สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงสมบัติป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติ โดยใช้ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์

กาเหว่า เทพนอก
เศรษฐการ พรมศิริ

ร/ข
ก 5370
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 72252
วัน,เดือน,ปี 12 มิ.ย. 2550

.b 11765756
.i.....

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPROVEMENT OF OZONE RESISTANT FOR NATURAL RUBBER BY USING MICROCRYSTALLINE WAX

KAWAO TEPNOCK
SETTAKHAN PROMSIRI

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

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การปรับปรุงสมบัติป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์
โดย	นางสาวกาเหว่า เทพนอก
	นายเศรษฐการ พรมศิริ
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

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

.....กรรมการ
(อ.รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ)

.....กรรมการ
(อ.ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การปรับปรุงสมบัติป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์
นักศึกษา	นางสาวกาเหว่า เทพนอก
	นายเศรษฐการ พรมศิริ
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงงานนี้ศึกษาเรื่องการป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติด้วยการเคลือบผิวโดยใช้แว็กซ์ผสม ซึ่งทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ที่อัตราส่วนร้อยละ 20, 40, 60, 80 และ100 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบการป้องกันโอโซน โดยวิธีการอบเร่งในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโอโซน 50 pphm ระยะเวลา 72 ชั่วโมง พบว่ายางธรรมชาติที่เติมแว็กซ์ผสมที่สัดส่วนของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ร้อยละ 40 – 50 โดยน้ำหนักสามารถป้องกันโอโซนในยางธรรมชาติได้เป็นอย่างดี จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของการเคลือบผิวยางธรรมชาติของแว็กซ์ผสมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าแว็กซ์ผสมที่สัดส่วนดังกล่าวให้ความหนาอยู่ในช่วง 6 – 8 ไมครอน ซึ่งใกล้เคียงกับแว็กซ์ที่ใช้ในเชิงพานิชย์ทั่วไปอีกด้วย จากผลของสัดส่วนของการผสมไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ในลักษณะของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยต่อความสามารถในการแพร่ของแว็กซ์ผสม สามารถใช้ทำนายร้อยละการแพร่ของแว็กซ์ในยางธรรมชาติด้วยสมการเอมพิริคัลที่พัฒนาขึ้นได้

นอกจากนี้ ผลการศึกษาทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการละลายของแว็กซ์ผสมในยางธรรมชาติ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ย พบว่าสามารถใช้อธิบายความสามารถในการป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติที่สัดส่วนของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ที่เหมาะสมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Improvement of Ozone resistant for Natural rubber by using Microcrystalline wax
Student	Miss Kawao Tepnock
	Mr. Settakhan Promsiri
Degree	Bachelor Degree of Engineering
Major	Chemical Engineering
Advisor	Dr. Surat Areerat
Report for	Bachelor Degree of Chemical Engineering
	Department of Chemical Engineering
	Faculty of Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This senior project studied the ozone protection for natural rubber (NR) compounds by waxes surface coating. Anti-ozone waxes were blended between paraffin and microcrystalline waxes at various blend ratios ranging from 20, 40, 60, 80 and 100 by weight percentage. The anti-ozone testing by using an aging oven at temperature 40 °C, at given ozone concentration 50 pphm, aging time 72 hr. was conducted. From the experimental results, it was found that NR compounded with blended microcrystalline wax 40 – 50 %wt. is able to retard surface cracking and ozone degradation. The morphology of NR compounds surface coating by blended waxes was investigated by scanning electron microscope (SEM). The SEM micrographs reveal surface coating thickness within 6 – 8 μm. which is similar to typical commercial wax. The effect of microcrystalline wax weight fraction (in term of molecular weight average) on wax blooming ability was estimated by the developed empirical equation. Moreover, the study on solution thermodynamics of wax in NR compounds by applying the average solubility parameter can describe the ozone resistance property of the NR compound at the suitable wax blend ratio.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานเรื่องนี้ สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณะอาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณ และขอขอบคุณท่านที่ให้ความช่วยเหลือดังนี้

นายพงศ์ประภาส ปิยมโนชา และนายนิกร เกิดทองหลาง ที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำโครงงานมาโดยตลอด

เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เจ้าหน้าที่ประจำห้องสมุดสตางค์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการโครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร

คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมีอุตสาหกรรมและพอลิเมอร์เทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงงานอุตสาหกรรม สำหรับปริญญาตรี ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินโครงงาน IRPUS 24910013 ปี 2549

บริษัท แอ๊ดวานซ์ พอลิเมอร์ เจที จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์ยางธรรมชาติ และสารเคมีต่างๆ รวมทั้งเครื่องมือวิเคราะห์

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่ให้คำปรึกษาความช่วยเหลือ คำชี้แนะ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำงานที่ดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่บิดามารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่ได้ให้วิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดี

คณะผู้จัดทำ

นางสาวกาเหว่า เทพนอก

นายเศรษฐการ พรมศิริ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ข

กิตติกรรมประกาศ.....ค

สารบัญ.....ง

สารบัญภาพ.....ฉ

สารบัญตาราง.....ซ

สัญลักษณ์.....ฌ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....2

1.4 วิธีการดำเนินการ.....3

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับที่คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 ทฤษฎี.....4

2.1 ยาง.....4

2.1.1 ประเภทของยาง.....4

2.1.2 สารเติมแต่งสำหรับยาง.....5

2.1.3 ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ผสมกับยาง.....6

2.1.4 การทำให้ยางคงรูป.....8

2.1.5 การเสื่อมสภาพของยาง.....10

2.1.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโอโซเนชันของยาง.....10

2.1.7 การป้องกันโอโซนของแว็กซ์ในยาง.....11

2.2 แว็กซ์.....13

2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่.....13

2.4 การแพร่ของแว็กซ์.....15

2.5 เทอร์โมไดนามิกส์ของการตกผลึกของแว็กซ์ในยาง.....17

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การทดลอง....23
3.1 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา....23
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา....23
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา....23
3.4 วิธีการทดลอง....24
3.4.1 การศึกษาสมบัติของแว็กซ์ผสม....24
3.4.2 การศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง....26
3.4.3 การศึกษาการแพร่ของแว็กซ์ผสม....28

บทที่ 4 ผลการทดลอง....29
4.1 ผลการศึกษาสมบัติของแว็กซ์ผสม....29
4.1.1 ผลการศึกษาความหนาแน่นของแว็กซ์ผสม....29
4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของแว็กซ์ผสม....30
4.2 ผลการศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ....32
4.2.1 ผลการศึกษาปฏิกิริยาการคงรูป....32
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง....33
4.2.3 ผลการศึกษาความต้านทานต่อโอโซน....34
4.3 ผลการศึกษาการแพร่และลักษณะสัณฐานวิทยาของแว็กซ์ผสม....37
4.3.1 ลักษณะสัณฐานวิทยา....37
4.3.2 ผลการทดลองหาปริมาณการแพร่ของแว็กซ์ผสมโดยวิธีสกัด....39
4.3.3 ผลของอัตราส่วนของแว็กซ์ผสมต่อปริมาณการแพร่....40
4.3.4 ผลการศึกษาการละลายของแว็กซ์กับน้ำหนักโมเลกุล....42
4.3.5 ผลการศึกษาการละลายและการแพร่ของแว็กซ์กับน้ำหนักโมเลกุล....43

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....45
เอกสารอ้างอิง....47
ภาคผนวก ก....48
ภาคผนวก ข....51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 พันธะเคมีหรือการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน....8

รูปที่ 2.2 การเชื่อมโยงแบบพันธะคาร์บอน คาร์บอนที่เกิดจากการใช้เปอร์ออกไซด์....9

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างกลไกการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยงเปลี่ยน
พันธะเชื่อมโยงพอลิซัลฟีดิกเป็นโมโนซัลฟีดิก....10

รูปที่ 2.4 กลไกการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากโอโซน....11

รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางแสดงชั้นของ Commercial Wax ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยาง
เมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส....15

รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างและค่า End-to-end ของนอร์มอลอัลเน
2.6 ก. $C_{24}H_{50}$....15
2.6 ข. $C_{28}H_{58}$....16
2.6 ค. $C_{30}H_{62}$....16

รูปที่ 3.1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ MD-200S....25

รูปที่ 3.2 เครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์....26

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์....29

รูปที่ 4.2 DSC เทอร์โมแกรมการหลอมเหลวของแว็กซ์ผสม....30

รูปที่ 4.3 DSC เทอร์โมแกรมการตกผลึกของแว็กซ์ผสม....30

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคาร์บอนอะตอมกับอุณหภูมิของการหลอมเหลว....31

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงลักษณะการสุกตัวของยาง....32

รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของยางในระหว่างการคงรูปกับเวลาในการคงรูปของยางที่
อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส....33

