guanidine) ไธอาโซล (Thiazole) ซัลฟีนามาไมด์ (Sulphenamide) และ ไธยูราม (Thiuram)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สารกระตุ้น หรือ สารเสริมตัวเร่ง (Activator) เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ ยางให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้ประสิทธิภาพมากขึ้น เร่ง อัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นโดยทำให้ยางมีค่า โมดูลัสสูงขึ้น ได้แก่ กรดสเตียริก (Stearic acid) และ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

4. สารตัวเติม (Filler) เป็นสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อลดต้นทุนในการ ผลิตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น พวงเขม่าควัน (Carbon black) แคลเซียม คาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ซิลิกา (Silica) เป็นต้น

5. สารช่วยในการแปรรูปของยาง หรือ สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นสาร ที่ทำให้ยางนิ่ม ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

(1) สารที่ทำให้ยางนิ่มทางเคมี (Chemical Plasticizer) เป็นสารเคมีที่เมื่อใส่เข้าไปใน ยางจะทำให้ยางนิ่ม และลดเวลาของการบดยางลง ในการใช้งานส่วนใหญ่จะใส่สารเคมีประเภทนี้ ลงไปเมื่อเริ่มต้นการผสมหรือบดในเครื่องบด 2 ลูกกลิ้งและปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากับยางเป็น เวลาสั้นๆ ก่อนที่จะใส่สารอื่นลงไป ได้แก่ กรดซัลโฟนิค (Sulphonic acid) และ ซิลิล เมอร์แคปแทน (Xylyl mercaptan)

(2) สารที่ช่วยให้นิ่มโดยทางกายภาพ (Physical Plasticizer) เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ที่ใส่เข้าไปแล้ว จะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลของยางให้เคลื่อนไหวได้ง่าย ยางนิ่มลง แปรรูปได้ง่ายขึ้น สารที่สำคัญได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม และ น้ำมันเอสเทอร์

6. สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agent) ได้แก่ สารต้านทานปฏิกิริยา ออกซิเดชัน (Antioxidant) หรือสารต้านปฏิกิริยาโอโซน (Antiozonant) ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดจะทำให้ ยางมีอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ยางยาวขึ้น

7. สารพิเศษอื่น ๆ (Miscellaneous ingredient) ไม่ได้ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องใช้สำหรับ ยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปในยางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบาง ประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) และ สารหน่วง (Retarder)

#### 2.1.4 ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ผสมกับยาง [6-11]

1. เตตระเมทิลไธยูเรมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl Thiuram Disulfide:  $C_6H_{12}N_2S_4$ , TMTD) มีลักษณะเป็นฝุ่นผงสีขาว หรือสีเทา สามารถละลายได้ในเบนซิน อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม และสามารถละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์ แต่ไม่สามารถละลายในน้ำได้ เหมาะกับการนำไปใช้ เป็นตัวเร่งการเกิดวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ซึ่งเป็นตัวเร่งที่ดีเป็นอันดับสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รองจากไธอาโซล (Thiazole) ซึ่งเตตระเมทิลโรยู-แรมไดซัลไฟด์จะเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ให้เกิดได้ต่อเนื่อง

2. ไตเบนโซไธโซลไดซัลไฟด์ (Dibenzothiazole Disulfide: MBTS) มีลักษณะเป็นฝุ่นผง มีสีเหลืองออกสว่าง หรือสีเทาอ่อนเกือบขาว ไม่เป็นพิษ สามารถละลายได้ในคลอโรฟอร์ม ละลายได้เล็กน้อยในเบนซิน เอทิลแอลกอฮอล์และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ แต่ไม่สามารถละลายในก๊าซโซลีน น้ำ และเอทิลอะซิเตต โดยทั่วไปจะใช้กับยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ทั่วไป ซึ่งจะไปใช้ประโยชน์โดยใช้ทำยางรถยนต์ ท่อส่งน้ำที่ทำจากยาง ทำยางรองเท้า ซึ่งนำมาเป็นสารเติมแต่ง และช่วยยืดอายุการใช้งานของยางได้ด้วย

3. ไททาเนียมออกไซด์ (Titanium Dioxide:  $TiO_2$ ) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายในน้ำ ไม่เป็นพิษ มีเสถียรภาพทางเคมีสูงที่สุด สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกอน และอะลูมินา กลายเป็นสารประกอบได้ และอาจปรับปรุงคุณสมบัติได้โดยเปลี่ยนเป็นสารประกอบอินทรีย์ ที่มีคุณสมบัติเป็นสีย้อมได้ดี เช่น ทำเป็นสารสีขาว ทำให้เงามัน เป็นต้น ในอุตสาหกรรมยางจะใช้เป็นตัวเพิ่มสีให้กับยาง โดยจะให้สารสีขาวกับยางทำให้ยางมีสีขาวขึ้น

4. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate,  $CaCO_3$ ) เป็นสารตัวเติมสีขาวเกิดจากการสะสมตะกอนเป็นเวลานานเช่นซากเปลือกหอยต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบสำคัญของเปลือกโลก แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเนื้อที่นิยมใส่ผสมพอลิเมอร์ เพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น พลาสติก ยาง สี กระจก ดินเหนียว กาว พรม ฯลฯ อาจารย์จักแคลเซียมคาร์บอเนตในหลายชื่อ เช่น หินปูน (Limestone) หินอ่อน (Marble) แคลไซต์ (Calcite) ชอล์ค (Chalk) อะราโกไนต์ (Aragonite) โดโลไมต์ (Dolomite,  $CaCO_3/MgCO_3$ ) เปลือกหอย (Shell) และสารสีขาว (Whiting) แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นหนึ่งในสารตัวเติมที่นิยม เนื่องจากมีความขาว (Whiteness) สมบัติเสียดทาน (Abrasion) ต่ำ มีหลายชนิดให้เลือก และมีราคาถูก แต่มีข้อจำกัด คือ มีความหนาแน่นสูง (ประมาณ 2.72 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ไม่ทนกรด ไม่สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่สัมผัสกับกรดได้ เนื่องจากจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) จากการทำปฏิกิริยากับกรด แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ มักจับตัวเป็นก้อน จึงนิยมใช้เป็นสารช่วยกระจายตัวของกรดสเตียริก (Stearic acid) มาเคลือบสารตัวเติม เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในยาง ฉะนั้นจึงนิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มปริมาณ หรือเพื่อลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว

5. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide,  $ZnO$ ) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีความหนาแน่น 5.6 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีความแข็ง (Mohs hardness) เท่ากับ 4+ มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 0.2 ไมครอน (อาจแตกต่างกันขึ้นกับสภาวะในการเตรียม) และมีการดูดซับน้ำมันเท่ากับ 10-25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการนำไปใช้กับพอลิเมอร์ ส่วนใหญ่ใช้เป็นสารดูดกลิ่นแสงยูวี เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน เพิ่มความแข็ง และช่วยป้องกันการทำลายจากจุลินทรีย์

6. โลวิลไลท์ (Lowilite) เป็นสารที่เติมแต่งในพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ได้เติมเข้าไปเพื่อให้พอลิเมอร์สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเป็นตัวดูดกลิ่นแสงยูวี นอกจากนี้ ยังนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความเสถียรภาพในกระบวนการผลิตโพลีโอลิฟิน

7. ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate, ZnSt) เกิดจากการผสมระหว่าง ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ร่วมกับ กรดสเตียริก (Stearic acid) ซึ่งสามารถละลายได้ในยางและช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน (Zinc ions) ที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยเกิดเป็นสารเร่งซ้อนกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) ทำให้สารเร่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น มีอัตราเร็วของการเชื่อมโยงสูงขึ้น เวลาเชื่อมโยงลดลง และยังช่วยในสมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงดีขึ้น เนื่องจากมีราคาไม่แพง และมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน ซึ่งสามารถละลายได้ในยางและช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงเนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน (Zinc ions) ที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

#### 2.1.5 การเสื่อมสภาพของยาง (Degradation of rubber) [9]

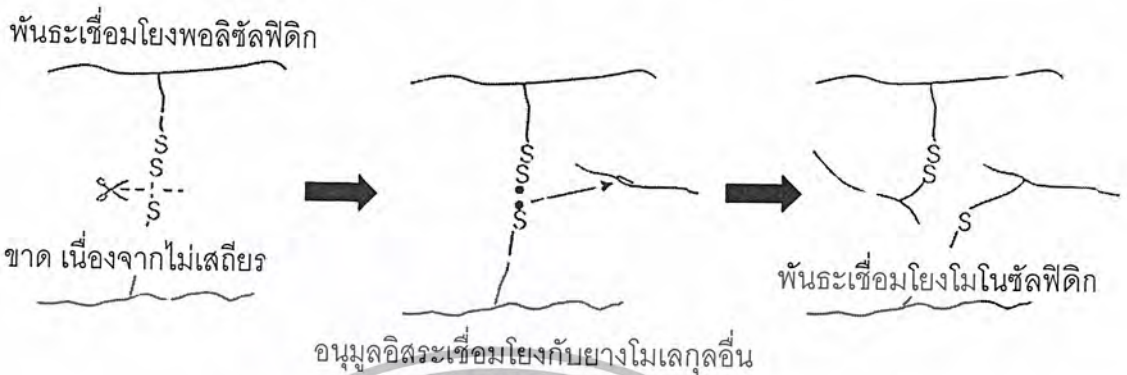
ช่วงอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยาง เกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) มากขึ้นตามอายุการใช้งาน การเสื่อมสภาพมีความสำคัญและเกิดขึ้นมาก โดยเฉพาะยางที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางเอสบีอาร์ (SBR) ยางไอโซพรีน (IR) ยางบีอาร์ (BR) เป็นต้น ยางเหล่านี้มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่หลัก เป็นที่ทราบกันดีว่าพันธะคู่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับออกซิเจน และโอโซนในบรรยากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และโอโซนเนชัน (Ozonation) ตามลำดับ เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยาง นอกจากนี้ ปฏิกิริยาของการเสื่อมสภาพของยางสามารถถูกเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความร้อน สิ่งปนเปื้อนจำพวกโลหะหนัก กำมะถัน แสง ความชื้น การบวมตัวเนื่องจากน้ำมัน และตัวทำละลาย และความล้าเนื่องจากการฉีก เป็นต้น

การเสื่อมสภาพของยาง เกิดการเปลี่ยนแปลง 2 แบบ คือ

1. การเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง (Cross-linking) คือ การเสื่อมสภาพที่ทำให้เกิดอนุภาคนิวเคลียสบนสายโซ่ แล้วเกิดการเชื่อมต่อเป็นพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic crosslink) แล้วเชื่อมโยงใหม่เป็นพันธะเชื่อมโยงแบบโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic crosslink) หลากๆ พันธะ ดังรูปที่ 2.1 เป็นผลให้ยางมีความแข็ง (Hardness) เพิ่มขึ้น ความทนทานต่อการล้าลดลง เปราะ หักง่ายขึ้น ยางที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวโน้มจะแสดงกลไกการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง ได้แก่ ยางเอสบีอาร์ (SBR) ยางอีพีดีเอ็ม (EPDM) ยางไนไตรล์ (NBR) และยางคลอโรพรีน (CR)



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างกลไกการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง เปลี่ยนพันธะเชื่อมโยงพอลิซัลไฟดิกเป็น โมโนซัลไฟดิก [9]

2. การเสื่อมสภาพแบบสายโซ่ขาด (Chain scission) คือ การที่สายโซ่พอลิเมอร์ขาดออกจากกัน เป็นผลให้ยางนิ่มขึ้น มีความแข็งลดลง ความต้านทานการเสียดสีขัดถูลดลง ความหนืดลดลง เนื่องจากความยาวของสายโซ่โมเลกุลสั้นลง ถ้าเสื่อมสภาพมากอาจเหลวเหนียวติดวัสดุข้างเคียง ยางที่เกิดการเสื่อมสภาพแบบนี้ ได้แก่ ยางธรรมชาติ (NR) และยางไอโซพรีน (IR)

การป้องกันต่อต้านการเสื่อมสภาพเพื่อยืดอายุการใช้งานยาง สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การเลือกชนิดยาง (ใช้ยางที่อึดตัวหรือยางผสม) การเลือกระบบเชื่อมโยง และการใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradant)

การเลือกใช้ระบบเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มที่จะได้ยางที่ทนทานกว่า เกิดการเสื่อมสภาพน้อยกว่า เนื่องจากไม่มีกัมมะถันที่อาจเร่งการเสื่อมสภาพ และการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bonds) มีเสถียรภาพที่ดีกว่าการเชื่อมโยงจากอะตอมของกำมะถัน การใช้ระบบเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพหรือ "อีวี" (Efficient vulcanization, EV) ซึ่งใช้กำมะถันปริมาณน้อย (0.0 - 0.03 phr) ใช้ตัวเร่งปริมาณมาก หรือใช้ตัวเร่งชนิดกำมะถัน (Sulfur donor accelerator) จะเชื่อมโยงได้อย่างที่มีเสถียรภาพทางความร้อน ต้านทานการเสื่อมสภาพทางความร้อน และต้านทานต่อการเชื่อมโยงแบบปกติ (Conventional vulcanization) แม้จะทนต่อความร้อนและการเสื่อมสภาพน้อยกว่า แต่จะมีความทนทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ได้ดีกว่า เนื่องจากการใช้กำมะถันปริมาณมากทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิก (Polysulfidic crosslink) สำหรับการเชื่อมโยงแบบ "เซมิอีวี" (Semi-EV system) เป็นระบบเชื่อมโยงกึ่งกลาง

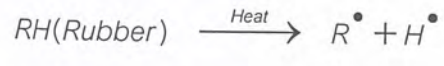
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกรค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างระบบอีวี และการเชื่อมโยงแบบปกติ จะทำให้ได้ยางที่มีเสถียรภาพทางความร้อน และต้านทานต่อการเสื่อมสภาพปานกลาง แต่ยังมีสมบัติความทนทานต่อการล้าดีอยู่

2.1.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง

กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางที่ไม่อิมตัวเกิดผ่านอนุมูลอิสระที่สามารถเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเอง (Autocatalytic) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. ปฏิกิริยาขั้นต้น (Initiation)



2. ปฏิกิริยาขั้นขยาย-ต่อเนื่อง (Propagation)



3. ปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุด (Termination)

การเริ่มปฏิกิริยาขั้นต้นของการเสถียรภาพของยางจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เริ่มโดยการเกิดหน่วยที่มีอนุมูลอิสระ เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ (RH) เกิดการแตกออกในระหว่างกระบวนการผลิต อาจได้รับแรงเค้น หรือได้รับอุณหภูมิสูง เมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ขาดแล้วสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นยางเปอร์ออกไซด์ (ROO•) ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่อื่น เกิดเป็นยางที่มีหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) และยางที่มีอนุมูลอิสระ (R•) ปฏิกิริยาอื่นๆที่แสดงเป็นปฏิกิริยาช่วยเร่งการเกิดออกซิเดชันด้วยตัวเอง (Autoxidation) ถ้าวัสดุยางได้รับแสงยูวี ยางที่มีหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ROOH) อาจแตกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์อนุมูลอิสระอื่นๆ (RO•