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบโอโซน....34

รูปที่ 4.8 ลักษณะรอยแตกของยางธรรมชาติที่ผ่านการอบเร่งด้วยโอโซน....35

รูปที่ 4.9 แสดงค่าองศาของรอยแตก....36

รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของชั้นแว็กซ์ที่สัดส่วนผสม
ของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ในช่วง 0 - 100 ร้อยละโดยน้ำหนัก....38

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นแว็กซ์กับปริมาณของ
ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์....38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบยางและปริมาณแว็กซ์ต่อกรัมยางที่แพร่ออกมาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....40

รูปที่ 4.13 ปริมาณของแว็กซ์ผสมที่แพร่ออกมาเมื่ออบที่อุณหภูมิคงที่ 40 ^{0}ซ เวลา 36 ชม.....41

รูปที่ 4.14 พารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\overline{\delta}_s$) ของแว็กซ์ผสมชนิดต่างๆ.....43

รูปที่ 4.15 ปริมาณของแว็กซ์ผสมที่แพร่ออกมาข้างผิวยางและค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\overline{\delta}_s$) ของแว็กซ์ผสมชนิดต่างๆ.....44

รูปที่ ก.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยางแบบจานสั่น.....48

รูปที่ ก.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของยางในระหว่างปฏิกิริยาคงรูป.....49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 จำนวนคาร์บอนอะตอมของนอร์มอลอัลเคนที่มีผลต่อประสิทธิภาพ
ในการป้องกันโอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ.....12
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์.....24
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง.....34
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่พารามิเตอร์ *a, b, c,* และ *d* ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส.....42
ตารางที่ ข.1 จุดหลอมเหลวและค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลวของแว็กซ์.....51
ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\overline{\delta}_s$) ของแว็กซ์ผสมชนิดต่างๆ...53
ตารางที่ ข.3 ปริมาณของแว็กซ์ผสมที่แพร่ออกมาเคลือบที่ผิวของยางที่ได้จากการสกัด.....53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

n	จำนวนคาร์บอนอะตอม	อะตอม
S^i	เศษส่วนโมลในของแข็งขององค์ประกอบ i	
X^i	เศษส่วนโมลในของเหลวขององค์ประกอบ i	
$\left(T_m^\circ\right)_i$	จุดหลอมเหลวขององค์ประกอบ i	องศาเคลวิน
$\bar{\delta}_S$	พารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง	(แคลอรี/ซม.^{3})$^{1/2}$
$\bar{\delta}_L$	พารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของเหลว	(แคลอรี/ซม.^{3})$^{1/2}$
δ^i	พารามิเตอร์การละลายขององค์ประกอบ i	(แคลอรี/ซม.^{3})$^{1/2}$
$\left(T_m^\circ\right)_L$	จุดหลอมเหลวของของผสมขององค์ประกอบ i	องศาเคลวิน
$\left(\Delta H_f^\circ\right)_i$	ความร้อนของการหลอมเหลวขององค์ประกอบ i	แคลอรี/โมล
γ^i	แอกติวิตีขององค์ประกอบ i	
D	ความหนาแน่น	กรัม/ซม.^{3}
f^i	ฟูกาซิตีขององค์ประกอบ i	
f_L^i	ฟูกาซิตีขององค์ประกอบ iในวัฏภาคของเหลว	
f_S^i	ฟูกาซิตีขององค์ประกอบ iในวัฏภาคของแข็ง	
$\Delta G_{fus}(T)$	พลังงานอิสระในการหลอมเหลว	แคลอรี/โมล
$\Delta H_{fus}(T)$	เอนทัลปีในการหลอมเหลว	แคลอรี/โมล
$\Delta S_{fus}(T)$	เอนโทรปีในการหลอมเหลว	แคลอรี/โมล
R	ค่าคงที่ของก๊าซ	แคลอรี/(โมล•องศาเคลวิน)
C	ความจุความร้อนจำเพาะ	โมล/ซม^3
α	Degree of conversion	
t_{qt}	แรงบิดที่เวลาใดๆ ของการเชื่อมโยง	นิวตันต่อมม.^{2}
M_L	ค่าแรงบิดต่ำสุด	นิวตันต่อมม.^{2}
M_H	ค่าแรงบิดสูงสุด	นิวตันต่อมม.^{2}
S_{wax}	ความหนาของชั้นแว็กซ์	ไมครอน
w_{Micro}	สัดส่วนโดยน้ำหนักของไมโครคริสตัสไลน์แว็กซ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการนำวัตถุดิบยางมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางมีหลากหลายรูปแบบ เช่น ยางรถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ พื้นรองเท้ายาง ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตกาวยาง และผลิตภัณฑ์ยางสำหรับงานก่อสร้าง เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้มีสมบัติเฉพาะทางมากขึ้น เช่น สมบัติความต้านทานต่อโอโซน ทนน้ำมัน ทนสารเคมีรวมทั้งตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ และการใช้งานกลางแจ้ง เป็นต้น ยางสังเคราะห์ที่นิยมใช้ทั่วไป คือ ยาง BR, SBR, NBR, EPDM และยางที่มีส่วนผสมของคลอรีน เช่น ยางคลอริเนเตด (Chlorineted Rubber) หรือมีชื่อเรียกทางการค้าทั่วไปว่า ยางนีโอพรีน (Neoprene Rubber) โดยเฉพาะยางนีโอ-พรีนมีการใช้เป็นวัตถุดิบยางสำหรับงานชิ้นส่วนยางเพื่อการก่อสร้าง เช่น ยางรองคอสะพานและยางป้องกันการสั่นสะเทือนของโครงสร้างขนาดใหญ่ ที่มีการใช้งานในสภาพกลางแจ้ง เนื่องจากยางนีโอพรีนมีสมบัติป้องกันโอโซนได้เป็นอย่างดี ผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานยาวนานกว่ายางธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตาม ยางนีโอพรีนเป็นยางสังเคราะห์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศทำให้ต้นทุนการผลิตสูง รวมทั้งในอนาคตอันใกล้นี้ ผลิตภัณฑ์จากยางนีโอพรีนมีข้อจำกัดหรือข้อกีดกัน ด้านการนำไปใช้งานเนื่องจากการมีสารคลอรีนเป็นสารพิษตกค้าง ทำให้มีผลต่อสิ่งแวดล้อมจากการทำลายผลิตภัณฑ์ยางเมื่อหมดอายุการใช้งาน ดังนั้นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางเพื่องานก่อสร้าง จึงมีความสนใจที่จะนำยางธรรมชาติมาใช้ทดแทนยางนีโอพรีนในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ให้มากขึ้น แต่เนื่องจากโครงสร้างภายในส่วนใหญ่ของยางธรรมชาติเป็นพันธะคู่ โมเลกุลของยางมีลักษณะม้วนงอขดไปมาบิดเป็นเกลียวได้ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ มีสมบัติเปลี่ยนง่าย คือ เมื่อร้อนจะอ่อนตัวเหนียว และเมื่อเย็นจะแข็งและเปราะ อีกทั้งพันธะคู่มีความว่องไวมากต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนในบรรยากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และโอโซเนชัน (Ozonation) ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพและเกิดการสึกกร่อน นอกจากนี้ปฏิกิริยาของการเสื่อมสภาพของยางสามารถถูกเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความร้อน สิ่งปนเปื้อนจำพวกโลหะหนัก กำมะถัน แสง ความชื้น การบวมตัวเนื่องจากน้ำมันและตัวทำละลาย และความล้าเนื่องจากการสั่น เป็นต้น ดังนั้นในการนำยางธรรมชาติมาใช้ทดแทนยางสังเคราะห์ จึงต้องให้ความสำคัญในการปรับปรุงสมบัติป้องกันโอโซน และการนำไปใช้งานกลางแจ้งเพื่อให้มีอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นหัวข้อโครงงานนี้ ที่ทำร่วมกับโรงงานผลิตยางสำหรับการก่อสร้าง จึงเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ ซึ่งมีต้นทุนในการผลิตต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารเคมีชนิดอื่นๆ และสามารถให้ผลการป้องกันโอโซนได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้เพื่อพัฒนาการใช้ยางธรรมชาติ เป็นการลดต้นทุนในการผลิต รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติ การนำแว็กซ์มาใช้ในการในการป้องกันยางจากการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซน โดยมีกลไกอย่างง่ายที่อธิบายได้จากการแพร่ของแว็กซ์ออกมาที่ผิวนอกของผลิตภัณฑ์ยางเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ระดับไมโครเมตรเคลือบผลิตภัณฑ์ยางเป็นการป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซนในบรรยากาศ แต่อย่างไรก็ตามสัดส่วนและชนิดของแว็กซ์ที่นำมาใช้งานยังต้องมีการศึกษาทดลองและวิจัย เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างเหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบและสมบัติของแว็กซ์สำหรับการป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของแว็กซ์ในการปรับปรุงสมบัติการป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติ