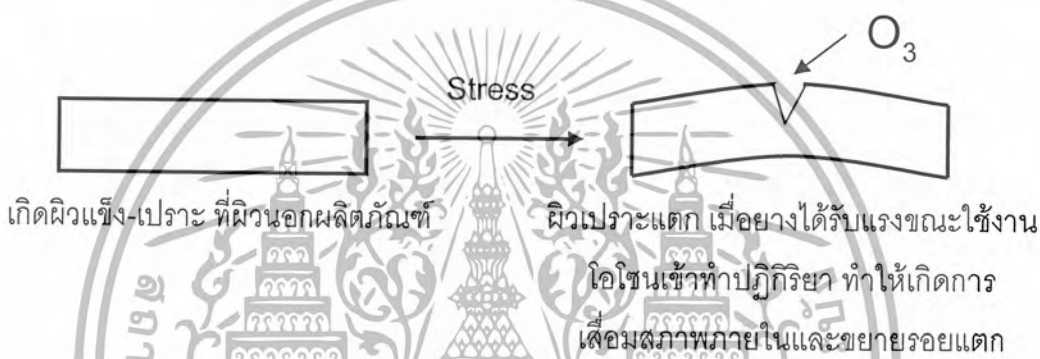
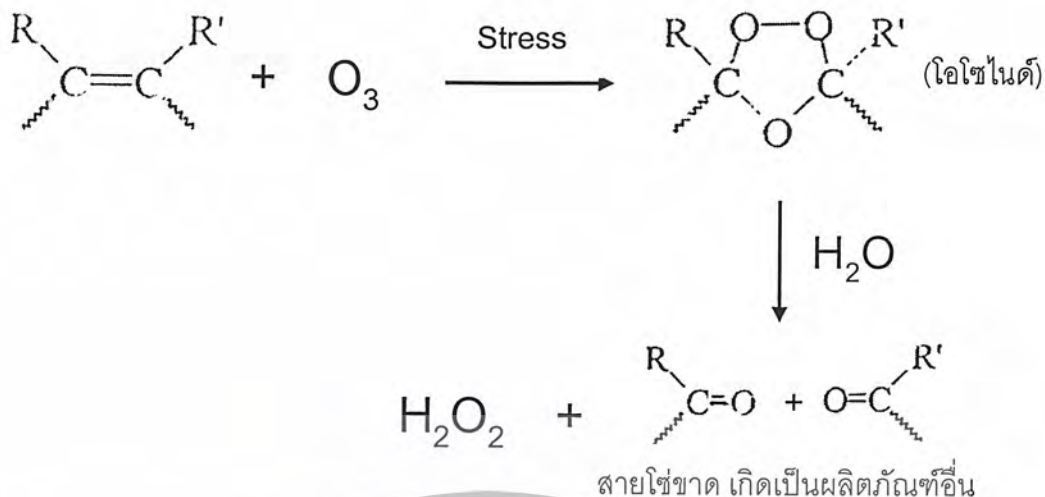
$ROO^{\bullet}, \bullet OH$ ) ทำให้ยางเกิดการเสถียรภาพจากการออกซิเดชันเร็วขึ้น ปฏิกริยานี้สิ้นสุดได้โดยสายโซ่ยางที่อนุมูลอิสระ 2 ตัวเจอกัน เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง ( $R-R$  or  $ROOR$ ) หรือเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเสถียรภาพไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้

แสงยูวีจะเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันจากอนุมูลอิสระ โดยเฉพาะที่ผิวนอกที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (แสงอาทิตย์) เกิดเป็นชั้นของยางออกซิไดซ์ที่เสื่อมสภาพ ความร้อนและความชื้นสามารถก่อให้เกิดการแตกที่ผิวนอก ยางที่มีสีไม่ดำจะเกิดการเสื่อมสภาพที่ผิวนอกมากกว่ายางสีดำผสมเขม่าดำ เนื่องจากสีดำมีความสามารถในการป้องกันการทะลุผ่านของแสง (Tinting strength) สูงกว่า

โลหะหนัก เช่น เหล็ก แมงกานีส และทองแดง สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง สารผสมในยางที่เป็นสารกระตุ้นจำพวกเกลือของโลหะเหล่านี้ เช่น โอลิเอต และสเตียเรต จะเกิดการเสื่อมสภาพง่าย เนื่องจากโลหะอยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง ดังนั้น ควรใช้สารต่อต้านการเสื่อมสภาพจำพวกพีนินไดเอมีน (para-Phenylenediamine: PPD) ผสมในยางเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโลหะเหล่านี้

### 2.1.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโอโซนเนชั่นของยาง

สาเหตุใหญ่ประการหนึ่งที่ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากการแตกที่ผิว (Surface crack) ของผลิตภัณฑ์ยาง การขยายของรอยแตกจะเพิ่มขึ้นเมื่อยางได้รับแรงซ้ำๆ (Cyclic loads) การดัด หรือการพับ (Flexing) ทำให้เกิดการเสถียรภาพเนื่องจากการดัด รอยแตกจะเริ่มเกิดที่บริเวณที่ได้รับแรงเค้นสูง และเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน (Ozonation) โอโซนในอากาศปริมาณเพียงเล็กน้อย (ระดับไม่กี่ส่วนในล้านส่วน: ppm) ก็สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของยางที่ไม่อิ่มตัวได้ เกิดโครงสร้างเป็นวงของโอโซนไนด์ (Ozonide) ดังรูปที่ 2.2 โครงสร้างที่เป็นวงของโอโซนไนด์นี้สามารถแตกออกได้ง่ายภายใต้ความเครียด (Strain) ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ (Chain cleavage) และน้ำหนักโมเลกุลของยางลดลง



รูปที่ 2.2 กลไกการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากไอโซน

2.1.8 การเลือกใช้สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นต้องมีการผสมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradant) ลงไปในยาง เพื่อเป็นการป้องกันการเสียหายและเพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้นไป การเลือกใช้สารป้องกันยางเสื่อมสภาพขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น

- การเปลี่ยนสี (Discoloration หรือ Staining) สำหรับยางสีอ่อนควรใช้สารที่ไม่เปลี่ยนสี ส่วนผลิตภัณฑ์ยางดำไม่จำเป็นต้องระวังเรื่องการเปลี่ยนสี อาจใช้สารป้องกันจำพวกเอมีนที่มีประสิทธิภาพได้
- ความยากง่ายในการระเหย (Volatility) สารป้องกันที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยอาจเกิดการระเหยขณะผสม สูญหายไปก่อนการใช้งาน สารน้ำหนักโมเลกุลมากจะเกิดการระเหยยากกว่า
- ความสามารถในการละลาย (Solubility) ถ้าความสามารถในการละลายของสารป้องกันในยางน้อย จะเกิดการแพร่ออกมาที่ผิวได้ง่าย ปัจจัยนี้จึงมีผลมากต่อประสิทธิภาพของสารแอนติไอโซแนนท์ (Antiozonant) ในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวยาง
- เสถียรภาพทางเคมี (Chemical stability) เช่น เสถียรภาพต่อความร้อน แสง ออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ตัวทำละลาย เป็นต้น มีผลต่อความทนทานในการใช้งาน ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปริมาณการใส่ในยาง (Concentration)
- สิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย (Environment and safety)

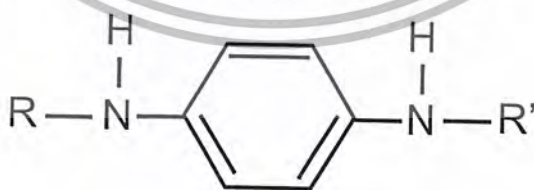
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพสามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. สารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากการที่ออกซิเจน ( $O_2$ ) เข้าทำปฏิกิริยากับยาง สารแอนติออกซิแดนซ์ แบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ

- สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดไม่เปื้อนสี (Nonstaining antioxidant) แบ่งเป็น 4 กลุ่มย่อย คือ สารประกอบฟอสเฟต (Phosphate) ฟีนอล (Hindered phenol) บิสฟีนอล (Hindered bisphenol) และไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) เช่น 4,4-Thiobis (6-t-butyl-m-cresol) เป็นสารประกอบบิสฟีนอลที่นิยมใช้ สารประกอบฟีนอลนิยมน้อยกว่า เนื่องจากระเหยง่าย เพราะน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า สารประกอบฟอสเฟตนิยมใช้กับยางสังเคราะห์ และ 2,5-di-tert-amylhydroquinone นิยมใช้กับกาวยาง (Additives)

- สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดเปื้อนสี (Staining antioxidant) นิยมใช้ 2 กลุ่ม คือ สารประกอบไฮโดรควิโนน (Dihydroquinones) และไดฟีนิลเอมีน (Diphenylamine) เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสีดำ หรือตกสี นิยมใช้กับยางที่มีสีดำ ไดไฮโดรควิโนนนั้นนิยมใช้ป้องกันการเสื่อมสภาพจากโลหะหนัก เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงระเหยหรือแพร่ออกที่ผิวยางยาก

2. สารแอนติโอโซนแนนซ์ (Antiozonant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากับโอโซน ( $O_3$ ) ปกติโอโซนจะมีปริมาณน้อย (ประมาณ 3-4 ppm) แต่มีผลต่อยางโดยทำให้ยางเกิดรอยแตก สารแอนติโอโซนแนนซ์ที่นิยมใช้มาก ได้แก่ สารประกอบพารา-ฟีนิลลีนไดเอมีน (para-Phenylenediamine: PPDs) มีโครงสร้างดังนี้



โดยหมู่ R และ R' อาจเป็นอัลคิล (Alkyls) ไฮโดรคาร์บอน ( $C_3-C_9$ ) หรือเอริล (Aryl) โครงสร้างที่เป็นวงอะโรมาติก ทำให้มี PPDs หลายแบบ คือ

- Dialkyl PPDs เช่น Diisopropyl p-phenylenediamine มักน้ำหนักโมเลกุลน้อย แพร่เร็วกว่าชนิดอื่น

- Alkyl-aryl PPDs เช่น N-1,3-dimethylbutyl-n-phenyl-p-phenylenediamine

- Diaryl PPDs เช่น Diphenyl-p-phenylenediamine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แวกซ์ (Waxes) อาจจัดเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอีกประเภทหนึ่ง (Static condition) นิยมใช้ป้องกันจากการเข้าทำปฏิกิริยาของไอโซน ซึ่งใช้ป้องกันได้ดีโดยเฉพาะในสภาวะอยู่นิ่ง เช่น การเก็บผลิตภัณฑ์ยางในโรงเก็บ แวกซ์จะทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพได้โดยเกิดการแพร่ (Migrate) ออกมาที่ผิววนอก เกิดเป็นชั้นฟิล์มแวกซ์บางๆเคลือบผลิตภัณฑ์ยาง เป็นกำแพงป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของไอโซนในอากาศ อย่างไรก็ตาม ถ้ายางได้รับการแรงสั่นสะเทือน หรือแรงแบบไดนามิกส์ ฟิล์มแวกซ์จะไม่สามารถใช้ป้องกันยางได้

## 2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ยาง

### 2.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM) [12]



รูปที่ 2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM) [13]

รูปที่ 2.3 เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยขยายตาประเภทกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉาย หรือส่องกวาดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏ เป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรืออาจบันทึกภาพลงบนแผ่นฟิล์มได้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเป็นระบบที่ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากภาพที่ได้เป็นภาพที่เกิดโดยทางอ้อม ซึ่งเป็นการรวบรวมสัญญาณที่เกิดภายหลังการกระทบลำแสงอิเล็กตรอน แล้วเปลี่ยนไปเป็นภาพให้ปรากฏบนจอภาพที่มีลักษณะคล้ายจอโทรทัศน์ หรืออีกนัยหนึ่ง ภาพที่เกิดขึ้นในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดคือ ผลจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นภาพ โดยภาพที่ได้รับจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดนั้น นอกจากจะเป็นภาพที่มีคุณสมบัติในด้านกำลังขยายและรายละเอียดสูงแล้ว ภาพที่ปรากฏจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดยังมีลักษณะพิเศษอีกประการหนึ่ง คือเป็นภาพที่มีความลึกหรือเป็นภาพประเภท 3 มิติ

## 2.3 แวกซ์ (Wax) [14-16]

แวกซ์ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ โดยส่วนใหญ่จะได้มาจากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

### 2.3.1 ประเภทของปิโตรเลียมแวกซ์

แวกซ์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. พาราฟินแวกซ์ (Paraffin Wax) เป็นปิโตรเลียมแวกซ์ประเภทไฮโดรคาร์บอนแบบสายโซ่ตรง ซึ่งประกอบด้วย นอร์มอลอัลเคน (n-alkane) 40-90% โดยน้ำหนัก และส่วนที่เหลือเป็น  $C_{18}$ - $C_{36}$  ไอโซอัลเคน และไซโคอัลเคน ( $C_{18}$ - $C_{36}$  isoalkane and cycloalkane) ซึ่งพาราฟินแวกซ์จะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 350-420 และมีความเป็นผลึกสูง โดยมีจุดหลอมเหลวประมาณ 38-74 องศาเซลเซียส

2. ไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์ (Microcrystalline Wax) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกากที่เหลือของกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ หรือจากก้นถังของน้ำมันดิบ โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง (Branch) และเป็นวงกลม (Cyclic) ซึ่งจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 490-800 และมีจุดหลอมเหลวประมาณ 57-100 องศาเซลเซียส

3. เซมิไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์ (Semicrocrystalline Wax) เป็นแวกซ์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง และเป็นวงกลมมากกว่าพาราฟินแวกซ์ แต่น้อยกว่าไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์

ทั้งนี้ แวกซ์ที่มีคุณสมบัติสามารถป้องกันอย่างจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไอโซนคือพาราฟินแวกซ์และไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติโดยทั่วไป ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของพาราฟินแวกซ์ และไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์

คุณสมบัติ	หน่วย	แวกซ์	
		พาราฟิน	ไมโครคริสตัลไลน์
จุดวาบไฟ (Flash point, closed up)	องศาเซลเซียส	204	260
ความหนืด ที่ 98.9 องศาเซลเซียส	ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที	4.2-7.4	10.2-25
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	46-68	60-93
ค่าดัชนีหักเห ที่ 98.9 องศาเซลเซียส		1.430-1.433	1.435-1.445
น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย		350-420	600-800
จำนวนคาร์บอนอะตอมต่อ 1 โมเลกุล	อะตอม	20-36	30-75

### 2.3.2 ประโยชน์ของปิโตรเลียมแวกซ์

- ใช้ในการผลิตหมากฝรั่ง
- ใช้เป็นสารเคลือบป้องกันผลไม้ ผัก และเนยแข็ง
- ใช้ในการผลิตเทียนไข ยาขัดเงา และเครื่องสำอาง
- ไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์ เมื่อนำไปผสมกับหมึก สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของหมึกในด้านการลื่นไหล และการลบออก

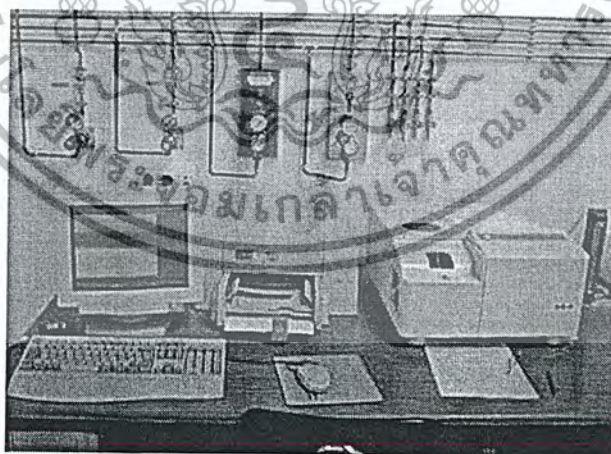
- สารผสมระหว่างพาราฟิน และไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์ ใช้เป็นสารเติมแต่งของพอลิเอทิลีน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene vinyl acetate) เพื่อใช้ปรับปรุงในการทำภาชนะบรรจุประเภทกระดาษ เช่น กล่องกระดาษแข็ง และภาชนะที่ทำจากกระดาษ เป็นต้น

- พาราฟินแวกซ์ และไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์ นำไปผสมกับยางเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ หรือการสึกกร่อนเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับโอโซน

## 2.4 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์แวกซ์

เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของแวกซ์ในด้านต่างๆ มีหลายวิธี เช่น

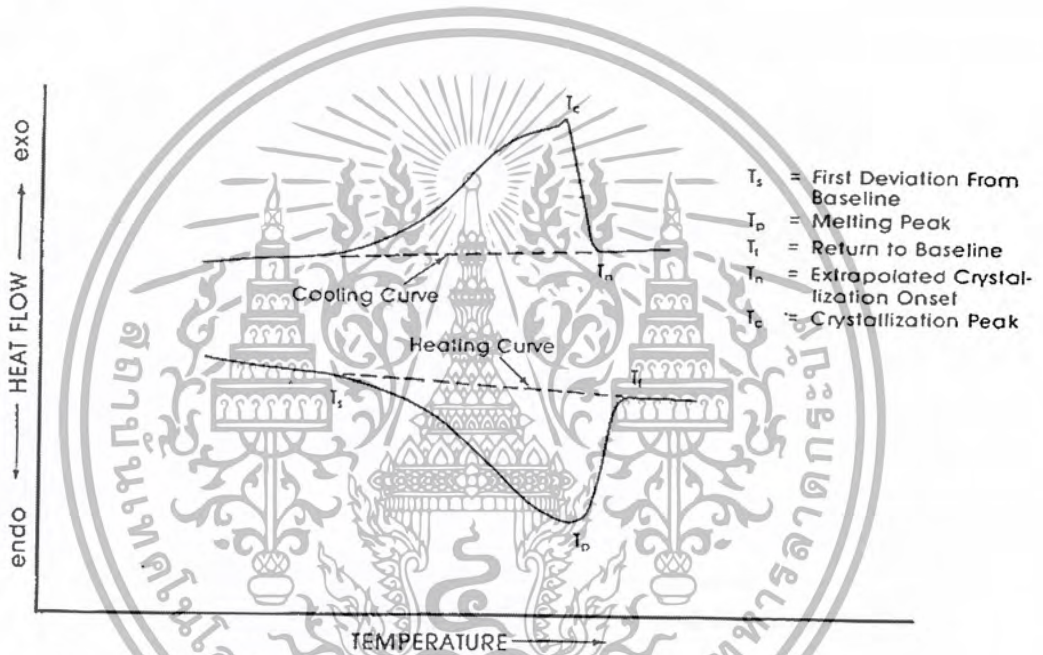
### 2.4.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี (Differential Scanning Calorimetry: DSC) [17]