1.2.3 เพื่อศึกษาอัตราการแพร่ของแว็กซ์และสมบัติการป้องกันโอโซนของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของแว็กซ์สำหรับการป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติ

1.3.2 ทดลองผสมตัวอย่างแว็กซ์กับยางธรรมชาติที่สัดส่วนต่างๆ กัน

1.3.3 ทดสอบสมบัติการป้องกันโอโซนของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

1.3.4 ศึกษาอัตราการแพร่ของแว็กซ์บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการดำเนินการ

1.4.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแว็กซ์และยาง

1.4.2 ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของตัวอย่างแว็กซ์

1.4.3 ทดลองผสมตัวอย่างแว็กซ์กับยางที่สัดส่วนต่างๆ กัน

1.4.4 ศึกษาปรากฏการณ์การแพร่ของแว็กซ์บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยาง และสมบัติการป้องกันโอโซน

1.4.5 สรุปผลการดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติป้องกันโอโซนได้ดีขึ้น

1.5.2 ลดการนำเข้ายางสังเคราะห์จากต่างประเทศ

1.5.3 สามารถนำยางธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยางได้มากขึ้น

1.5.4 สามารถประยุกต์ใช้ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ในอุตสาหกรรมยางได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยาง (Rubber) [1-3]

ยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ที่มีสมบัติยืดหยุ่นได้ และทนทานต่อการขัดสีสูง ซึ่งสามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ นอกจากนี้ยังมีความสามารถยึดติด (Tack) กับวัสดุอื่นได้ เช่น โลหะและสิ่งทอ การเชื่อมติดยางกับวัสดุเหล่านี้เป็นการเสริมสร้างความแข็งแรงของยางให้สูงขึ้น ทำให้สามารถนำยางนั้นไปใช้ในงานวิศวกรรมได้หลากหลายมากขึ้น

2.1.1 ประเภทของยาง

ยางแบ่งเป็นลักษณะโดยทั่วได้ 2 ชนิด คือ

1. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR) เป็นพอลิไอโซพรีน (cis-1,4 Polyisoprene) ประกอบด้วยไอโซพรีนมอนอเมอร์ต่อเชื่อมในช่วงระหว่าง 1,500 - 15,000 หน่วย น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 2.0×10^6 และจำนวนโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 10^6 มีจุดอ่อนตัว (Softening point) ประมาณ 120 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.92 - 0.93 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ยางธรรมชาติส่วนใหญ่ได้มาจากต้นยางพารา น้ำยางสดมีลักษณะข้นขาว มีเนื้อยางแห้ง 20 - 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสารหลายชนิดผสมอยู่ เช่น โปรตีน ไขมัน กลูโคไซด์ เกลือแร่ และเอนไซม์ เป็นต้น เมื่อทิ้งไว้นานจะบูดเน่า การเติมแอมโมเนียลงไปในน้ำยางจะช่วยรักษาสภาพน้ำยางข้นให้เก็บได้นาน การแยกเนื้อยางทำได้โดยเติมกรดแอซิติก เพื่อจับน้ำยางให้เป็นตะกอนแยกออกมา

ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่น (Elasticity) เพราะโครงสร้างโมเลกุลของยางมีลักษณะม้วนงอขดไปมาบิดเป็นเกลียวได้ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ทั้งยังมีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) มีความทนต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และทนต่อการขัดสี (Abrasion resistance) เหมาะกับงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานที่มีการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร หรือใช้รองรับน้ำหนักงานทุกประเภท เช่น ยางล้อรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ยางรองแท่นเครื่องในรถยนต์ ยางรองแผ่นวงจรอิเล็คทรอนิคส์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการใช้งานยังมีขีดจำกัด เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและสมบัติทางกายภาพไม่เสถียร คือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางจะอ่อนเยิ้มและเหนียว แต่จะแข็งและเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ

2. ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber) เกิดในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง เนื่องจากยางธรรมชาติเกิดขาดแคลน จึงสังเคราะห์ยางจากวัตถุดิบทางปิโตรเลียมมาใช้ทดแทน โดยชนิดแรก คือ พอลิบิวตาไดอีน (Polybutadiene) โดยใช้บิวตาไดอีนเป็นมอนอเมอร์ เมื่อนำมาผ่านการวัลคาไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ยางที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ที่มีความสำคัญและใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ยางสไตรีน-บิวตาไดอีน (SBR) ซึ่งจะมีสไตรีนประมาณ 20 - 23 เปอร์เซ็นต์

2.1.2 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additives for rubber) [4]

สารเติมแต่งสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่างๆ ที่ผสมลงไปในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณสมบัติตามต้องการ โดยยางที่ผสมแล้วจะไม่สามารถใช้งานได้เว้นแต่สารเคมีเหล่านี้เข้าทำปฏิกิริยากับยางก่อน ซึ่งสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีเรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางทำปฏิกิริยากับสารเคมีแล้วเรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanized rubber หรือ Cured rubber) ซึ่งสามารถจำแนกสารต่างๆ ที่ใช้ในการผสมยาง ได้ดังนี้

1. **สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent or Curing agent)** เป็นสารที่ทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยืดหยุ่นได้สูง สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (Sulphur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ นอกจาก 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนีโอพรีน

2. **สารตัวเติม (Filler)** เป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (Reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือ ซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (Inert filler or non - reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (Clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

3. **สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids)** สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่างกัน เช่น สารที่ช่วยให้ยางนิ่มในระหว่างการบดผสม ได้แก่ พวกน้ำมัน (Oils) และสารเคมีย่อยยาง (Peptizer) เช่น Pepton22 สารบางตัวช่วยควบคุมไม่ให้ยางมีความหยุ่นตัว (Nerve) สูงมากเกินไป เพราะจะทำให้สารเคมีที่เป็นผงเข้าเนื้อยางได้ยากในระหว่างการบดผสม เพราะยางจะพันลูกกลิ้งยาก สารพวกนี้ ได้แก่ Factice เป็นต้น

4. **สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators)** เป็นสารที่ช่วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างยางและกำมะถันเกิดได้เร็วขึ้น ลดระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปยาง ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณกำมะถันที่มากเกินไป และยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ได้แก่ สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบช้า ปานกลาง หรือเร็ว เช่น เอมีน (Amines) กัวนีดีน (Guanidine) ไทยูแรม (Thiurams) และ แซนเทต (Xanthates)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สารป้องกันยางเสื่อม (Antidegradants) เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไป โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นยางจึงมีสภาพที่อ่อนแอต่อการถูกปัจจัยต่างๆ เช่น โอโซน แสงแดด ออกซิเจนทำลายให้เสื่อมสภาพ การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine) TMQ (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized) และแว็กซ์ เป็นต้น

6. สารกลุ่มอื่น (Miscellaneous ingredients) สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในบางกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย ได้แก่

ก. สารหน่วง (Retarder) ใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้ยางที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน (Scorch) ตัวอย่างของสารหน่วงได้แก่ Benzoic acid และSalicylic acid เป็นต้น

ข. สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) ใช้สำหรับการทำให้ยางฟูในการทำยางฟองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ได้แก่ สาร Sodium bicarbonate และDinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น

ค. สารทำให้เกิดสี (Pigments) อาจเป็นสีอนินทรีย์ เช่น Cadmium sulphide (ให้สีแดงเข้ม ส้มและเหลือง) Chromium oxide (ให้สีเขียวขุ่น) และTitanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่างๆ มีสีที่สดขึ้น) ส่วนสีที่เป็นสีอินทรีย์ จะให้สีสด ทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสีอนินทรีย์

2.1.3 ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ผสมกับยาง

1. ผงเขม่าดำ (Carbon black) ผงเขม่าดำมีลักษณะเป็นฝุ่นผงสีดำ ซึ่งได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ผงเขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่สำคัญที่สุด และมีปริมาณการใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากผงเขม่าดำมีราคาถูก สามารถใส่ผงเขม่าดำในยางปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุด คือ สามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางได้เป็นอย่างมาก อาจทำให้ความแข็งแรงของยางเพิ่มมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล ลดการหดตัว และการบิดเบี้ยวของผลิตภัณฑ์ยางหลังจากขึ้นรูป เป็นต้น การใช้ผงเขม่าดำมีข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ยางที่ใส่สารตัวเติมผงเขม่าดำมีสีดำ เช่น ยางรถยนต์ สายพาน และยางรองคอสะพาน เป็นต้น

2. น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) น้ำมันอะโรมาติก คือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซีน (Benzene ring) อย่างน้อย 1 หมู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ส่วนใหญ่ได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (การกลั่นน้ำมันดิบ) น้ำมันอะโรมาติกจัดเป็นสารทำให้ยางนิ่มในกลุ่มของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันมิเนอรัลที่มีความสำคัญมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถเข้ากับยางได้หลากหลายชนิด น้ำมันอะโรมาติกเป็นสารที่เติมลงไปเพื่อทำให้ยางวัลคาร์ไนซ์มีความยืดหยุ่น ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ยางยังคงมีสมบัติที่ดีที่อุณหภูมิห้อง

3. ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีความหนาแน่น 5.6 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีความแข็ง (Moths hardness) เท่ากับ 4+ และมีการดูดซับน้ำมันเท่ากับ 10 – 25 เท่า ในการนำไปใช้กับพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้เป็นสารดูดกลืนแสงยูวี การเติมซิงก์-ออกไซด์ในปริมาณเล็กน้อย (1 – 5 phr) ซิงก์ออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูป แต่ถ้าเติมลงไปในปริมาณที่มากขึ้นจะทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อแรงดึงในขณะที่มีผลเล็กน้อยต่อความยืดหยุ่นของยาง

4. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate : $CaCO_3$) เป็นสารตัวเติมสีขาวเกิดจากการสะสมตะกอนเป็นเวลานาน เช่น ซากเปลือกหอยต่างๆ และแร่ เป็นต้น แคลเซียมคาร์บอเนตมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.50 – 2.65 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีพื้นที่จำเพาะ (Specific surface area of filler : BET) 10 – 30 ตารางเมตร/กรัม ไม่ทนกรด ไม่สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่สัมผัสกับกรดได้เนื่องจากจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นปานกลาง และช่วยให้แว็กซ์สามารถละลายเข้ากับยางได้มากขึ้นในระหว่างการบดผสม แต่ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดของยางลดลง

5. ไดฟีนีลกัวนิดีน (Diphenyl guanidine : DPG) เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาคงรูปในกลุ่มของกัวนิดีน มีลักษณะเป็นเม็ดมีสีมีขาวขุ่น มีกลิ่น รสขม และมีฤทธิ์เป็นด่าง จัดเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิซึ่งสามารถทำงานได้ดีเมื่อในระบบมีซิงก์ออกไซด์ หรือทำงานร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ และหากระบบมีการเติมกรดสเตียริกลงไปจะทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปช้าลง เพราะกรดจะไปหน่วงปฏิกิริยาคงรูป และผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลด้อยลง นอกจากนี้ไดฟีนีลกัวนิดีนยังสามารถทำให้ยางคงรูปเกิดการเปลี่ยนสีหากได้รับแสงแดดนานๆ ได้อีกด้วย

6. ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซิล ซัลโฟนาไมด์ (N – Cyclohexyl -2 –benzothiazyl - sulfonamide : CBS) เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วที่มีผลให้ยางคอมพาวด์มีระยะเวลาสกอร์ชที่ยาวนานขึ้น (Delayed action) ซึ่งนิยมใช้ในธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ เช่น SBR, IR, NBR และ EPDM เป็นต้น CBS เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นอนุพันธ์ของ MBT ที่ได้จากการเติมหมู่เอมีน ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งเมอร์แคปโต ซึ่งต้องการความร้อนเพื่อให้เกิดการแตกตัวไปเป็นเอมีน และ MBT ก่อนที่ MBT จะเข้าไปเร่งปฏิกิริยาการคงรูป ทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงมีความยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง

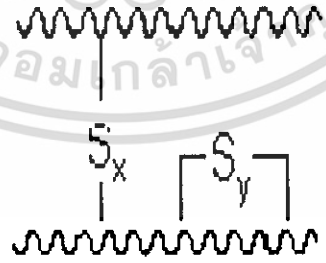
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การทำให้ยางคงรูป (Vulcanization or curing) [4]

การทำให้ยางคงรูปหรือทำให้ยางสุกคือการทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุลหรือที่เรียกกันว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนสภาพจากค่อนข้างอ่อน (มีความเป็นพลาสติกสูง) ไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก และทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น จึงสามารถนำยางไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อทำให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้

1. ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulphur vulcanization system) เป็นระบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางกับยางที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลไม่อิ่มตัว (Unsaturation) ซึ่งจำเป็นต้องมีสารตัวกระตุ้น (Activator) เช่น ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก สำหรับสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาคงรูป สัดส่วนของการใช้กำมะถันหรือสารตัวเร่งมีความสำคัญเพราะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เรียกว่าระบบธรรมดา หรือ Conventional vulcanization (CV system) ซึ่งจะมีพันธะเคมีแบบ Polysulphide crosslinks และแบบ Cyclic แต่ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมากจะได้พันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ Monosulphide crosslinks เรียกระบบนี้ว่าระบบประสิทธิภาพหรือ Efficient vulcanization (EV system) นอกจาก 2 ระบบดังกล่าวยังมีอีกระบบหนึ่งเรียกว่า ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi - EV system)

พันธะเคมีแบบ Polysulphide จะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีแต่ไม่ทนต่อความร้อน ในขณะที่ยางที่มีพันธะแบบ Mono- หรือ Disulphide จะให้สมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า แต่ยางจะเสถียรต่อความร้อนได้ดี



รูปที่ 2.1 พันธะเคมีหรือการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน

S_x เป็นการเชื่อมโยงระหว่างสองโมเลกุล

S_y เป็นการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน (Sulphur donor vulcanization system)** นอกจากการใช้ธาตุกำมะถันเป็นสารคงรูปแล้ว สารประกอบอินทรีย์ที่สลายตัวให้กำมะถันที่อุณหภูมิการอบให้ยางคงรูปก็สามารถใช้เป็นสารคงรูปได้ สารกลุ่มนี้ได้แก่ TMTD (Tetramethyl thiuram disulphide) และอนุพันธ์ของ Morpholine เช่น DTDM (Dithio-dimorpholine) การใช้สารประกอบพวกนี้เป็นสารคงรูปมีข้อดี คือ ลดปัญหาการเกิดการแพร่ (Bloom) และเนื่องจากจะไม่เกิดปฏิกิริยาจนกว่ากำมะถันจะสลายตัวออกมา ดังนั้นจึงลดปัญหาการเกิดยาง Scorch สารพวกนี้ยังก่อให้เกิดพันธะเคมีแบบ Monosulphide เป็นส่วนใหญ่ทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีมาก

3. **ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยสารที่ไม่มีกำมะถัน (Sulphur donor vulcanization system)**

- โลหะออกไซด์ เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปของยางนีโอพรีน โดยนิยมใช้ร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เพื่อเป็นตัวจับอะตอมคลอรีนที่เกิดขึ้น

- สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ (Difunctional group compound) เช่น ใช้ Quinine dioximes ในยางบิวไทล์ และใช้ Diamines ในยาง Fluoroelastomer เป็นต้น

- เปอร์ออกไซด์ เป็นสารคงรูปที่สำคัญสำหรับยางที่มีโมเลกุลอิ่มตัว (Saturated) หรือโมเลกุลที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยาในการสร้างพันธะเคมีเชื่อมโมเลกุล เช่น ยาง EPM เป็นต้น ในทำนองเดียวกันเปอร์ออกไซด์ก็สามารถใช้เป็นสารคงรูปสำหรับยางที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ ยาง SBR และยาง NBR ได้ และจะทำให้ยางเหล่านี้ทนต่อความร้อนได้ดี สารกลุ่มนี้ไม่ได้เข้าไปเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง แต่จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดเป็นแรดิเคิล (Radicals) แล้วสร้างพันธะเคมีแบบคาร์บอน-คาร์บอน ระหว่างสายโมเลกุลของยาง

รูปที่ 2.2 การเชื่อมโยงแบบพันธะคาร์บอน – คาร์บอนที่เกิดจากการใช้เปอร์ออกไซด์

นอกจากการใช้สารเคมีดังกล่าวแล้ว การฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา ก็สามารถทำให้ยางคงรูปได้เช่นกัน โดยเมื่อถูกรังสีโมเลกุลของยางจะแตกตัวให้แรดิเคิลและจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอนทำให้ยางที่ได้มีความเสถียรต่อความร้อน มีความบริสุทธิ์สูงเพราะไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน จึงเหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนยางที่ใช้ในทางการแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 การเสื่อมสภาพของยาง (Degradation of rubber) [2,5]

ยางส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลจะเสื่อมสภาพได้ง่าย โดยเฉพาะในภาวะการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด ออกซิเจน โอโซน หรือความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากพันธะคู่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับออกซิเจน และโอโซนในบรรยากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และโอโซเนชัน (Ozonation) การเสื่อมสภาพของยางสังเกตได้จากการแข็งตัว (Embrittlement) การอ่อนตัว (Softening) รวมถึงการล้าหรือการขยายตัวของรอยแตก การเสื่อมสภาพจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นที่อุณหภูมิสูง หรือภาวะที่มีโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การเสื่อมสภาพของยาง เกิดการเปลี่ยนแปลง 2 แบบ คือ