รูปที่ 2.4 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter) [18]

รูปที่ 2.4 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เทคนิคแบบดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี ซึ่งจะทำการวัดอุณหภูมิและการไหลของความร้อน (Heat flow) จากการเปลี่ยนแปลงความร้อน (Thermal transition) ของวัสดุเปรียบเทียบกับอุณหภูมิหรือเวลา ทำให้ได้ข้อมูลทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณ (Qualitative and Quantitative) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดหรือคายความร้อน (Endothermic or Exothermic processes) หรือการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อน (Heat capacity changes)

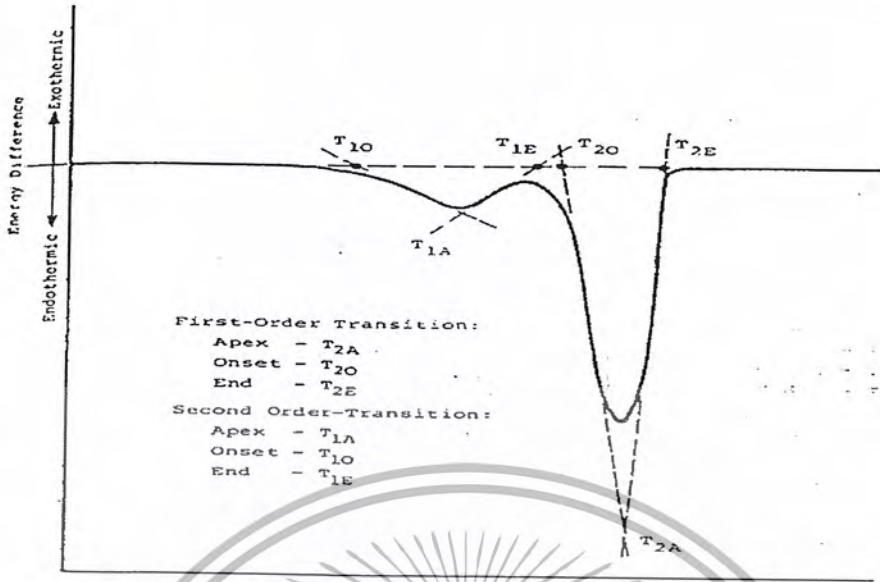
จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ จะได้กราฟดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผลที่ได้การวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ [19]

จากรูปที่ 2.5 เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการสแกนแบบเพิ่มอุณหภูมิ จุดยอดที่ได้ คือ จุดหลอมเหลว (Melting Temperature) และเมื่อสแกนแบบลดอุณหภูมิ จุดยอดที่ได้ คือ อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystalline Temperature)

จากการวิเคราะห์ด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเรื่อยๆจะได้กราฟที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.6

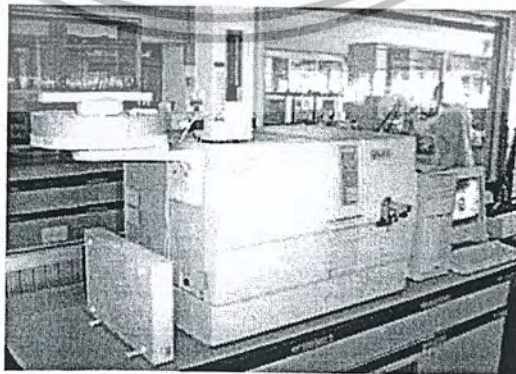


รูปที่ 2.6 ผลการวิเคราะห์หิโปรเลียมแวกซ์ด้วยดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ [19]

โดยข้อมูลที่ได้คาดว่าจะได้รับ คือ จุดหลอมเหลว (Melting Temperature) อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystalline Temperature) ค่าความร้อนของการหลอมเหลว (Enthalpy) และค่าความจุความร้อน (Heat Capacity) ของแวกซ์

ในการนำข้อมูลมาพิจารณาเปรียบเทียบ ถ้าสารชนิดใดมีจุดหลอมเหลวต่ำ แสดงว่า สารชนิดนั้นมีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อย และถ้าสารชนิดใดมีค่าความร้อนของการหลอมเหลวต่ำ แสดงว่า สารชนิดนั้นมีพลังงานพันธะระหว่างโมเลกุลน้อย

2.4.2 แก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Gas Chromatography – Mass spectrometry: GC-MS) [20-22]



รูปที่ 2.7 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography – Mass spectrometer) [20]

รูปที่ 2.7 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เทคนิคแบบแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) ได้อย่างถูกต้อง

แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography) หรือที่นิยมเรียกว่า GC เป็นเทคนิคที่ใช้แยกสารต่างๆ โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างการกระจายตัวของสารต่างๆ ระหว่าง วัฏภาค 2 วัฏภาค ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง และวัฏภาคเคลื่อนที่ (mobile phase) ซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยเช่น ก๊าซไนโตรเจน ฮีเลียม หรืออาร์กอน เนื่องจากวัฏภาคเคลื่อนที่เป็นแก๊ส ดังนั้นสารที่ต้องการแยกจะต้องสามารถระเหยได้ ณ ภาวนั้นๆ จึงเหมาะที่จะใช้ในการวิเคราะห์สารที่ระเหยได้ง่าย เช่น น้ำมันหอมระเหย สารพวกเอสเทอร์ เป็นต้น

แมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry: MS) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการระบุชนิดสารอินทรีย์ต่างๆ โดยอาศัยการทำให้โมเลกุลของสารซึ่งอยู่ในรูปของระเหยเกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุบวกด้วยการยิงด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งจะให้  $M^+$  (molecular ion) ที่มีค่า  $m/e$  เท่ากับน้ำหนักโมเลกุลของสารนั้น และโมเลกุลไอออนจะแตกตัวเป็นแฟรกเมนต์ (fragment) ต่างๆ ซึ่งมักจะเป็นลักษณะเฉพาะของสารนั้นๆ

เมื่อนำเทคนิคการแยกสารแบบแก๊สโครมาโตกราฟีมารวมเทคนิคการระบุชนิดสารแบบแมสสเปกโตรเมตรี จะทำให้สามารถวิเคราะห์ส่วประกอบในสารผสมได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล และเปรียบเทียบค่าไอออนโมเลกุล (molecular ion) และ แฟรกเมนต์หลัก กับค่าที่บันทึกไว้ในข้อมูลอ้างอิง (reference library) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงส่วนประกอบในสารผสมต่างๆ ได้ จึงนับว่าเทคนิคแบบแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงชนิดหนึ่งในการศึกษาและวิเคราะห์สารต่างๆ ขององค์ประกอบนั้นๆ

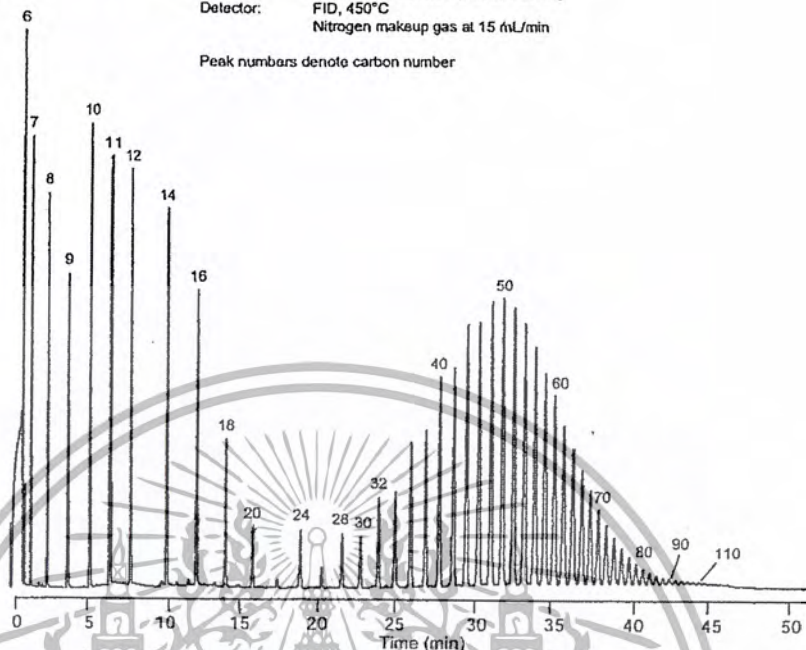
จากการศึกษาและค้นคว้า พบว่าได้มีผู้ทำการทดสอบสารประเภทพาราฟินโดยใช้ GC มาก่อนแล้ว ได้ผลดังรูปที่ 2.8

### n-Paraffin Standard

Column: DB-HT Sim Dis  
5 in x 0.53 mm I.D., 0.15 μm  
J&W PN: 145-1001

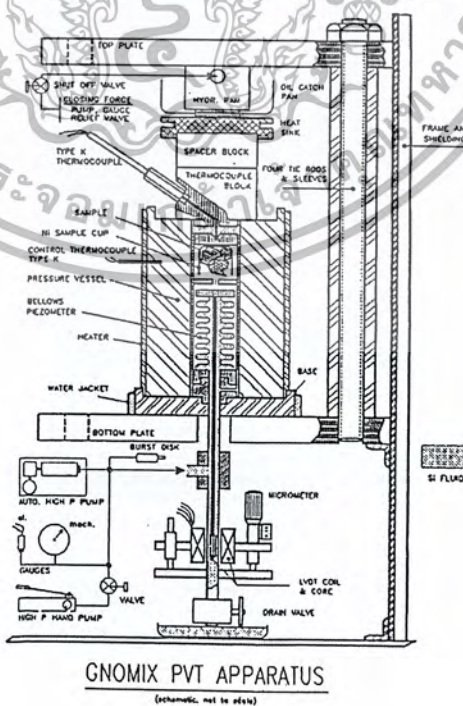
Helium at 18 mL/min, measured at 35°C  
Oven: -30-430°C at 10°/min  
Injector: OPTIC™ PTV  
55-450°C at 2°/sec  
0.5 μL of about 2% n-paraffins in CS,  
FID, 450°C  
Nitrogen makeup gas at 15 mL/min

Peak numbers denote carbon number



รูปที่ 2.8 โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์พาราฟินแวกซ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ - แมสสเปกโตรมิเตอร์ [23]

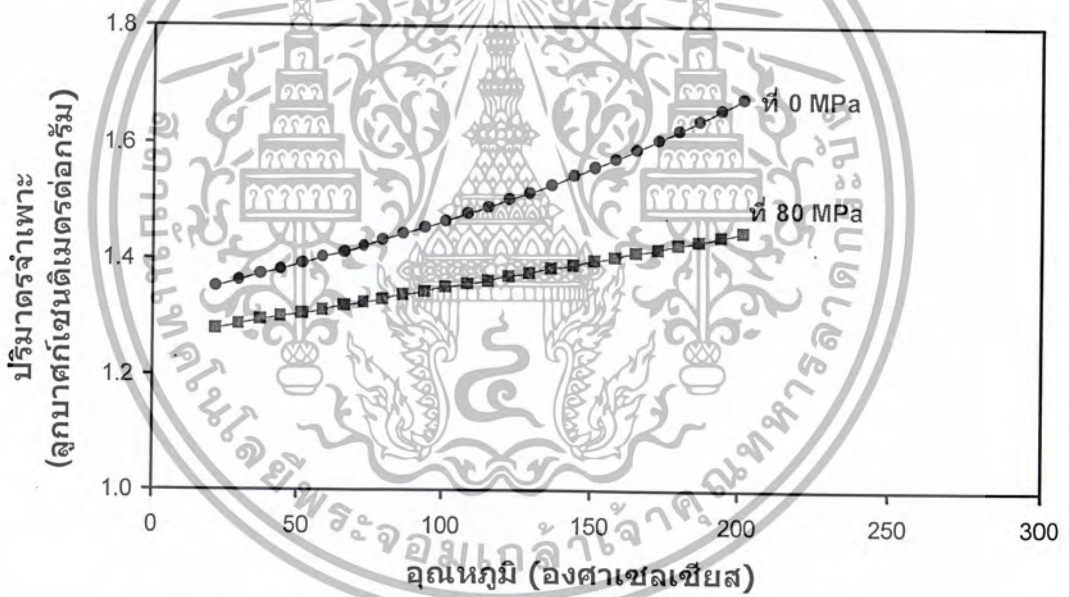
### 2.4.3 เครื่องมือ จินอิมิก พีวีที (GNOMIX PVT Apparatus) [24]



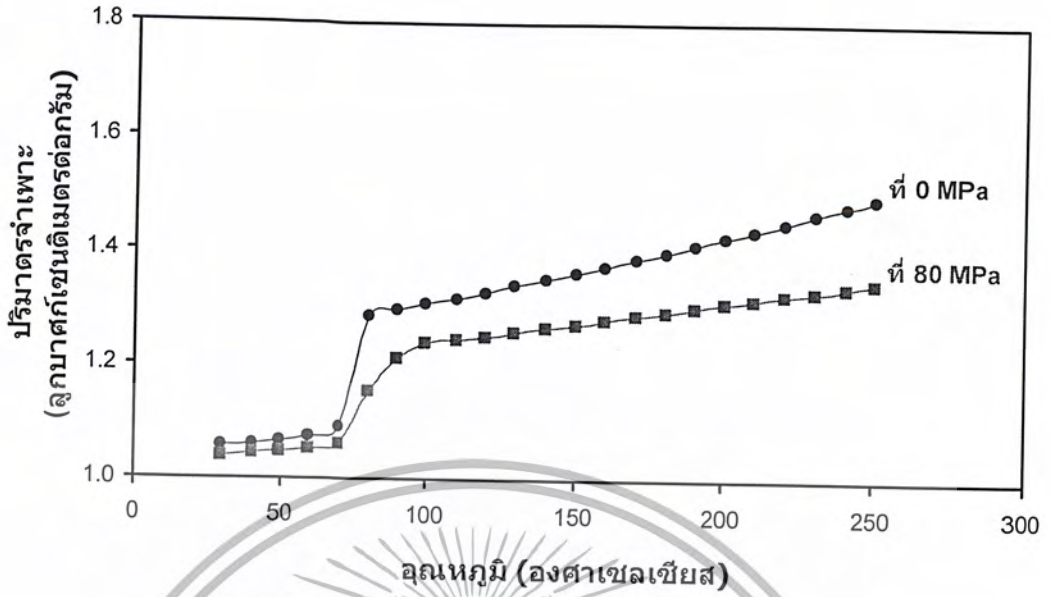
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยผู้จัดทำเอกสารนี้ไว้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.9 เครื่องมือ จินอิมิก พีวีที (GNOMIX PVT Apparatus) [24]  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยใช้คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของพอลิเมอร์ ซึ่งจะอาศัยสมบัติการเปลี่ยนแปลงของความดัน อุณหภูมิ และปริมาตรของสารพอลิเมอร์ เพื่อตรวจสอบหาชนิดของพอลิเมอร์ หรือน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นๆ โดยข้อมูลที่ได้จะนำไปเทียบกับข้อมูลอ้างอิงที่ได้มีการทำวิจัยมาก่อนแล้ว ซึ่งอุณหภูมิช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากของแข็งกลายเป็นของเหลวจะทำให้สามารถทำนายชนิดของพอลิเมอร์ได้

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้สารตัวอย่างนั้นๆเกิดการหลอมตัวมีลักษณะที่เป็นของเหลวชั้นหนืดที่สามารถไหลได้ จากนั้นจะทำการอัดด้วยแรงดันเพื่อให้สารตัวอย่างนั้นๆเป็นรูปทรงที่จะสามารถคำนวณหาปริมาตรของสารนั้นๆได้ ปริมาตรที่ได้นี้จะสามารถนำไปหาน้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างได้ โดยใช้สมการทางเทอร์โมไดนามิก ผลที่ได้จากการทดลองจะแปลผลออกมาในรูปของกราฟระหว่างความดัน อุณหภูมิ และปริมาตร ซึ่งกราฟที่ได้จะสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของสารประกอบนั้นๆได้ในระดับหนึ่ง