1. **การเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง (Cross-linking)** คือการเสื่อมสภาพที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่แล้วเกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic crosslink) แล้วเชื่อมโยงใหม่เป็นพันธะเชื่อมโยงแบบโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic crosslink) หลายๆ พันธะ ทำให้ยางมีความแข็ง (Hardness) เพิ่มมากขึ้น ความทนทานต่อการล้าลดลง เปราะ หักง่ายขึ้น ยางที่เกิดการเสื่อมสภาพแบบนี้ ได้แก่ ยางเอสบีอาร์ (SBR) ยางอีพีดีเอ็ม (EPDM) ยางไนไตรล์ (NBR) และยางคลอโรพรีน (CR)

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างกลไกการเสื่อมสภาพแบบเชื่อมโยง เปลี่ยนพันธะเชื่อมโยงพอลิซัลฟิดิกเป็นโมโนซัลฟิดิก

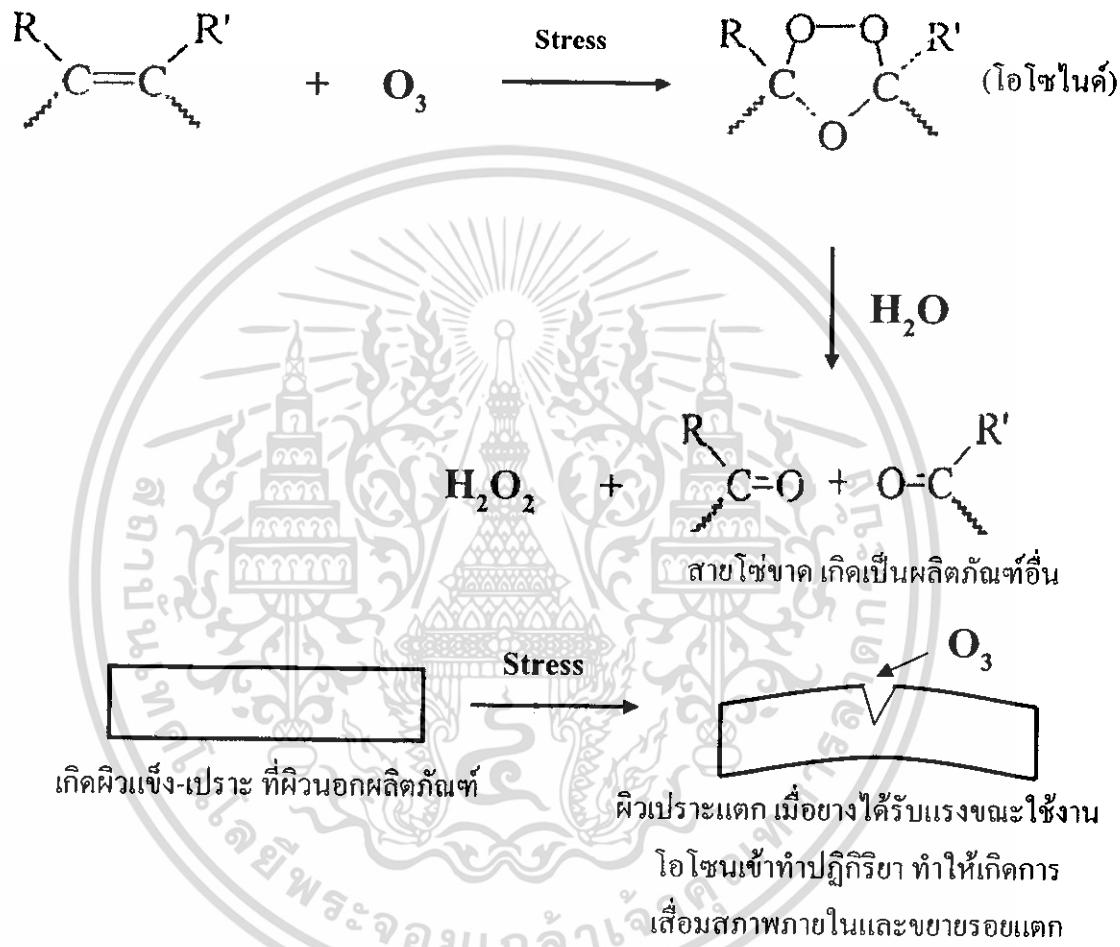
2. **การเสื่อมสภาพแบบสายโซ่ขาด (Chain scission)** คือ การที่สายโซ่พอลิเมอร์ขาดออกจากกัน ผลให้ยางนิ่มขึ้น มีความแข็งลดลง ความหนืดลดลง เนื่องจากความยาวของสายโซ่โมเลกุลสั้นลง ถ้าเสื่อมสภาพมากอาจเหลวเหนียวติดวัสดุข้างเคียง ยางที่เกิดการเสื่อมสภาพแบบนี้ ได้แก่ ยางธรรมชาติ (NR) และยางไอโซพรีน (IR)

2.1.6 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโอโซเนชันของยาง [6,7]

ยางที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว เมื่อใช้งานในสภาวะที่ถูกยืดออกภายใต้สภาพอากาศทั่วไปจะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผิว (Surface crack) รอยแตกนี้จะขยายตัวเมื่อยางได้รับแรงซ้ำๆ (Cyclic loard) การสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือการพับ (Flexing) ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการล้า และเสื่อมสภาพโดยโอโซนในบรรยากาศดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 เนื่องจากโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับยางที่พันธะคู่เกิดเป็นโครงสร้างของวงโอโซไนด์ (Ozonide) โอโซไนด์ที่เกิดขึ้นนี้จะไม่เสถียรและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล (Chain cleavage) หากยางอยู่ภายใต้ความเครียด (Strain) และรอยแตกที่เกิดขึ้นจะลึกขึ้นเรื่อยๆ หากปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.4 กลไกการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากโอโซน

2.1.7 การป้องกันโอโซนของแว็กซ์ในยาง [7, 8]

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางโดยทั่วไป ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายจากปัจจัยต่างๆ เช่น โอโซน แสงแดด ความร้อน และความชื้น เป็นต้น ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น IPPD (*N*-Isopropyl-*N*-phenyl-*p*-phenylene diamine) และ BHT (2,6-Di-*tert*,Butyl (-*p*-Cresol)) เป็นต้น การเติมแว็กซ์ผสมในยางจัดเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนอย่างหนึ่ง ซึ่งใช้ป้องกันได้ดีในสภาวะที่อยู่นิ่ง แว็กซ์ทำหน้าที่เป็นสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันโอโซนได้โดยการแพร่ออกมาและเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางๆ เคลือบอยู่ที่ผิวนอกของยาง เปรียบเสมือนเป็นกำแพงป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของโอโซนในอากาศได้ อย่างไรก็ดีถ้ายางได้รับแรงสั่นสะเทือนหรือแรงแบบไดนามิกส์ ฟิล์มแว็กซ์จะไม่สามารถใช้ป้องกันยางได้

แว็กซ์ที่นิยมใช้ในการป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากโอโซน ได้แก่ พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin waxes) และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ (Microcrystalline waxes) เมื่อพิจารณาความสามารถในการป้องกันโอโซนของพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ จะพบว่าพาราฟินแว็กซ์สามารถนำมาใช้เป็นสารเคลือบเพื่อป้องกันโอโซนได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของพาราฟินแว็กซ์จะสูงขึ้นด้วย ทำให้พาราฟินแว็กซ์ละลายในยางได้มากขึ้น ส่งผลให้ชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความหนาไม่เพียงพอที่จะเคลือบผิวได้ แต่สำหรับไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์จะสามารถใช้เป็นสารเคลือบเพื่อป้องกันโอโซนได้ดีกว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากไมโคคริสตัลไลน์แว็กซ์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าพาราฟินแว็กซ์ ดังนั้นการแพร่ออกมาที่ผิวยางเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ช่วงอุณหภูมิของการใช้งานอยู่ในช่วงกว้าง ดังนั้นการเคลือบผิวยางที่ดีจึงควรจะใช้แว็กซ์ที่ผสมกันระหว่างพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ โดยอัตราส่วนโดยมวลของการผสมคือ 3:1 และ 3:2 ทั่วไปนิยมผสมในยางประมาณ 2.0 - 3.5 phr ที่สภาวะ ณ อุณหภูมิต่างๆ สามารถอธิบายส่วนผสมของพาราฟินแว็กซ์ได้โดยใช้จำนวนคาร์บอนอะตอม ซึ่งจะบอกถึงความสามารถในการป้องกันโอโซน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำนวนคาร์บอนอะตอมของนอร์มอลอัลเคนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการป้องกันโอโซนที่อุณหภูมิต่าง ๆ [8]

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แว็กซ์ (Waxes) [9]

แว็กซ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมจากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น ประเภทของปิโตรเลียมแว็กซ์ สามารถแบ่งออกได้เป็นชนิดต่างๆ ตามโครงสร้างของแว็กซ์ได้ 3 ชนิด ดังนี้

1. พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin waxes) เป็นประเภทแว็กซ์ไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรง ซึ่งประกอบด้วย นอร์มอลอัลเคน 40 – 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และส่วนที่เหลือเป็น C_{18}- C_{36} ไอโซอัลเคน และไซโครอัลเคน ซึ่งพาราฟินแว็กซ์จะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 350 - 420 และมีความเป็นผลึกสูง โดยจุดหลอมเหลวประมาณ 38 – 74 องศาเซลเซียส

2. ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ (Microcrytalline waxes) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกากที่เหลือของกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ หรือจากก้นถังของน้ำมันดิบ โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง (Branch) และเป็นวง (Cyclic) ประกอบด้วย C_{15}- C_{60} (สูงที่สุด คือ C_{33} และ C_{52}) ซึ่งจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 490 - 800 และมีจุดหลอมเหลวประมาณ 57 - 100 องศาเซลเซียส

3. เซมิไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ (Semi - Microcrytalline waxes) เป็นแว็กซ์ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง และเป็นวงมากกว่าพาราฟินแว็กซ์ แต่น้อยกว่าไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์

จากความแตกต่างทางลักษณะโครงสร้างและจำนวนคาร์บอนของแว็กซ์ พบว่ามีผลต่อการแพร่ของแว็กซ์และประสิทธิภาพในการป้องกันโอโซน ดังนั้นนอกจากชนิดของแว็กซ์แล้ว การประมาณค่าการแพร่ของแว็กซ์ก็ยังมีความสำคัญ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแว็กซ์ [10]

ในการใส่แว็กซ์เข้าไปในยางนั้นจะใส่ระหว่างกระบวนการผสมก่อนที่จะทำการวัลคาไนซ์ยาง เมื่อเวลาผ่านไปยางซึ่งผ่านการวัลคาไนซ์แล้วจะเกิดฟิล์มเคลือบที่พื้นผิวของยาง ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การแพร่ของแว็กซ์ (Blooming) ปรากฏการณ์นี้มีความสำคัญอย่างมากต่อผลิตภัณฑ์ยาง คือ สามารถใช้ป้องกันการเกิดออกซิเดชันของยางกับโอโซนได้ การแพร่ของแว็กซ์เกิดจากการที่แว็กซ์สามารถละลายในยางได้ดีมากในระหว่างกระบวนการผสม และระหว่างกระบวนการวัลคาไนเซชัน แต่เมื่อทำการลดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของแว็กซ์ ($T < T_m$) แล้ว ความสามารถในการละลายของแว็กซ์ในยางจะมีค่าลดลงอย่างฉับพลันและแว็กซ์จะกลายสภาพอยู่ในสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated) ในยาง ดังนั้นทำให้เกิดการตกผลึกขึ้นในเนื้อยางและบนพื้นผิวของยาง เพื่อให้ความเข้มข้นของแว็กซ์ละลายอยู่ในยางนั้นลดลงจนมีค่าเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการแพร่กับเวลาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{M_t}{t^{1/2}} = 2(w_o - s_o)\left(\frac{D}{\pi}\right) \qquad (2.1)$$

เมื่อ M_t = ปริมาณของแว็กซ์ที่ขึ้นมาเคลือบผิวของยางต่อหน่วยพื้นที่ผิวของยาง

$t^{1/2}$ = เวลาที่ใช้ในการอบเร่ง

w_o = ความเข้มข้นของแว็กซ์ ณ จุดเริ่มต้น

s_o = ค่าความสามารถในการละลายของแว็กซ์ในยาง

D = ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่

จากสมการที่ (2.1) ได้มีผู้ทำการทดลอง แล้วพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนอย่างมาก ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงสร้างสมการใหม่ขึ้นมา โดยสมมติฐานให้แว็กซ์ที่มากเกินพอในยางนั้นตกผลึกออกมาเป็นทรงกลมรอบๆ ช่องว่าง (Flaw) ในยาง ซึ่งกระบวนการแพร่ที่เกิดขึ้นนั้นสามารถหาได้จาก Free-Energy Gradient อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาเฉพาะกระบวนการแพร่ในช่วงเริ่มต้น สามารถนำทฤษฎีการแพร่ของสารอย่างง่ายมาประยุกต์ใช้ได้ ดังนั้นจะประมาณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ได้จากผลการทดลอง โดยพล็อตกราฟระหว่าง M_t และ $t^{1/2}$ ซึ่งสามารถประมาณค่าโดยใช้สมการที่ (2.2) ได้ดังนี้

$$D = \left(\frac{M_t / t^{1/2}}{2c_\infty}\right)^2 \pi \qquad (2.2)$$

เมื่อ $\left[M_t / t^{1/2}\right]$ = ค่าความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง M_t และ $t^{1/2}$ ในช่วงเริ่มต้นของการแพร่ซึ่งได้จากผลการทดลองที่สังเกตได้จากการแพร่ของแว็กซ์ที่แพร่ขึ้นมาเคลือบบนผิวของยาง

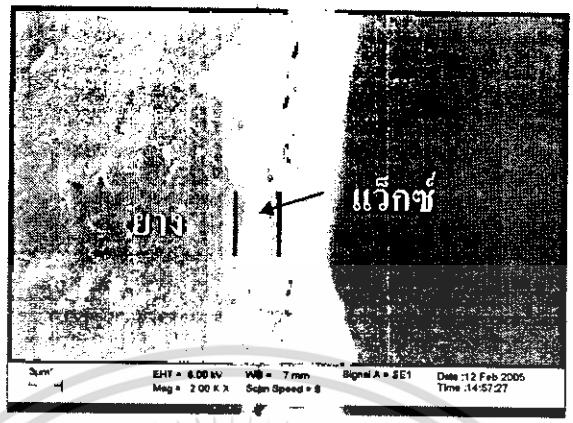
โดยที่ $c_\infty = c_0 - c$ โดยที่ c_0 = ค่าความเข้มข้นของแว็กซ์เริ่มต้น

c = ค่าความเข้มข้นของแว็กซ์ที่แพร่ออกมาที่ t = 36 ชม.

จากการศึกษาทดลองของขามแก้วและศรัณยา [10] พบว่า การแพร่ของแว็กซ์บนผิวของผลิตภัณฑ์นั้น เกิดจากการที่ผสมแว็กซ์ลงไปในยางมากเกินจุดอิ่มตัว ดังนั้นเมื่อทำการอบเร่งที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส จะเกิดการแพร่ของแว็กซ์ขึ้น โดยจะเกิดเป็นผลึกของแว็กซ์เกาะอยู่ที่พื้นผิวของยาง ซึ่งสามารถสังเกตได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ดังรูปที่ 2.5 โดยความหนาของชั้นแว็กซ์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบนานขึ้น พบว่ามีความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 2 - 6 ไมครอน และจากการศึกษาการแพร่ในช่วงเริ่มต้นที่ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

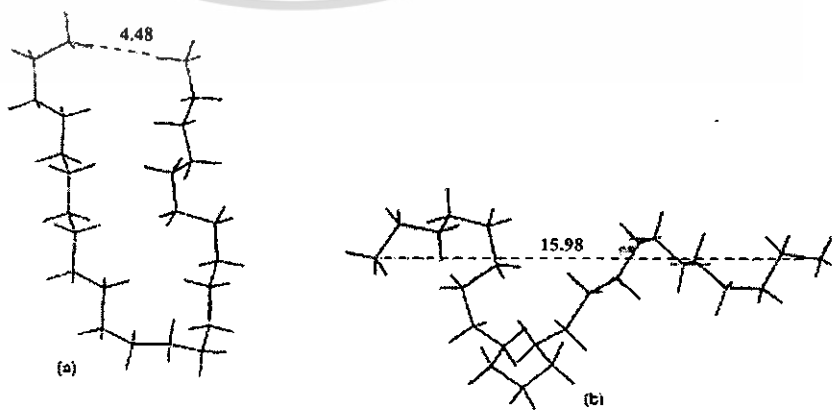
การคำนวณตามสมการที่ (2.2) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของแว็กซ์มีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ในช่วงเริ่มต้นจะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางแสดงชั้นของ Commercial Wax ที่แพร่ออกมาเคลือบผิวของยางเมื่อผ่านการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส [10]

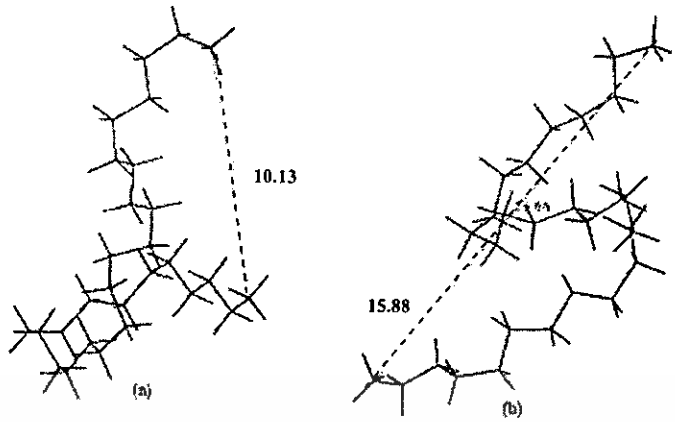
2.4 การแพร่ของแว็กซ์ (Blooming) [8,11]