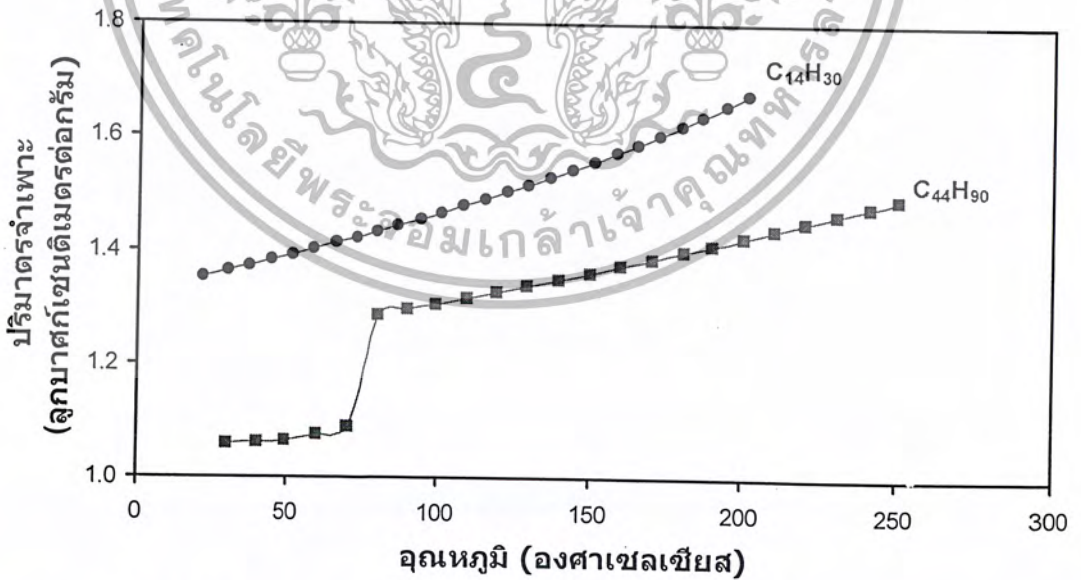


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ PVT ของ  $C_{14}H_{30}$  [24]

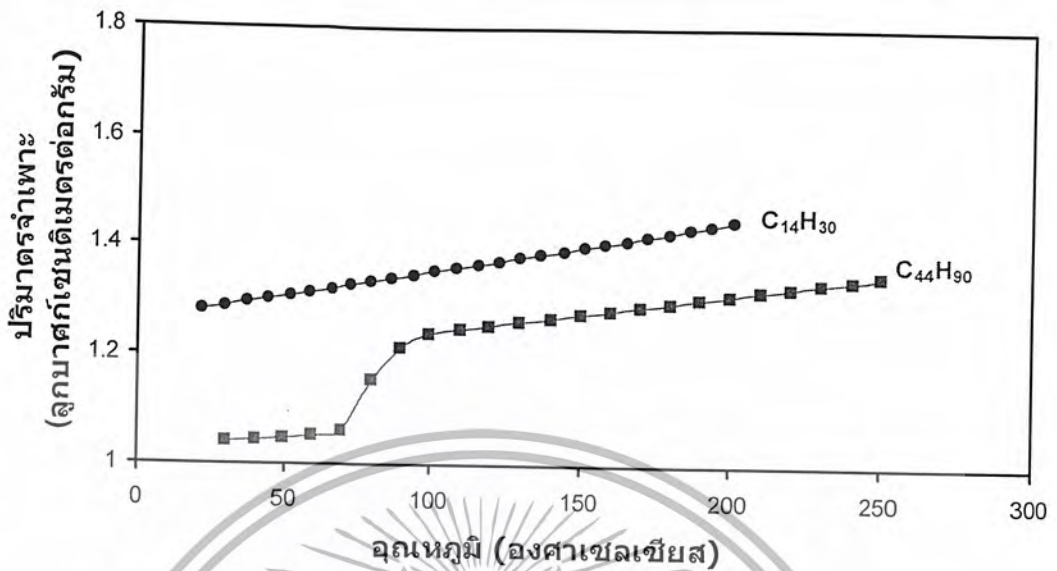


รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ PVT ของ  $C_{44}H_{90}$  [24]

จากรูปที่ 2.10 และ 2.11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ค่าปริมาณจำเพาะของสารจะลดลง และถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าปริมาณจำเพาะของสารจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การขยายตัวของวัสดุ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ PVT ของ  $C_{14}H_{30}$  และ  $C_{44}H_{90}$  ที่ความดันแก๊จ 0 MPa [24]



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ PVT ของ  $C_{14}H_{30}$  และ  $C_{44}H_{90}$  ที่ความดันเกจ 80 MPa [24]

จากรูปที่ 2.12 และ 2.13 แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน สารที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากกว่าจะมีค่าปริมาตรจำเพาะน้อยกว่า และในสารที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากจะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคจากของแข็งไปเป็นของเหลวได้

## 2.5 การรวมตัวของแว็กซ์และยาง

เมื่อพิจารณาระหว่างพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์แล้ว พบว่าพาราฟินแว็กซ์สามารถนำมาใช้เป็นสารเคลือบได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของพาราฟินแว็กซ์จะสูงขึ้นด้วย ทำให้พาราฟินแว็กซ์ละลายในยางได้มากขึ้น ส่งผลให้ชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความหนาไม่เพียงพอที่จะเคลือบผิวได้ แต่สำหรับไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์จะสามารถดำเนินการได้ดีกว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นในการเคลือบพื้นผิวยางที่ดี ควรจะใช้สารที่ผสมกันระหว่างพาราฟินและไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ โดยอัตราส่วนโดยมวลของการผสมคือ 3:1 และ 3:2

ที่สภาวะ ณ อุณหภูมิต่างๆ สามารถอธิบายส่วนผสมของพาราฟินได้โดยใช้จำนวนคาร์บอนอะตอม ซึ่งจะบอกถึงความสามารถในการต่อต้านไอโซน แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 จำนวนคาร์บอนอะตอมของนอร์มอลอัลเคนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการต่อต้านไอโซน ที่อุณหภูมิต่างๆ [16]

อุณหภูมิ (°C)	จำนวนคาร์บอนอะตอม		
	NR/BR	SBR	NR
0	22-23	21-23	21-24
10	25-26	23-26	24-26
20	27-30	26-29	26-30
30	30-33	30-32	30-33
40	33-36	34-36	33-36
50	38-40	36-40	36-40
60	44-51	40-50	44-50

หมายเหตุ NR = Natural Rubber, BR = Butadiene Rubber, SBR = Styrene butadiene Rubber

## 2.6 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ [25]

ในการใส่แก๊สเข้าไปในยางนั้น จะใส่ระหว่างกระบวนการผสมก่อนที่จะทำการวัลคาไนซ์ยาง เมื่อเวลาผ่านไป ยางซึ่งผ่านการวัลคาไนซ์แล้วจะเกิดฟิล์มเคลือบที่พื้นผิวของตัวอย่าง ปฏิกิริยาการแพร่เช่นนี้เรียกว่า การบลูมของแก๊ส (Blooming) ปฏิกิริยาการแพร่มีความสำคัญอย่างมากต่อผลิตภัณฑ์ยาง คือ สามารถช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันของยางกับไอโซนได้

การบลูมของแก๊สเกิดจากการที่แก๊สสามารถละลายในยางได้ดีมากในระหว่างกระบวนการผสม และระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ขึ้น แต่เมื่อทำการลดอุณหภูมิลงจนมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว ( $T < T_m$ ) แล้ว ความสามารถในการละลายของแก๊สในยางจะมีค่าลดลงอย่างฉับพลัน และแก๊สจะกลายเป็นสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated) ในยาง ดังนั้นทำให้เกิดการตกผลึกขึ้นในเนื้อยางและบนพื้นผิวของยาง เพื่อให้ความเข้มข้นของแก๊สที่ละลายอยู่ในยางนั้นลดลงจนมีค่าเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{M_t}{t^{1/2}} = 2(w_0 - s_0) \left( \frac{D}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $M_t$  = ปริมาณของแก๊สที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย

$t$  = เวลาที่ใช้ในการอบ

$w_0$  = ความเข้มข้นของแก๊ส ณ จุดเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$s_0$  = ค่าความสามารถในการละลายของแก๊สในยาง

$D$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่

จากสมการที่ (2.1) ได้มีผู้ทำการทดลอง แล้วพบว่าค่า  $\left(\frac{M_t}{t^{1/2}}\right)$  ที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากสมการที่ (1) ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงสร้างสมการใหม่ขึ้นมา โดยสมมติให้แก๊สที่มากเกินพอในยางนั้นตกตะกอนออกมาเป็นทรงกลมรอบๆ ช่องว่าง (flaw) ในยาง ซึ่งกระบวนการแพร่ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถหาได้จาก Free-energy gradient ดังนั้น ในการคำนวณสามารถใช้แนวคิดของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ( $D_T$ ) ได้โดย

$$F = -D_T \frac{c}{RT} \cdot \frac{d\mu}{dx} \tag{2.2}$$

เมื่อ  $c$  = ความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดการแพร่

$x$  = ระยะทางการแพร่

$D_T$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ทางเทอร์โมไดนามิกส์  
( $D_T = D$  เมื่อ ความเข้มข้นของแก๊สมีค่าน้อยมาก)

$\mu$  = ค่าศักย์ทางเคมีต่อโมล สามารถหาได้จาก

$$\mu = pV \tag{2.3}$$

เมื่อ  $p$  = ค่าความเค้นอีลาสติก

$V$  = ปริมาตรเป็นโมลาร์ของแก๊ส

จากสมการที่ (2.3) เมื่อทำการหาอนุพันธ์เทียบกับระยะทาง จะได้

$$\frac{d\mu}{dx} = V \frac{dp}{dx} \tag{2.4}$$

แทนค่าสมการที่ (2.4) ในสมการที่ (2.2) จะได้

$$F = -D_T \frac{cV}{RT} \cdot \frac{dp}{dx} \tag{2.5}$$

การหาค่าความดันในช่องว่างทรงกลมในยางสามารถหาได้จาก

$$p = \left(\frac{G}{2}\right) \left(5 - \frac{4}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^4}\right) \tag{2.6}$$

เมื่อ  $\lambda =$  เป็นตัวแปรทางกายภาพที่ใช้อธิบายการขยายตัวของเนื้อยาง เพื่อให้เกิดการแพร่ผ่านของแก๊ส

กำหนดให้ ค่าพลังงานที่เก็บสะสมในยางมีค่า

$$W = \left(\frac{G}{2}\right)(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \tag{2.7}$$

เมื่อ  $G =$  ค่าโมดูลัสของแรงเฉือน

การหาค่าปริมาตรของแก๊สต่อปริมาตรของยาง 1 ลูกบาศก์หน่วย หาได้จาก

$$w = n \left(\frac{4}{3}\right) \pi \rho_w r_0^3 (\lambda^3 - 1) + s_0 = f(\lambda^3 - 1) + s_0 \tag{2.8}$$

กำหนดให้  $f = n \left(\frac{4}{3}\right) \pi \rho_w r_0^3$

เมื่อ  $n =$  จำนวนของเม็ดทรงกลมของแก๊สต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์หน่วย ที่รัศมีของแก๊สเริ่มต้น

$r_0 =$  รัศมีของแก๊สที่จุดเริ่มต้น

$\rho_w =$  ความหนาแน่นของแก๊ส

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏ ( $D_a$ ) หาได้จาก

$$F = -D_a \frac{dw}{dx} \tag{2.9}$$

แทนสมการที่ (2.9) ในสมการที่ (2.5) จะได้

$$D_a = D_r \frac{cV}{RT} \cdot \frac{dp}{dw} \tag{2.10}$$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.6) และ (2.8) แล้วแทนลงในสมการที่ (2.10) จะได้

$$D_a = D_r \frac{s_0}{RT} \cdot \frac{V}{3f\lambda^2} 2G \left( \frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda^5} \right) \quad \text{โดยที่ } c = s_0 \tag{2.11}$$

ซึ่งสมการของการแพร่สามารถหาผลลัพธ์ได้โดยกำหนดสภาวะขอบเขตที่เหมาะสม ดังนี้

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_a \frac{\partial w}{\partial x} \right) \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการอนุพันธ์ย่อยนี้สามารถลดรูปเป็นสมการอนุพันธ์เชิงสามัญได้ โดยกำหนดตัวแปรใหม่ ดังนี้

$$y = \frac{x}{2} (At)^{1/2} \tag{2.13}$$

เมื่อ  $A = \frac{2D_T s_0 VG}{3fRT}$  (2.14)

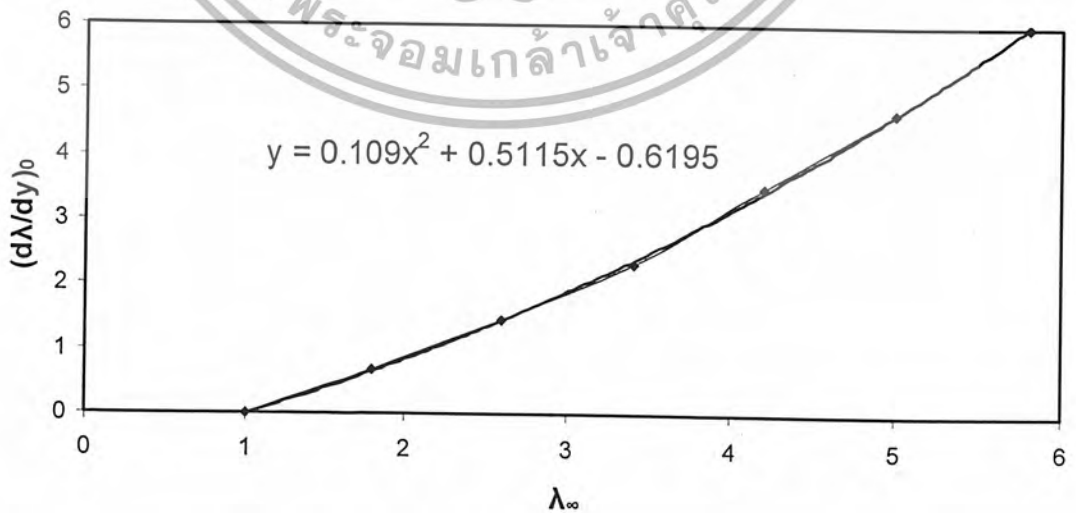
ดังนั้น จะได้  $\frac{d^2 \lambda}{dy^2} = \frac{1}{\lambda^4 + \lambda} \left[ (2\lambda^3 + 5) \left( \frac{d\lambda}{dy} \right)^2 - 2y\lambda^8 \left( \frac{d\lambda}{dy} \right) \right]$  (2.15)

โดยสมการที่ (2.15) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ ถ้าเป็นสมการที่มีระบบการแพร่เป็นแบบกึ่งอนันต์ (Semi-infinite) ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตคงที่ โดยให้ความเข้มข้นของแก๊สทุกจุดในยางมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นของแก๊สเริ่มต้น ( $w_0$ ) ดังนั้นจากสมการที่ (2.8) จะได้

$$\lambda_\infty = \left[ \frac{(w_0 - s_0)}{f} + 1 \right]^{1/3} \tag{2.16}$$

และ  $M_T = \left( \frac{24fD_T s_0 VG}{RT} \right)^{1/2} \left( \frac{d\lambda}{dy} \right)_0 t^{1/2}$  (2.17)

โดยที่ค่า  $\left( \frac{d\lambda}{dy} \right)_0$  สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\lambda_\infty$  และ  $\left( \frac{d\lambda}{dy} \right)_0$  ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\lambda_\infty$  และ  $\left( \frac{d\lambda}{dy} \right)_0$  ที่ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.15) [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆในสมการที่ (2.17) แล้ว จะพบว่า ประกอบไปด้วย ค่าคงที่ต่างๆ ที่มีความสำคัญต่ออัตราการแพร่ของแก๊สที่ออกมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง (Blooming rate) ซึ่งมีความซับซ้อนในการแยกคำนวณหาค่าคงที่แต่ละตัว โดยจะเหมาะสำหรับการอธิบายการแพร่ของแก๊สในสภาวะอนันต์ อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาเฉพาะกระบวนการแพร่ในช่วงเริ่มต้น สามารถนำทฤษฎีการแพร่ของสารอย่างง่ายมาประยุกต์ใช้ได้ ดังนั้น จะประมาณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ได้จากผลการทดลอง โดยการพล็อตกราฟระหว่าง  $M_t$  และ  $t^{1/2}$  ซึ่งสามารถประมาณค่าโดยใช้สมการที่ (2.18) ได้ดังนี้

$$D = \left( \frac{M_t / t^{1/2}}{2c_\infty} \right)^2 \pi \quad (2.18)$$

เมื่อ  $M_t / t^{1/2}$  = ค่าความชันของกราฟความลึ้มพันธ์ระหว่าง  $M_t$  และ  $t^{1/2}$  ในช่วงเริ่มต้น ซึ่งได้จากผลการทดลองที่สังเกตได้ จากกราฟการแพร่ของแก๊สที่แพร่ขึ้นมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง

$c_\infty = c_0 - c$  โดยที่  $c_0$  = ค่าความเข้มข้นของแก๊สเริ่มต้น

$c$  = ค่าความเข้มข้นของแก๊สที่แพร่ออกมา

ที่  $t = 36$  ชม.

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา

1. ความหนาของชั้นแวกซ์ที่แพร่ออกมาเคลือบพื้นผิวของยาง
2. อัตราการแพร่ของแวกซ์ที่แพร่ออกมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง
3. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแวกซ์

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา

1. แวกซ์ชนิดต่างๆ
  - ตัวอย่างแวกซ์ SLW 150BS
  - ตัวอย่างแวกซ์ SLW 500N
  - แอนติออกซิเดนที อะลิฟาติกแวกซ์ (Commercial wax)
2. ยางธรรมชาติ (Natural rubber)
3. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
4. กรดสเตียริก (Stearic acid)
5. โลวินอกซ์ (Lowinox)
6. ซิงค์สเตียเรต (ZnSt)
7. แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ )
8. ไททานเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )
9. เตตระเมทิลโรยูเรมไดซัลไฟด์ (TMTD)
10. ไดเบนไซโรโซลไดซัลไฟด์ (MBTS)
11. ซัลเฟอร์ (S)

#### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

1. ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter: DSC)
2. เครื่องบดยาง 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill)
3. เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยแผ่นร้อน (Compression molding machine)
4. ตู้อบความร้อน (oven)
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM)

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การวิเคราะห์หาคุณสมบัติของแว็กซ์

เตรียมตัวอย่างแว็กซ์ทั้ง 2 ชนิด ตามประเภทเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.4.2 การผสมแว็กซ์ลงในยาง

แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ

##### 1. การเตรียมสาร

ชั่งสารต่างๆตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตรการผสมพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง

ชื่อพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง	น้ำหนัก (phr)
แว็กซ์ชนิดต่างๆ	9, 15
ยางธรรมชาติ	100
ซิงค์ออกไซด์	4.4
กรดสเตียริก	2
โลวินอกซ์	0.18
ซิงค์สเตียเรต	1
แคลเซียมคาร์บอเนต	60
ไททานเนียมออกไซด์	11
เตตระเมทิลไฮดรอกไซด์ไฟต์	0.18
ไดเบนไซโลโซลไดซัลไฟต์	1.53
ซิลิโคน	1.78

##### 2. การทำ Master batch

2.1 ชั่งน้ำหนักสารเคมีตามที่ได้กำหนดไว้

2.2 ผสมยางธรรมชาติ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก โลวินอกซ์ และซิงค์สเตียเรต เข้าด้วยกัน ด้วยเครื่องบดยาง 2 ลูกกลิ้ง

##### 3. การผสมแว็กซ์ลงใน Master batch

3.1 นำยางที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาทำการแบ่งออกเป็น 7 ส่วน

3.2 นำยางที่แบ่งไว้ในแต่ละส่วนมาผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต ไททานเนียมออกไซด์

และแว็กซ์ตามปริมาณที่ได้กำหนดไว้

##### 3.3 หลังจากนั้นก็ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ทำการวัลคาไนซ์ยาง (Vulcanization)

4.1 นำยางที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ทั้ง 7 ตัวอย่าง มาทำการวัลคาไนซ์โดยการผสมกับ ซัลเฟอร์ TMTD และ MBTS

4.2 เก็บตัวอย่างยางทั้ง 7 ตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิต่างๆ เพื่อรอการขึ้นรูป

#### 3.4.3 การขึ้นรูปยาง

ทำการขึ้นรูปยางทั้ง 7 ตัวอย่าง ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยแผ่นร้อน โดยใช้แม่พิมพ์หนา 3 มิลลิเมตร อบด้วยอุณหภูมิ 150°C ความดัน 80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 15 นาที

#### 3.4.4 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การแพร่ของแก๊สบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยาง

1. อบตัวอย่างยางด้วยตู้อบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ซึ่งจะต้องนำตัวอย่างยางออกมาจากตู้อบทุกๆ 12 ชั่วโมง เพื่อหาความหนาของชั้นแก๊สที่ออกมาเคลือบผิวยาง ที่เวลาต่างๆกัน

2. นำตัวอย่างยางที่ผ่านการอบแล้วมาหัก (crack) โดยนำไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ยางแข็งสามารถหักได้

3. นำยางที่หักแล้วมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เพื่อหาความหนาของชั้นแก๊สที่แพร่ ออกมาเคลือบผิวยาง

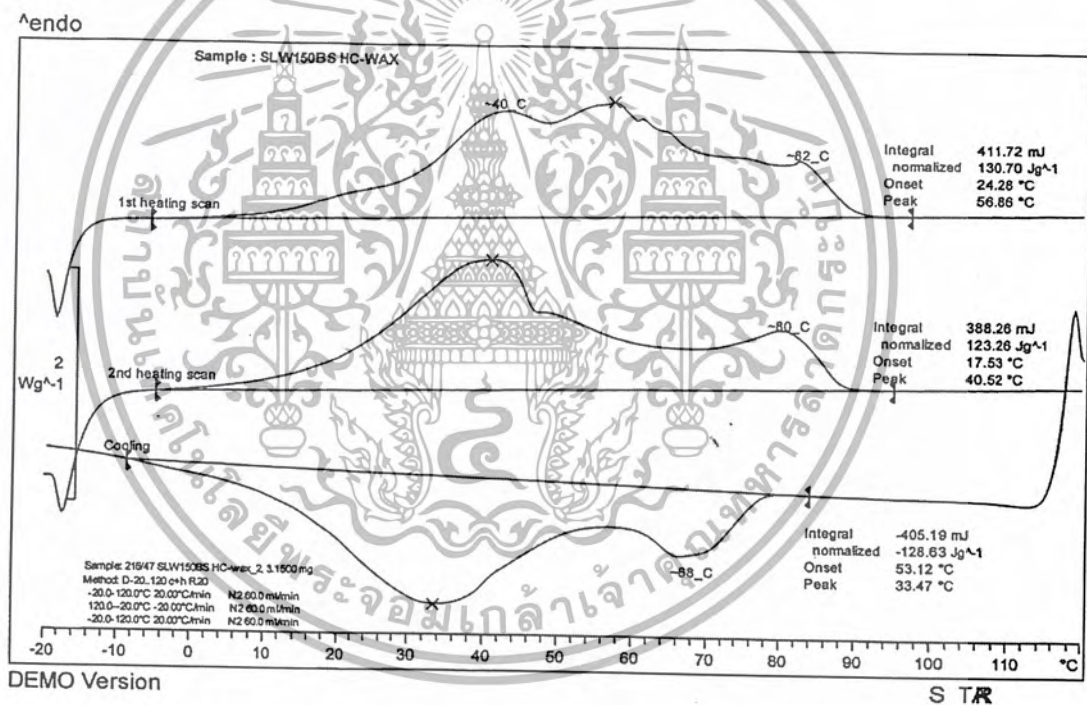
4. นำผลที่ได้จากเครื่อง SEM มาทำการวิเคราะห์และสรุปผล

บทที่ 4  
ผลการทดลอง  
และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

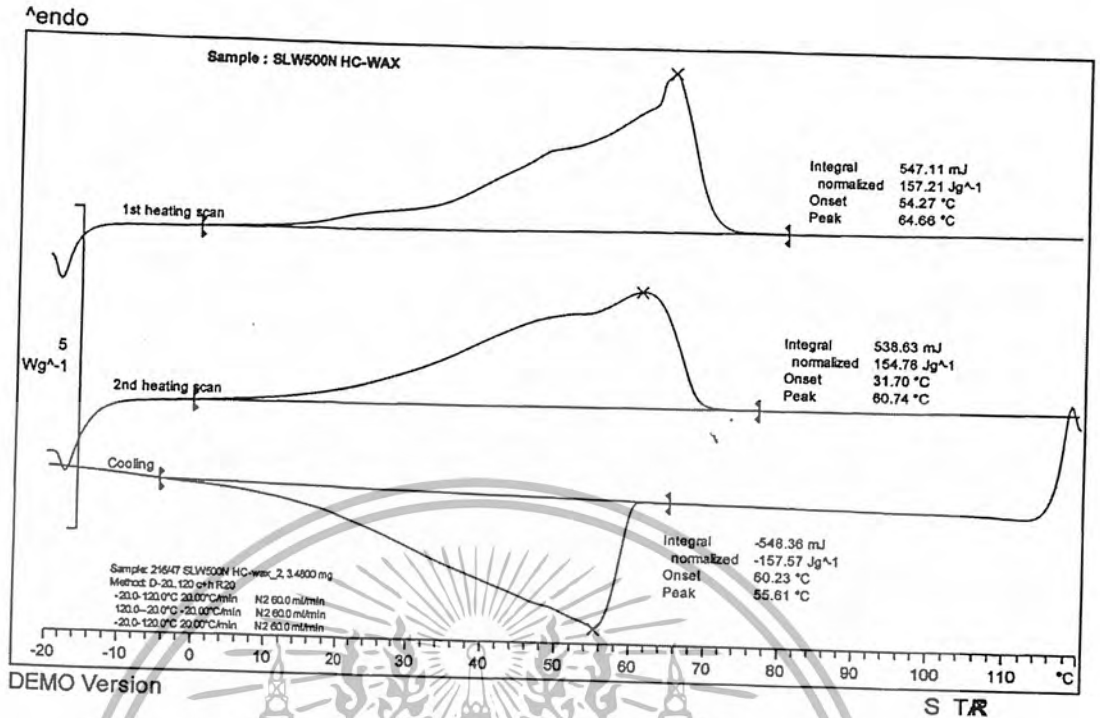
4.1 การวิเคราะห์หาคุณสมบัติของแว็กซ์

4.1.1 การหาคุณสมบัติของตัวอย่างแว็กซ์ โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเทียลสแกนนิ่ง-แคลอริมิทรี (Differential Scanning Calorimetry: DSC)

จากการทดลอง เมื่อนำตัวอย่างแว็กซ์ทั้ง 2 ตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC จะได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 150BS ด้วยเครื่อง DSC



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแวกซ์ SLW 500N ด้วยเครื่อง DSC

จากการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างแวกซ์ทั้ง 2 ชนิดด้วยเครื่อง DSC โดยการสแกนแบบเพิ่มอุณหภูมิ (2<sup>nd</sup> Heating scan) พบว่า

1. ตัวอย่างแวกซ์ SLW 150BS
  - 1.1 การเปลี่ยนแปลงครั้งแรก (First-Order Transition)
    - จุดยอด (Apex) = 40.5 องศาเซลเซียส
  - 1.2 การเปลี่ยนแปลงครั้งที่ 2 (Second-Order Transition)
    - จุดยอด (Apex) = 80.0 องศาเซลเซียส

2. ตัวอย่างแวกซ์ SLW 500N

- จุดยอด (Apex) = 60.7 องศาเซลเซียส

และเมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างแวกซ์ทั้ง 2 ชนิดด้วยเครื่อง DSC โดยการสแกนแบบลดอุณหภูมิ (Cooling scan) พบว่า

1. ตัวอย่างแวกซ์ SLW 150BS
  - 1.1 การเปลี่ยนแปลงครั้งแรก (First-Order Transition)
    - จุดยอด (Apex) = 68.0 องศาเซลเซียส
  - 1.2 การเปลี่ยนแปลงครั้งที่ 2 (Second-Order Transition)
    - จุดยอด (Apex) = 33.5 องศาเซลเซียส

## 2. ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 500N

- จุดยอด (Apex) = 40.5 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า

1. ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 150BS มีจุดหลอมเหลวประมาณ 40.5 และ 80.0 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิของการเกิดผลึกประมาณ 68.0 และ 33.5 องศาเซลเซียส
2. ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 500N มีจุดหลอมเหลวประมาณ 60.7 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิของการเกิดผลึกประมาณ 40.5 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแว็กซ์ ที่วัดได้จากเครื่อง DSC

ประเภทของแว็กซ์	จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )	ค่าความร้อนของการหลอมเหลว ( $\text{J/g}$ )
ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 150BS	40.5	128.6
ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 500N	60.7	157.6
แอนติออกซิเดนท์ อะลิฟาติกแว็กซ์ (Commercial wax) [26]	61.0	115.8

หมายเหตุ จุดหลอมเหลวของตัวอย่างแว็กซ์ SLW 150BS ที่นำมาใช้ เป็นขององค์ประกอบที่มีปริมาณมากที่สุดในแว็กซ์

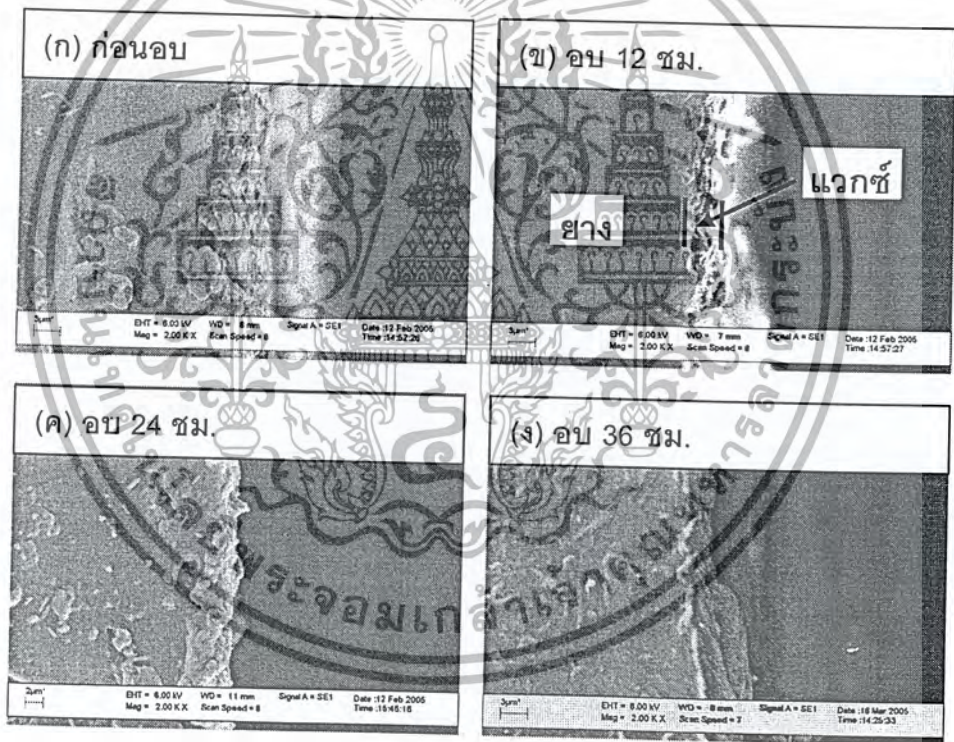
จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 150BS น่าจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่าตัวอย่างแว็กซ์ SLW 500N และแว็กซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากตัวอย่างแว็กซ์ SLW 150BS มีจุดหลอมเหลวต่ำสุด

และเมื่อพิจารณาค่าความร้อนของการหลอมเหลว พบว่า ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 500N มีพลังงานพันธะระหว่างโมเลกุลสูงกว่าตัวอย่างแว็กซ์ SLW 150BS และแว็กซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากตัวอย่างแว็กซ์ SLW 500N มีค่าความร้อนของการหลอมเหลวสูงสุด

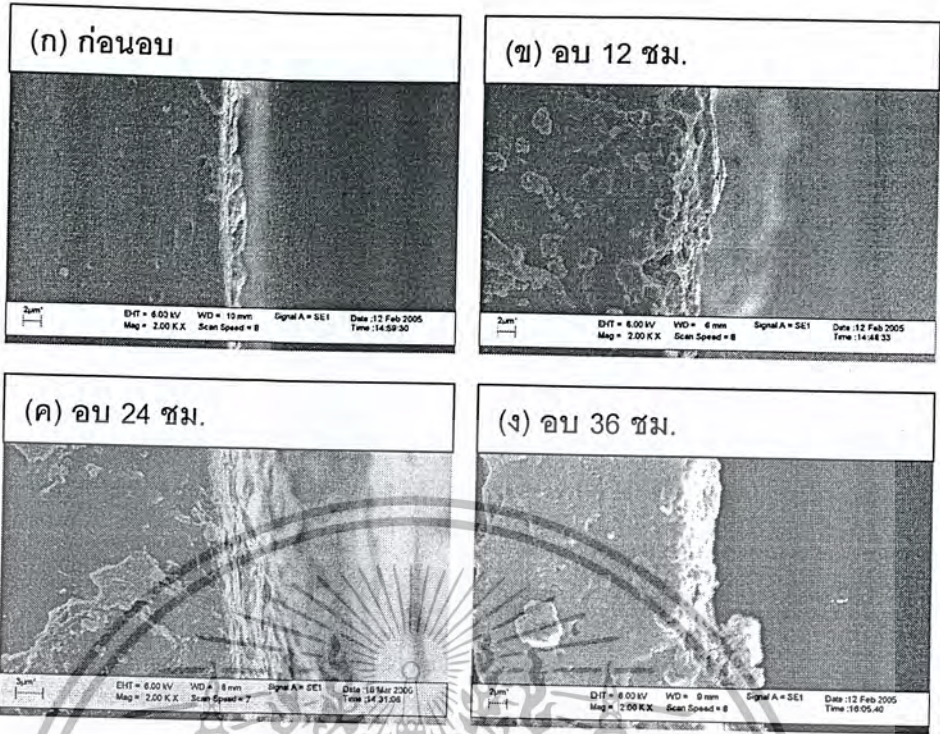
## 4.2 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์การแพร่ของแก๊สในผลิตภัณฑ์ยาง