การป้องกันยางจากโอโซนโดยใช้แว็กซ์นั้นจำเป็นต้องมีชั้นของแว็กซ์ที่เคลือบผิวของยางเป็นชั้นฟิล์มที่มีความหนาพอเหมาะ คือ การแพร่ของแว็กซ์ทำให้เกิดชั้นฟิล์มขึ้นมาเคลือบผิวยางซึ่งกำหนดได้จากการละลายและอุณหภูมิ โดยแรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการแพร่ คือ ความเข้มข้นของการผสมแว็กซ์ในยางที่สถานะอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated) เหนือระดับสมดุล ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของแว็กซ์ภายในของยางไปยังพื้นผิวของยาง โดยสภาวะที่แว็กซ์อยู่ในสถานะสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดเมื่ออุณหภูมิลดลง แว็กซ์ที่มีมากเกินพอนี้จะตกผลึกออกมายังพื้นผิวของยางเป็นชั้นฟิล์มที่ผิวยาง น้ำหนักโมเลกุลของนอร์มอลอัลเคนยังทำให้ลักษณะโมเลกุลของนอร์มอลอัลเคนมีความซับซ้อนของโครงสร้างทำให้เกิดการพับงอของโมเลกุล สามารถแสดงได้ด้วยค่าที่เรียกว่า End-to-end distances ดังรูปที่ 2.6

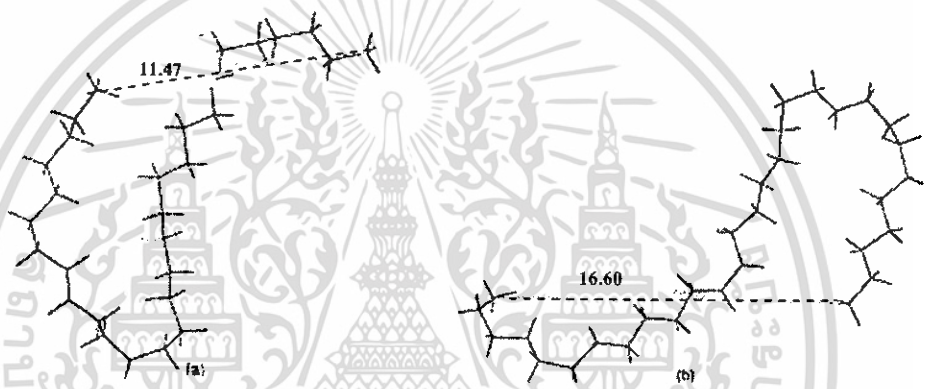


ก) โครงสร้างของ $C_{24}H_{50}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) โครงสร้างของ $C_{28}H_{58}$



ค) โครงสร้างของ $C_{30}H_{62}$

รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างและค่า End-to-end ของนอร์มอลอัลเคน $C_{24}H_{50}$ $C_{28}H_{58}$ และ $C_{30}H_{62}$

จากแบบจำลองโครงสร้างโมเลกุลของแว็กซ์ที่แสดงในรูปที่ 2.6 และน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน ทำให้จุดหลอมเหลวของแว็กซ์มีความแตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณของนอร์มอลอัลเคนที่แพร่ออกมายังผิวยางมีปริมาณที่แตกต่างกันด้วย โดยสามารถอธิบายการแพร่ที่สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลได้ดังสมการที่ (2.3)

$$M_m = a + b/M_w + c/M_w^2 + d/M_w^3 + ... \qquad (2.3)$$

เมื่อ M_m = ร้อยละการแพร่

M_w = น้ำหนักโมเลกุล

a, b, c, d = พารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ ที่อุณหภูมิใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.3) สามารถอธิบายการแพร่ของนอร์มอลอัลเคนได้เฉพาะที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมระหว่าง 21 - 28 อะตอม และค่าของพารามิเตอร์ a, b ,c และ d ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส คือ $a = -4.74 \times 10^{3}$; $b = 5.12\times10^{6}$; $c = -1.84\times10^{9}$; $d = 2.21\times10^{11}$

นั่นคือการที่นอร์มอลอัลเคนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและมีค่าระยะ End-to-End มาก การแพร่จะเกิดขึ้นได้ดีกว่าและเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากจุดหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นและความซับซ้อนของโครงสร้างที่เกิดการพับ โค้งงอของโมเลกุล ทำให้ต้องใช้พลังงานมากที่จะทำให้เกิดการแพร่ จึงแพร่ออกมาที่ผิวได้ในช่วงอุณหภูมิสูง ดังนั้นปริมาณการแพร่ออกมาของนอร์มอลอัลเคนจึงมีความแตกต่างกันที่เวลาใดๆ ตามน้ำหนักโมเลกุล คือ ถ้าที่อุณหภูมิเดียวกันนอร์มอลอัลเคนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยมีปริมาณการแพร่มากกว่า

2.5 เทอร์โมไดนามิกส์ของการตกผลึกของแว็กซ์ในยาง [12]

การทำให้ยางมีประสิทธิภาพในการป้องกันโอโซนที่สภาวะต่างๆ ได้ดีนั้น การแพร่ของแว็กซ์ต้องมีความสม่ำเสมอเท่ากันทุกพื้นที่ผิวของยาง ในกระบวนการผสมแว็กซ์การอธิบายถึงสมดุลของแว็กซ์ นั้นต้องอาศัยความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ระบบที่อยู่ในสภาวะสมดุลระหว่าง วัฏภาคของแข็งกับวัฏภาคของเหลว (Solid - Liquid Equilibrium) เกิดวัฏภาคขึ้นสองวัฏภาคในระบบ คือ แว็กซ์ที่เป็นของเหลวและแว็กซ์ที่เป็นของแข็ง สำหรับระบบใดๆ ในสมดุลระหว่างของเหลวและของแข็งฟูกาซิตีขององค์ประกอบ i เท่ากับในแต่ละวัฏภาค

$$\hat{f}_S^i = \hat{f}_L^i \tag{2.4}$$

โดย $\hat{f}^i$ แทนค่าฟูกาซิตีของแว็กซ์ สัญลักษณ์ตัวห้อย S และ L ใช้แสดงถึงวัฏภาคของแข็งและของเหลวตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์สมดุลของของผสมสามารถเขียนในเทอมของแอกติวิตีหรือสัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีได้ดังนี้

วัฏภาคของเหลว $$\hat{f}_L^i = \gamma_L^i x^i f_L^i \tag{2.5}$$

วัฏภาคของแข็ง $$\hat{f}_S^i = \gamma_S^i s^i f_S^i \tag{2.6}$$

จากสมการที่ (2.4) ถึงสมการที่ (2.6) จะได้ว่า

$$\gamma_S^i s^i f_S^i = \gamma_L^i x^i f_L^i \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

72252

จากสมการที่ (2.7) จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสัดส่วนโมลจะได้

$$\frac{s^i}{x^i} = \frac{\gamma_L^i f_L^i}{\gamma_S^i f_S^i} \tag{2.8}$$

เมื่อ s^i = สัดส่วนโมลขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคของแข็ง

x^i = สัดส่วนโมลขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคของเหลว

การคำนวณสมการที่ (2.8) จะต้องทราบค่า f_L^i / f_S^i ซึ่งการหาค่า f_L^i / f_S^i ได้นั้นเราจะต้องทราบค่าความจุความร้อนของแว็กซ์ทั้งในรูปของแข็งและของเหลว และค่าความร้อนในการหลอมเหลวจะทำให้สามารถคำนวณหาค่าพลังงานอิสระในการหลอมเหลว ($\Delta G_{fus}(T)$) ได้ ซึ่งค่าต่างๆ ที่ได้กล่าวมามีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีของสารในสองสถานะดังนี้

$$\Delta G_{fus} = RT \ln \frac{f_L^i}{f_S^i} \tag{2.9}$$

จากสมการที่ (2.9) สามารถจัดรูปสมการเพื่อหาค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\ln \frac{f_L^i}{f_S^i} = \frac{\Delta G_{fus}}{RT} \tag{2.10}$$