### 4.2.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของการแพร่ของแก๊สบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยาง

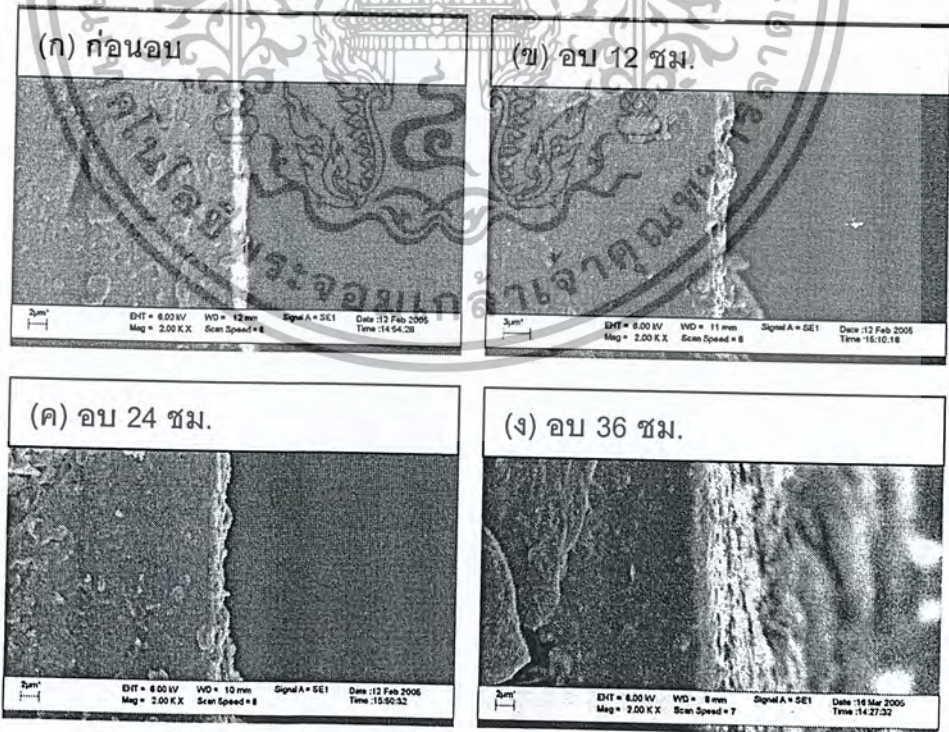
ลักษณะสัณฐานวิทยาของการแพร่ของแก๊ส สามารถสังเกตได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ซึ่งในการแพร่ของแก๊สบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยางนั้น เกิดจากการที่ผสมแก๊สลงไปเป็นอย่างมากเกินพอดี เมื่อทำการอบเร่งที่อุณหภูมิคงที่ 40°C เป็นเวลา 36 ชั่วโมงแล้ว จะเกิดการแพร่ของแก๊สขึ้น โดยจะเกิดเป็นผลึกของแก๊สเกาะอยู่ที่พื้นผิวของยาง ซึ่งความหนาของชั้นแก๊สจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบนานขึ้น จากการทดลองพบว่า ความหนาของชั้นแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีความหนาอยู่ในช่วง 2 – 6 ไมครอน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.8



รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของแก๊สที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ 9 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ในระยะเวลาต่างๆ



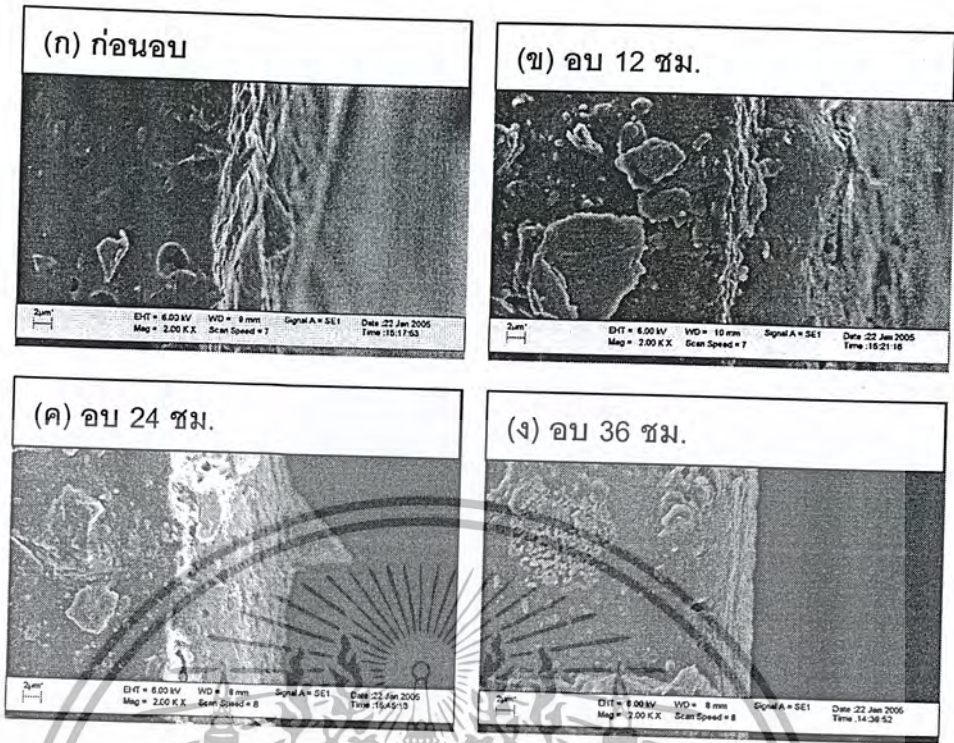
รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของเวกซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ 15 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ในระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของเวกซ์ SLW 150 BS 9 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง

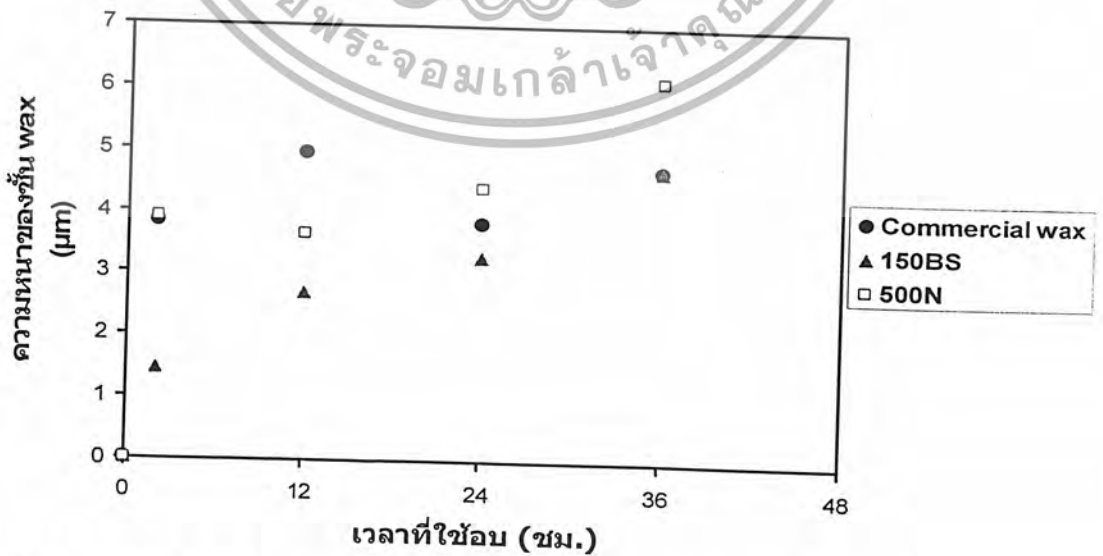
เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ในระยะเวลาต่างๆ นำไปใช้ประโยชน์ด้านกรคาร์คไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





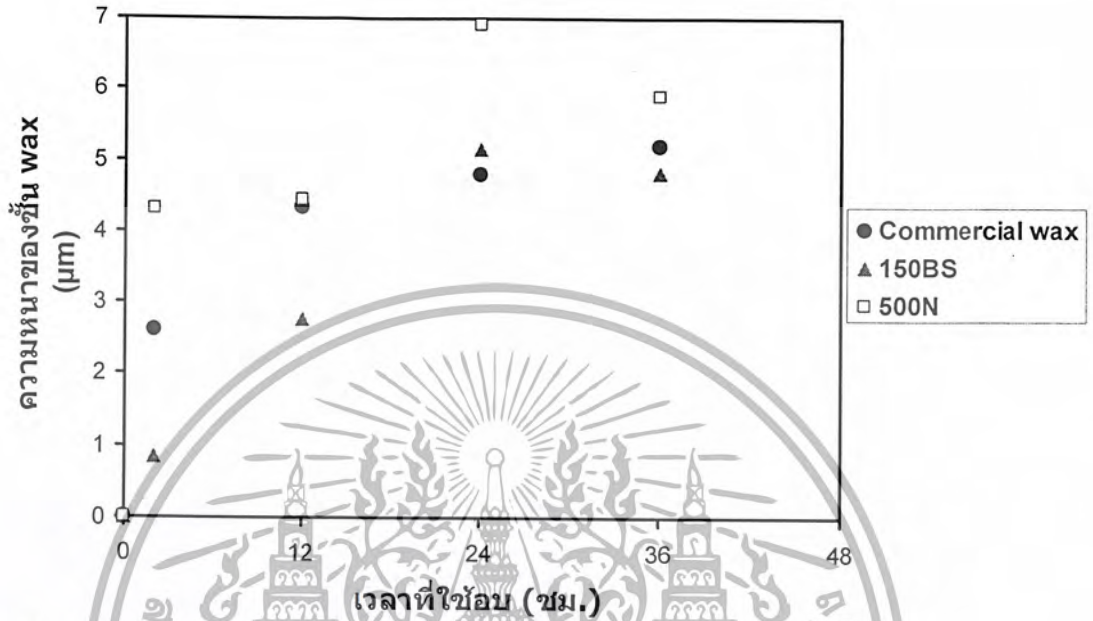
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของแว็กซ์ SLW 500 N 15 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ในระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 ถึง 4.8 สามารถเปรียบเทียบความหนาของชั้นแว็กซ์แต่ละชนิด และความแตกต่างของความเข้มข้นของแว็กซ์ที่ 9 และ 15 phr ที่แพร่ออกมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง ซึ่งแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบยางและความหนาของชั้นแว็กซ์

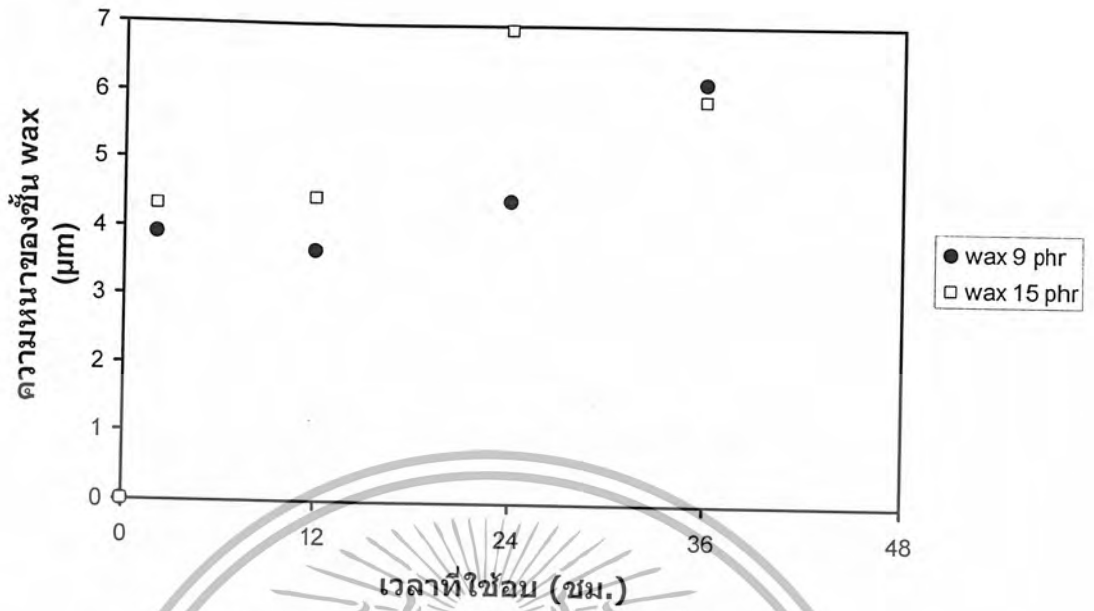
จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า ยางที่ผสมตัวอย่างแวกซ์ SLW 150BS และ SLW 500N จะมีความหนาของชั้นแวกซ์ใกล้เคียงกับยางที่ผสมแวกซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งความหนาของชั้นแวกซ์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาอยู่ในช่วง 2 – 5 ไมครอน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบยางและความหนาของชั้นแวกซ์ที่เกิดขึ้นจากการผสมแวกซ์ปริมาณ 15 phr

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ยางที่ผสมตัวอย่างแวกซ์ SLW 150BS และ SLW 500N จะมีความหนาของชั้นแวกซ์ใกล้เคียงกับยางที่ผสมแวกซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งความหนาของชั้นแวกซ์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาอยู่ในช่วง 2 – 6 ไมครอน

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาความเข้มข้นแวกซ์ที่ 9 และ 15 phr จากแวกซ์ชนิดเดียวกัน จะพบว่า ความหนาของชั้นแวกซ์จะมีค่ามากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของแวกซ์ที่ใช้ผสมลงในยางมีค่าสูงขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความหนาของชั้นแวกซ์ เมื่อตัวอย่างแวกซ์ SLW 500N ที่ผสมลงในยางมีความเข้มข้นของแวกซ์ต่างกัน

4.2.2 การประมาณค่าอัตราการแพร่ (Diffusion rate)

เนื่องจาก การนำแวกซ์มาใช้ในผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางกับโอโซนนั้น ตัวแปรที่สำคัญต่อการเลือกชนิดของแวกซ์คือ อัตราการแพร่ของแวกซ์ที่แวกซ์แพร่ขึ้นมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง ดังนั้น ผลการทดลองในส่วนนี้จึงศึกษาอัตราการแพร่ของแวกซ์ซึ่งสามารถหาได้จากความหนาของชั้นแวกซ์ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบมากขึ้น

4.2.2.1 การคำนวณหาปริมาณของแวกซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย ( $M_t$ )

จากตารางที่ 4.2 สามารถนำความหนาของชั้นแวกซ์ที่ได้จากการส่อง SEM มาคำนวณหาปริมาณของแวกซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย ( $M_t$ ) ได้โดยใช้สมการที่ 4.1

$$M_t = dA\rho_w \tag{4.1}$$

กำหนดให้ พื้นที่ผิวของยางมีค่าเท่ากับ 1 ตารางเซนติเมตร

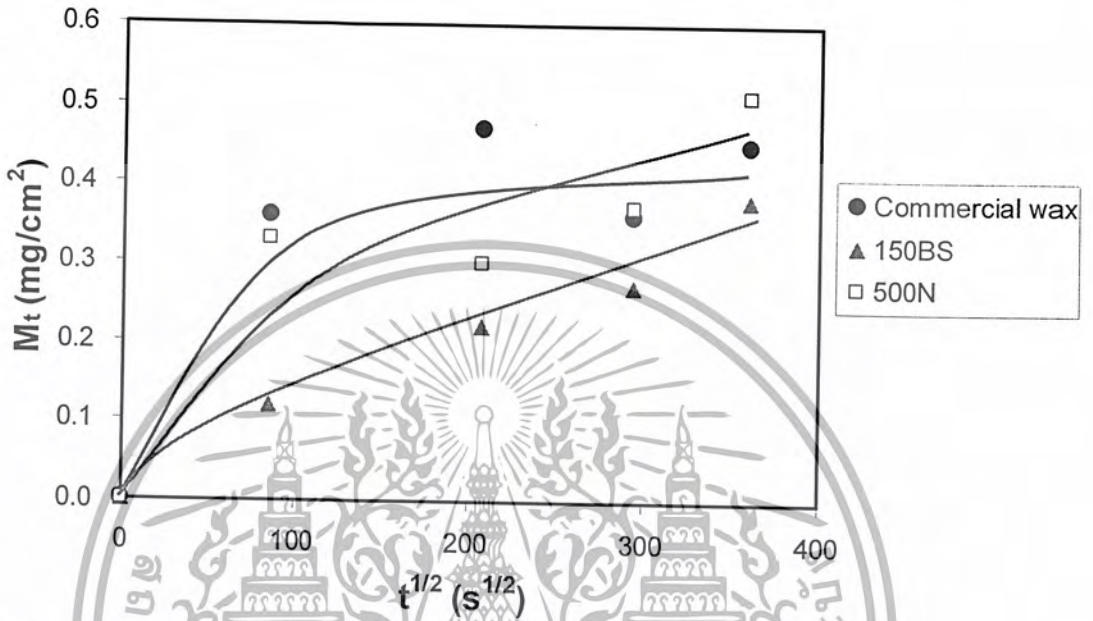
เมื่อ  $M_t$  = ปริมาณของแวกซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย

$d_w$  = ความหนาของชั้นแวกซ์

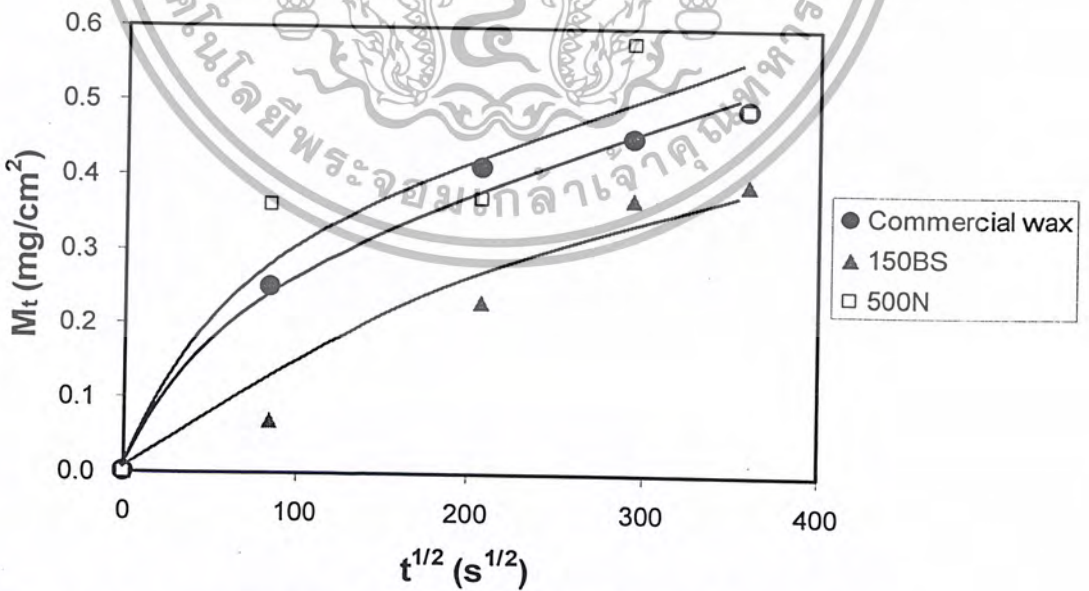
A = พื้นที่ผิวของยาง

$\rho_w$  = ความหนาแน่นของแว็กซ์แต่ละชนิด

จากสมการที่ 4.1 เมื่อนำมาคำนวณและพล็อตกราฟ จะได้ดังกราฟรูปที่ 4.12 ถึง 4.16



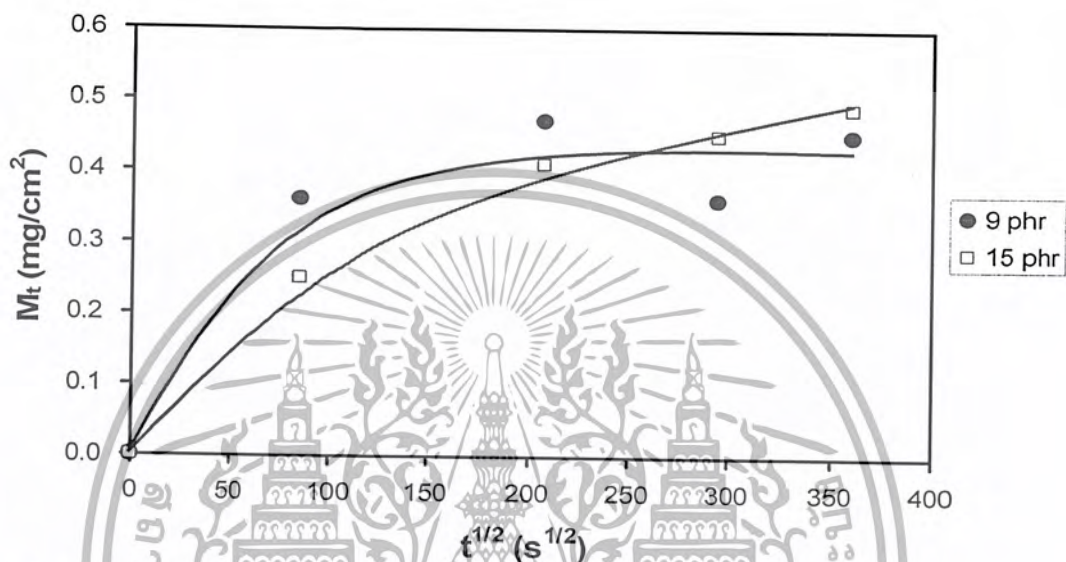
รูปที่ 4.12 อัตราการแพร่ของแว็กซ์แต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นแว็กซ์ 9 phr และที่อุณหภูมิอบคงที่ 40°C



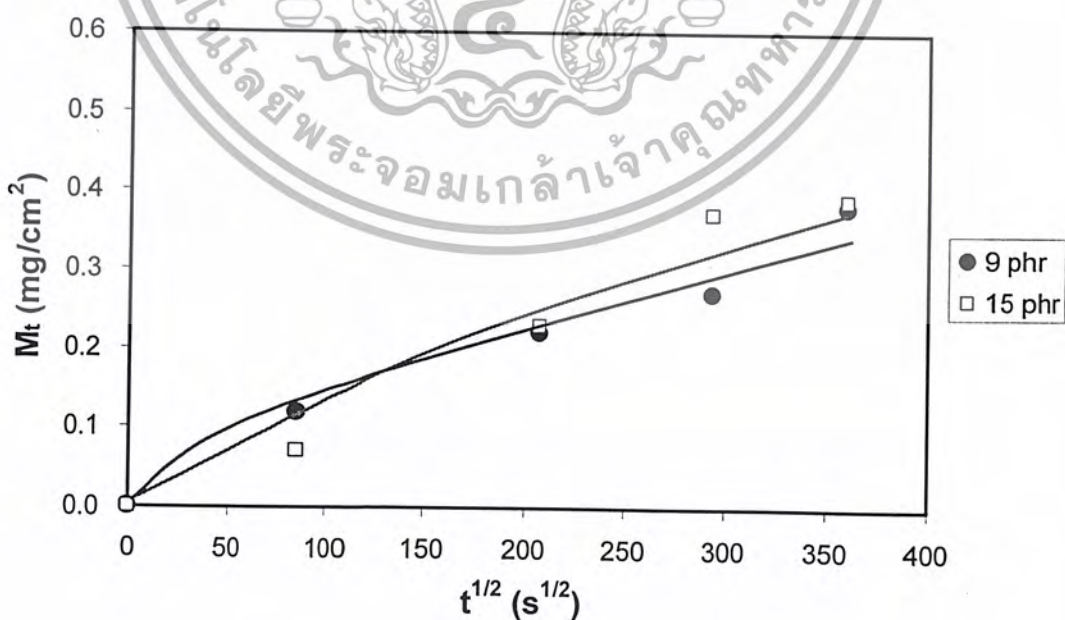
รูปที่ 4.13 อัตราการแพร่ของแว็กซ์แต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นแว็กซ์ 5 phr และที่อุณหภูมิอบคงที่ 40°C

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงให้เห็นว่า อัตราการแพร่ของตัวอย่างแวกซ์ SLW 500N และแวกซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์มีค่าใกล้เคียงกัน และมีความมากกว่าตัวอย่างแวกซ์ SLW 150BS

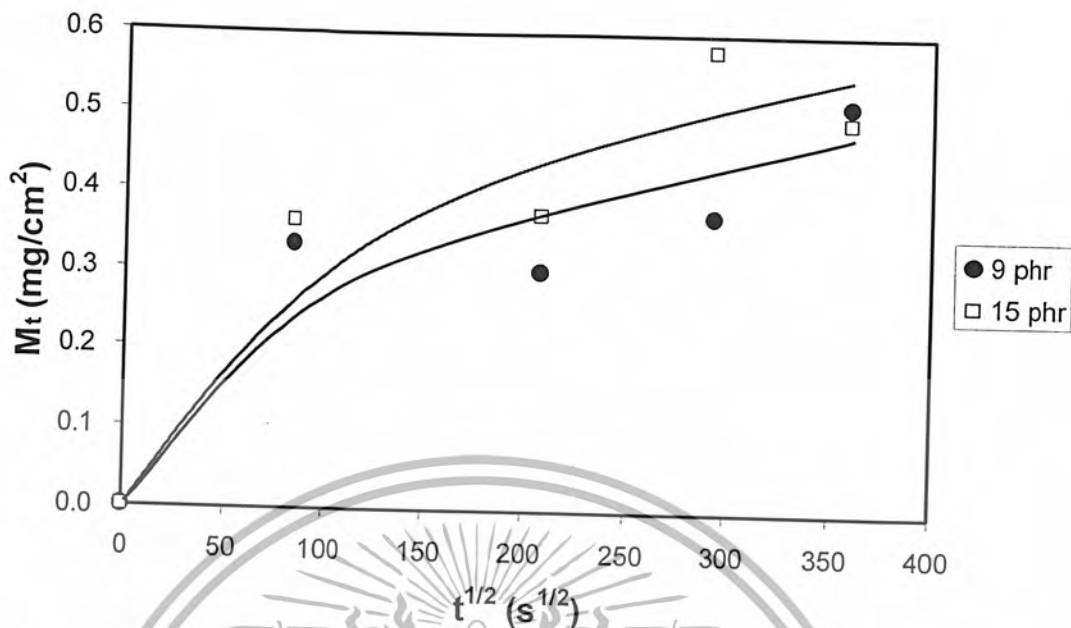
จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาความเข้มข้นแวกซ์ที่ 9 และ 15 phr จากแวกซ์ชนิดเดียวกัน พบว่าอัตราการแพร่ของแวกซ์ในช่วงเริ่มต้นจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของแวกซ์ที่ผสมลงในยางมีค่าสูงขึ้น แสดงได้รูปที่ 4.14 ถึง 4.16



รูปที่ 4.14 อัตราการแพร่ของแวกซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่แพร่ออกมา เมื่ออุณหภูมิอบคงที่ 40°C ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน



รูปที่ 4. อัตราการแพร่ของแวกซ์ SLW 150BS ที่แพร่ออกมา เมื่ออบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน



รูปที่ 4.16 อัตราการแพร่ของแวกซ์ SLW 500N ที่แพร่ออกมา เมื่ออบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน

#### 4.2.2.2 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusion coefficient: D)

จากอัตราการแพร่ที่กล่าวมาในข้อ 4.2.2.1 สามารถอธิบายได้ โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ ซึ่งสามารถช่วยให้การเปรียบเทียบปรากฏการณ์การแพร่ของแวกซ์แต่ละชนิดทำได้ง่ายขึ้น

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.18)

$$D = \left( \frac{M_t/t^{1/2}}{2c_\infty} \right)^2 \pi \tag{2.18}$$

เมื่อ  $M_t/t^{1/2}$  = ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $M_t$  และ  $t^{1/2}$  ในช่วงเริ่มต้น ซึ่งได้จากผลการทดลองที่สังเกตได้ จากการแพร่ของแวกซ์ที่แพร่ขึ้นมา เคลือบบนพื้นผิวของยาง

$c_\infty = c_0 - c$  โดยที่  $c_0$  = ค่าความเข้มข้นของแวกซ์เริ่มต้น

$c$  = ค่าความเข้มข้นของแวกซ์ที่แพร่ออกมา  
ที่  $t = 36$  ชม.

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ในช่วงเริ่มต้นที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2.18)

ตัวแปร	หน่วย	ชนิดของแว็กซ์					
		Commercial wax		SLW 150BS		SLW 500N	
		9 phr	15 phr	9 phr	15 phr	9 phr	15 phr
$M_t/t^{1/2}$	$\mu\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$	5.45	3.12	1.08	1.20	3.00	3.24
$C_\infty$	$\text{g}/\text{cm}^3$	0.0571	0.0922	0.0574	0.0924	0.0562	0.0907
$D$	$(\times 10^{-9}) \text{cm}^2/\text{s}$	3.83	1.00	0.26	0.13	2.24	1.00

จากตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของแว็กซ์มีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ในช่วงเริ่มต้นจะมีค่าน้อยลง และยางที่ผสมตัวอย่างแว็กซ์ SLW 500N จะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ใกล้เคียงกับยางที่ผสมแว็กซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะมีค่ามากกว่ายางที่ผสมตัวอย่างแว็กซ์ SLW 150BS



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา

โครงการนี้เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อศึกษาคุณลักษณะของตัวอย่างแวกซ์ และปรากฏการณ์แพร่ของแวกซ์ที่แพร่ออกมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง ซึ่งตัวอย่างแวกซ์ที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

##### 5.1.1 คุณลักษณะของตัวอย่างแวกซ์

ในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาคูณสมบัติของตัวอย่างแวกซ์ โดยใช้เครื่องมือดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) พบว่า

ตัวอย่างแวกซ์ SLW 150BS มีจุดหลอมเหลวประมาณ 40.5 และ 80.0 องศาเซลเซียส โดยสารที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 40.5 องศาเซลเซียส เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในแวกซ์ชนิดนี้ ซึ่งค่าจุดหลอมเหลวนี้อยู่ในช่วงของพาราฟินแวกซ์ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของการหลอมเหลวซึ่งมีค่า 128.6 จูลต่อกรัม พบว่าค่าพลังงานพันธะระหว่างโมเลกุลของสารชนิดนี้ต่ำ ดังนั้นแวกซ์ชนิดนี้น่าจะเป็นแวกซ์ประเภทพาราฟิน ที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นสายโซ่ตรง

ตัวอย่างแวกซ์ SLW 500N มีจุดหลอมเหลวประมาณ 60.7 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าจุดหลอมเหลวนี้อยู่ในช่วงของไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของการหลอมเหลวซึ่งมีค่า 157.6 จูลต่อกรัม พบว่าค่าพลังงานพันธะระหว่างโมเลกุลของสารชนิดนี้สูง ดังนั้นแวกซ์ชนิดนี้น่าจะเป็นแวกซ์ประเภทไมโครคริสตัลไลน์ ที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นสายโซ่กิ่ง

##### 5.1.2 การผสมระหว่างแวกซ์และยาง

จากการศึกษา พบว่าตัวอย่างแวกซ์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้น สามารถนำไปใช้ผสมกับยางได้ โดยสังเกตได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบว่าเกิดการแพร่ของแวกซ์ออกมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง ซึ่งความหนาของชั้นแวกซ์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาอยู่ในช่วง 2 – 6 ไมครอน ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะดังกล่าวของแวกซ์ชนิดเดียวกัน พบว่าความหนาของชั้นแวกซ์มีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแวกซ์ที่ผสมลงในยางมีค่าสูงขึ้น

### 5.1.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊ส

ในการศึกษาสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวอย่างแก๊สได้ โดยมีค่าอยู่ในช่วง  $0.1 \times 10^{-9}$  ถึง  $2.3 \times 10^{-9}$  ตารางเซนติเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวอย่างแก๊สยังแสดงให้เห็นว่า อัตราการแพร่ของตัวอย่างแก๊ส 500N มีค่าใกล้เคียงกันกับแก๊สที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ และมีความมากกว่าตัวอย่างแก๊ส 150BS เมื่อพิจารณาแก๊สชนิดเดียวกัน พบว่าอัตราการแพร่ของแก๊สในช่วงเริ่มต้นจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของแก๊สที่ผสมลงในยามีค่าสูงขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

1. เนื่องจากคุณสมบัติของแก๊สที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ มีข้อกำหนดที่สำคัญ คือ ปริมาณน้ำมันในแก๊สไม่เกินร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งตัวอย่างแก๊สที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ทำให้มีปริมาณน้ำมันในแก๊สตกค้างเป็นปริมาณสูงประมาณร้อยละ 2-4 โดยน้ำหนัก ดังนั้นควรจะหาวิธีในการลดปริมาณน้ำมันในตัวอย่างแก๊สให้น้อยลง เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน
2. จากการศึกษา พบว่าแก๊สที่ใช้ในการผสมกับยางเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางกับโอโซน ควรเป็นแก๊สที่เกิดจากการผสมกันระหว่างแก๊สหลายๆชนิด ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการผสมตัวอย่างแก๊สชนิดต่างๆเข้าด้วยกัน เพื่อหาอัตราส่วนของการผสมแก๊สที่เหมาะสมสำหรับช่วยในการผสมสูตรของยางและให้มีความสามารถในการป้องกันการเกิดโอโซนเนชั่นของยางได้อย่างเหมาะสม

## เอกสารอ้างอิง

1. กรมศุลกากร กระทรวงพาณิชย์, "สถิติการนำเข้า-ส่งออก", [Online], Available : <http://www.customs.go.th>
2. Prapot Chusengcharoen, "ปิโตรเคมีภัณฑ์", [Online], Available : [http://www.woranari.ac.th/woranari/scihouse\\_web/petrochemical.htm](http://www.woranari.ac.th/woranari/scihouse_web/petrochemical.htm)
3. OCS Rubber Parts, "Natural Rubber", [Online], Available : <http://www.ocsrubber.com/make.html>
4. โครงการส่งเสริมความสามารถพิเศษ Brand's Summer Camp มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, "ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์", [Online], Available : <http://www.sua.ac.th/educations/chemistry/topic8/pproduct.html>
5. พรทิพย์ ศรีโสภา, "Additives for Rubber", [Online], Available : [http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep\\_11\\_2547\\_additives\\_rubber.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2547_additives_rubber.pdf)
6. <http://www.specialchem4polymers.com/common/PA/product/displayproduct.aspx?or=docindex&menu=true&id=5531>
7. [http://www.chemicaland21.com/arokorhi/specialtychem/perchem/2,2'-DITHIOBIS\(BENZOTHAZOLE\).htm](http://www.chemicaland21.com/arokorhi/specialtychem/perchem/2,2'-DITHIOBIS(BENZOTHAZOLE).htm)
8. <http://www.titaniumart.com/photocatalysis-ti02.html>
9. อธิพล แจ่มชัด, "วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง", ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
10. อรุษา สรวารี, "สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1", ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
11. <http://www.e1.greatlakes.com/webapp/commerce/command/CategoryDisplay?cgrfnbr=6082&cgmenbr=5311&mainCat=products>
12. สถาบันราชภัฏจันทรเกษม, "Scanning Electron Microscope", [Online], Available : <http://elec.chandra.ac.th/courses/5513101/termwork/sem/index/>
13. ธนิต ผิวนิม, "Scanning Electron Microscope", [Online], Available : [http://www.sustrec.su.ac.th/staff\\_files/equipment\\_3\\_files/equipment\\_3.html](http://www.sustrec.su.ac.th/staff_files/equipment_3_files/equipment_3.html)
14. Hase Petroleum Wax Co., "Waxes", [Online], Available : <http://www.hpwax.com>
15. "Encyclopedia of Chemical Technology Vol.25", Fourth Edition, John Wiley & Sons, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

16. Franco Cataldo, "On the Ozone Protection of Polymers having Non-conjugated Unsaturation", Polymer Degradation Stability 72 (2001) 278-296.
17. เกรียงไกร ชูเดช, "DSC กับ Tzero เทคโนโลยี", [Online], Available :  
<http://www.sithiporn.co.th/72.pdf>
18. <http://www.copernic.udg.es/GRM/equipament/equipament.htm>
19. The 1992 Annual Book of ASTM Standard, Vol.05.03, D4419-90, 329-399.
20. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์, "แก๊สโครมาโทกราฟี", [Online], Available :  
<http://www.gpo.or.th/rdi/htmls/gc.html>
21. <http://www.dusithost.dusit.ac.th/~science/enter/GC/GCInstru01orn.htm>
22. ดวงมล อมรศักดิ์โสภณ, "Gas Chromatography-Mass Spectrometry", [Online], Available : <http://www.se-ed.net/mukdahan/instrument/>
23. <http://www.chem.agilent.com>
24. Paul Zoller, Ph.D., "Standard Pressure-Volume-Temperature Data for Polymers", Technomic Publishing Company, Inc., 1995.
25. S.H.Nah and A.G.Thomas, "Migration and Blooming of Waxes to the Surface of Rubber Vulcanizates", Journal of Polymer Science 18 (1980) 511-521.
26. ปกรณ์ พรหมอ่อน และคณะ, "การถนอมดอกไม้แห้งด้วยการเคลือบพอลิเมอร์เวกซ์", ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
27. Thai Lube Base Public Company Limited, "Sample Testing Report", 2005



# ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ก

การคำนวณหาปริมาณของแว็กซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย ( $M_t$ )

การหาค่าปริมาณของแว็กซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย ( $M_t$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1)

$$M_t = dA\rho_w \tag{4.1}$$

กำหนดให้ พื้นที่ผิวของยางเท่ากับ 1 ตารางเซนติเมตร

เมื่อ  $M_t$  = ปริมาณของแว็กซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย (มิลลิกรัม/ตารางเซนติเมตร)

$d$  = ความหนาของชั้นแว็กซ์ (เซนติเมตร)

$A$  = พื้นที่ผิวของยาง (ตารางเซนติเมตร)

$\rho_w$  = ความหนาแน่นของแว็กซ์แต่ละชนิด (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ตารางที่ ก.1 ค่าความหนาแน่นของแว็กซ์แต่ละชนิด [26]

ชนิดของแว็กซ์	Commercial wax	ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 150BS	ตัวอย่างแว็กซ์ SLW 500N
ค่าความหนาแน่น ( $g/cm^3$ )	0.9477	0.8169	0.8375

ตารางที่ ก.2 เปรียบเทียบความหนาของชั้นแว็กซ์แต่ละชนิดที่แพร่ออกมาเคลือบบนพื้นผิวของยางที่สังเกตได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

เวลา (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นแว็กซ์ (ไมครอน)					
	Commercial wax		แว็กซ์ SLW 150BS		แว็กซ์ SLW 500N	
	9 phr	15 phr	9 phr	15 phr	9 phr	15 phr
0	0	0	0	0	0	0
2	3.83	2.60	1.47	0.83	3.91	4.31
12	4.94	4.32	2.68	2.76	3.64	4.44
24	3.83	4.80	3.28	5.14	4.40	6.92
36	4.70	5.19	4.70	4.81	6.14	5.90

### วิธีการคำนวณ

ที่ Commercial wax 9 phr และเวลาที่ใช้อบ 36 ชม.

จากสมการที่ (4.1)

$$M_t = dA\rho_w$$

$$M_t = (4.7 \times 10^{-4} \text{ cm}) (1 \text{ cm}^2) (0.9477 \text{ g/cm}^3)$$

$$\therefore M_t = 4.5 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2 = 0.45 \text{ mg/cm}^2$$

ในการทำงานเดียวกัน การคำนวณหาปริมาณของแว็กซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย ของแว็กซ์ชนิดอื่นๆ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่กล่าวมาในข้างต้น

ตารางที่ ก.3 แสดงปริมาณของแว็กซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย ( $M_t$ ) ของแว็กซ์ชนิดต่างๆกัน ที่ได้จากการทดลอง

เวลาที่ใช้อบ t (h)	$t^{1/2}$ (s <sup>1/2</sup> )	$M_t$ (mg/cm <sup>2</sup> )					
		Commercial wax		SLW 150 BS		SLW 500 N	
		9 phr	15 phr	9 phr	15 phr	9 phr	15 phr
0	0	0	0	0	0	0	0
2	85	0.36	0.25	0.12	0.07	0.33	0.36
12	208	0.47	0.41	0.22	0.23	0.30	0.37
24	294	0.36	0.45	0.27	0.37	0.37	0.58
36	360	0.45	0.49	0.38	0.39	0.51	0.49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (D)

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.18)

$$D = \left( \frac{M_t/t^{1/2}}{2c_\infty} \right)^2 \pi$$

เมื่อ  $M_t/t^{1/2}$  = ค่าความชันของกราฟความสัมพัทธ์ระหว่าง  $M_t$  และ  $t^{1/2}$  ในช่วงเริ่มต้น ซึ่งได้จากผลการทดลองที่สังเกตได้ จากการแพร่ของแก๊สที่แพร่ขึ้นมา เคลือบบนพื้นผิวของยาง

$c_\infty = c_0 - c$  โดยที่  $c_0$  = ค่าความเข้มข้นของแก๊สเริ่มต้น

$c$  = ค่าความเข้มข้นของแก๊สที่แพร่ออกมา  
ที่  $t = 36$  ชม.

วิธีการคำนวณ

ที่ Commercial wax 9 phr และเวลาที่เข้อบ 36 ชม.

- น้ำหนักตัวอย่างยางเริ่มต้น ( $m_0$ ) = 728.28 กรัม
- น้ำหนักของตัวอย่างยางเมื่อผสมกับแก๊ส ( $m$ ) = 764.28 กรัม  
(ถ้าความเข้มข้นของแก๊ส 15 phr:  $m = 788.28$  กรัม)
- การหาปริมาตรของตัวอย่างยางที่ผสมแก๊สแต่ละชนิด

สามารถคำนวณหาปริมาตรได้จากสมการ  $V_{Rb} = \frac{m}{\rho_{Rb}}$

เมื่อ  $m$  = น้ำหนักของตัวอย่างยางที่ผสมแก๊สแล้ว (กรัม)

$\rho_{Rb}$  = ความหนาแน่นของยางที่ผสมแก๊สแล้ว (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$V_{Rb}$  = ปริมาตรของตัวอย่างยางที่ผสมแก๊ส (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$$\therefore V_{Rb} = \frac{764.28 \text{ g}}{1.2734 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 600.19 \text{ cm}^3$$

- การหาพื้นที่ผิวของตัวอย่างยาง

พื้นที่ผิวของตัวอย่างยางสามารถหาได้จากสมการ  $A = \frac{V_{Rb}}{\delta}$

เมื่อ  $A$  = พื้นที่ผิวของตัวอย่างยาง (ตารางเซนติเมตร)

$\delta$  = ความหนาของตัวอย่างยาง = 0.3 เซนติเมตร

$$\therefore A = \frac{600.19 \text{ cm}^3}{0.3 \text{ cm}} = 2000.63 \text{ cm}^2$$

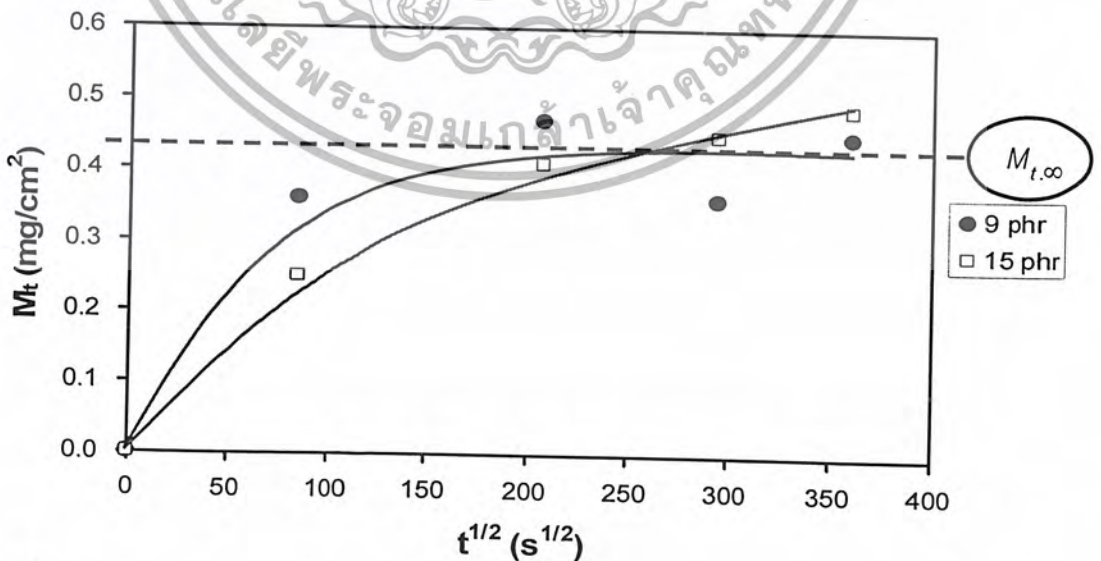
- การหาปริมาณแวกซ์ที่แพร่ออกมาที่พื้นที่ผิวของยาง  
ปริมาณแวกซ์ที่แพร่ออกมาที่พื้นที่ผิวของยางสามารถหาได้จากสมการ

$$\psi_w = M_{t,\infty} (2A)$$

เมื่อ  $\psi_w$  = ปริมาณแวกซ์ที่ออกมาเคลือบบนผิวของยาง (กรัม)

$M_{t,\infty}$  = ปริมาณของแวกซ์ที่ขึ้นมาเคลือบที่ผิวของยางต่อพื้นที่ผิวของยาง 1 ตารางหน่วย ที่สภาวะอนันต์ (กรัม/ตารางเซนติเมตร)

$A$  = พื้นที่ผิวของตัวอย่างยาง (ตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 4.14 อัตราการแพร่ของ Commercial wax ที่แพร่ออกมาเคลือบบนผิวยาง

เมื่ออบที่อุณหภูมิคงที่ 40°C ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \psi_w = (4.27 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2) (2 \times 2000.63 \text{ cm}^2) = 1.71 \text{ g}$$

- การหาปริมาณแก๊สที่เหลืออยู่ในตัวอย่างยาง  
ปริมาณแก๊สที่เหลืออยู่ในตัวอย่างยางสามารถหาได้จากสมการ

$$\psi_\infty = \psi_i - \psi_w$$

เมื่อ  $\psi_\infty$  = ปริมาณแก๊สที่เหลืออยู่ในตัวอย่างยาง (กรัม)

$\psi_i$  = ปริมาณแก๊สที่มีในตัวอย่างยางตอนเริ่มต้น (กรัม)

$$\therefore \psi_\infty = 36 - 1.71 = 34.29 \text{ g}$$

- การหาความเข้มข้นของแก๊สในตัวอย่างยาง  
ความเข้มข้นของแก๊สในตัวอย่างยางสามารถหาได้จากสมการ

$$c_\infty = \frac{\psi_\infty}{V_{Rb}}$$

เมื่อ  $c_\infty$  = ความเข้มข้นของแก๊สในตัวอย่างยาง (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$$\therefore c_\infty = \frac{34.29 \text{ g}}{600.19 \text{ cm}^3} = 0.0571 \text{ g/cm}^3$$

- การหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ ( Diffusion coefficient,  $D$  )  
สามารถหาได้จากสมการที่ (2.18)

$$D = \left( \frac{M_t/t^{1/2}}{2c_\infty} \right)^2 \pi$$

เมื่อ  $D$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (ตารางเซนติเมตร/วินาที)

$M_t/t^{1/2}$  = ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $M_t$  และ  $t^{1/2}$  ในช่วงเริ่มต้น ซึ่งได้จากผลการทดลองที่สังเกตได้ จากการแพร่ของแก๊สที่แพร่ขึ้นมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง

$$\therefore D = \left[ \frac{3.99 \times 10^{-6} \frac{g}{cm^2 \cdot s^{1/2}}}{2 \left( 0.0571 \frac{g}{cm^3} \right)} \right]^2 \times \pi = 3.83 \times 10^{-9} \frac{cm^2}{s}$$

ในทำนองเดียวกัน การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusion coefficient,  $D$ ) ของแก๊สชนิดอื่นๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่กล่าวมาในข้างต้น

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ในช่วงเริ่มต้นที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2.18)

ตัวแปร	หน่วย	ชนิดของแก๊ส					
		Commercial wax		SLW 150BS		SLW 500N	
		9 phr	15 phr	9 phr	15 phr	9 phr	15 phr
$M_t/t^{1/2}$	$\frac{\mu g}{(cm^2 \cdot s^{1/2})}$	5.45	3.12	1.08	1.20	3.00	3.24
$C_\infty$	$\frac{g}{cm^3}$	0.0571	0.0922	0.0574	0.0924	0.0562	0.0907
$D$	$(\times 10^{-9}) \frac{cm^2}{s}$	3.83	1.00	0.26	0.13	2.24	1.00