การคำนวณค่า $\Delta G_{fus}(T)$ นั้นจะอาศัยคำนวณจากค่า $\Delta H_{fus}(T)$ และ $\Delta S_{fus}(T)$ ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.11)

$$\Delta G_{fus}(T) = \Delta H_{fus}(T) - T\Delta S_{fus}(T) \tag{2.11}$$

จากสมการที่ (2.11) แทนค่าด้วยสมการที่ (2.10) ได้สมการที่ (2.12)

$$\ln \frac{f_L^i}{f_S^i} = \frac{\Delta H_{fus}}{RT} - \frac{T\Delta S_{fus}(T)}{RT} \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณค่าเอนทัลปี (Enthalpy) กับเอนโทรปี (Entropy) ที่เปลี่ยนแปลงจากของแข็งเป็นของเหลว สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\Delta H_{fus} = \int_{T}^{T_m} C_{pL} dT + \Delta H_{fus}(T_m) + \int_{T_m}^{T} C_{PS} dT$$

$$= \Delta H_{fus}(T_m) + \int_{T_m}^{T} \Delta C_P dT \qquad (2.13)$$

และ $$\Delta S_{fus} = \int_{T}^{T_m} \frac{C_{PL}}{T} dT + \Delta S_{fus}(T_m) + \int_{T_m}^{T} \frac{C_{PS}}{T} dT$$

$$= \Delta S_{fus}(T_m) + \int_{T_m}^{T} \frac{\Delta C_P}{T} dT \qquad (2.14)$$

โดย $\Delta C_p = C_{PL} - C_{PS}$

จากสมการที่ (2.14) และสมการที่ (2.13) แทนค่าในสมการที่ (2.11) เพื่อหาค่าพลังงานอิสระของการหลอมเหลว

$$\Delta G_{fus}(T_m) = \Delta H_{fus}(T_m) - T_m \Delta S_{fus}(T_m) \qquad (2.15)$$

ค่า $\Delta S_{fus}(T_m)$ จะหาได้จากสมการที่ (2.15) เนื่องจากว่าค่า $\Delta G_{fus}(T = T_m) = 0$ แล้วแทนค่า $\Delta S_{fus}(T_m)$ ในสมการที่ (2.14) ได้สมการที่ (2.16)

$$\Delta S_{fus}(T) = \frac{\Delta H_{fus}(T_m)}{T_m} + \int_{T_m}^{T} \frac{\Delta C_P}{T} dT \qquad (2.16)$$

แล้วนำค่าที่ได้จากสมการที่ (2.16) และสมการที่ (2.9) แทนลงในสมการที่ (2.15) ได้ดังสมการที่ (2.17)

$$\Delta G_{fus} = \Delta H_{fus}(T_m)[1 - \frac{T}{T_m}] + \int_{T_m}^{T} \Delta C_P dT - T \int_{T_m}^{T} \frac{\Delta C_P}{T} dT \qquad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) นำค่าที่ได้แทนในสมการที่ (2.12) เพื่อคำนวณค่าอัตราส่วนสัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีได้ดังสมการที่ (2.18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln\frac{f_L}{f_S}=-\frac{\Delta H_{fus}(T_m)}{RT}[1-\frac{T}{T_m}]-\frac{1}{RT}\int_{T_m}^{T}\Delta C_P dT+\frac{1}{R}\int_{T_m}^{T}\frac{\Delta C_P}{T}dT \qquad (2.18)$$

เนื่องจาก ΔC_p เป็นผลต่างระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคของแข็ง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพบว่าสารจำพวกไฮโดรคาร์บอนที่มวลโมเลกุลต่ำจะมีการจัดเรียงโครงสร้าง โดยที่มีความเป็นผลึกไม่มากดังนั้นจึงทำให้ค่า $\Delta C_p \approx 0$ ดังนั้นเทอมที่ 2 และ 3 ในสมการที่ (2.18) จึงสามารถละทิ้งได้ ดังนั้นสามารถลดรูปสมการที่ (2.18) ได้ดังสมการที่ (2.19)

$$\ln\frac{f_L}{f_S}=\frac{\Delta H_{fus}}{RT_m}\left(\frac{T_m}{T}-1\right) \qquad (2.19)$$

และสำหรับค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีขององค์ประกอบ i สามารถหาได้จากค่าพารามิเตอร์การละลายได้ดังนี้

$$\ln\gamma^i=\frac{v^i}{RT_m}\left(\delta^i-\bar{\delta}\right)^2 \qquad (2.20)$$

การคำนวณอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แอกติวิตีในวัฏภาคของแข็งและของเหลว สามารถหาได้จากสมการที่ (2.20) ได้เป็นสมการที่ (2.21)

$$\ln\frac{\gamma_L^i}{\gamma_S^i}=\frac{v^i}{RT_m}\left(\delta_L^i-\bar{\delta}_L^i\right)^2-\frac{v^i}{RT_m}\left(\delta_S^i-\bar{\delta}_S^i\right)^2 \qquad (2.21)$$

ดังนั้น ในการคำนวณค่าสัดส่วนโมลในวัฏภาคของแข็งและของเหลว ได้จากการนำค่าที่ได้จากสมการที่ (2.19) และสมการที่ (2.21) แทนในสมการที่ (2.8) ได้ดังสมการที่ (2.22)

$$\frac{x^i}{x^i}=\exp\left[\frac{\left(\Delta H_f^*\right)}{R\left(T_m^*\right)_L}\left(1-\frac{\left(T_m^*\right)_L}{\left(T_m^*\right)}\right)+\frac{v^i}{R\left(T_m^*\right)_L}\left\{\left(\bar{\delta}_L-\delta_L^i\right)^2-\left(\bar{\delta}_S-\delta_S^i\right)^2\right\}\right] \qquad (2.22)$$

เมื่อการตกผลึกของแว็กซ์ผสมที่มีองค์ประกอบร่วมของแว็กซ์ทั้งสองชนิดในลักษณะที่ผสมเข้ากันได้ดีในวัฏภาคของแข็ง ทำให้เทอมของสัดส่วนโมลของแว็กซ์แต่ละชนิด (องค์ประกอบi) ในวัฏภาคของแข็งและของเหลวมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเทอมซ้ายมือของสมการที่ (2.22) มีค่าเท่ากับหนึ่ง ทำให้เทอมยกกำลังของเอกซ์โพเนนเชียลมีค่าเท่ากับศูนย์ จึงสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (2.23)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\left(\Delta H_f^\circ\right)_L}{R\left(T_m^\circ\right)_L}\left(1-\frac{\left(T_m^\circ\right)_L}{\left(T_m^\circ\right)}\right)=-\left[\frac{v^i}{R\left(T_m^\circ\right)_L}\left\{\left(\bar{\delta}_L-\delta_L^i\right)^2-\left(\bar{\delta}_S-\delta_S^i\right)^2\right\}\right] \qquad (2.23)$$

เมื่อ $\left(T_m^\circ\right)_L=\sum_i \omega_i\left(T_m^\circ\right)$

δ_L^i, δ_S^i = พารามิเตอร์การละลายของแว็กซ์ (องค์ประกอบ i) ในวัฏภาคของเหลวและวัฏภาคของแข็ง ตามลำดับ

โดยพบว่าค่าพารามิเตอร์การละลายของแว็กซ์ทั้งในวัฏภาคของแข็งและของเหลวในช่วงของ n-$C_{44}H_{90}$ + n-$C_{50}H_{102}$ และ n-$C_{25}H_{52}$ + n-$C_{28}H_{58}$ ได้มีการนำเสนอโดยการศึกษาของ Anil K. Mehrtra และคณะ [12] โดยประมาณค่าพารามิเตอร์การละลายจากจำนวนคาร์บอนอะตอมของแว็กซ์ได้ดังสมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25)

$$\delta_L^i=7.41+0.5914\ln\left(n/7\right) \qquad (2.24)$$

$$\delta_S^i=8.50+5.763\ln\left(n/7\right) \qquad (2.25)$$

โดยเทอมพารามิเตอร์ต่างๆ ในสมการที่ (2.23) สามารถหาค่าได้จากการทดลองโดยการวัดค่าสมบัติเชิงความร้อนของแว็กซ์ด้วยเครื่อง DSC ยกเว้นเทอม $\bar{\delta}_S^i$ ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการแก้สมการที่ (2.23) ซึ่งค่า $\bar{\delta}_S^i$ ที่คำนวณได้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้แสดงลักษณะการตกผลึกของแว็กซ์ในวัฏภาคของแข็ง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Franco Cataldo [8] ได้ศึกษาการป้องกันโอโซนของพาราฟินแว็กซ์ในยางแทนการใช้ *p*-phenylendiamines ทั้งด้านสถิตยศาสตร์ (Static) และพลศาสตร์ (Dynamic) พบว่า ยางมีความต้านทานต่อโอโซนได้เช่นเดียวกับการใช้สารป้องกันการเสื่อมในยางได้

S.H. Nah และ A.G. Thomas [9] ได้ศึกษาการแพร่ออกมาที่ผิวยางของแว็กซ์ เพื่อป้องกันโอโซนในยางวัลคาไนซ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงการละลายของแว็กซ์ในยางจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และแว็กซ์จะกลายสภาพอยู่ในสถานะอิ่มตัวยวดยิ่ง (Supersaturated) ในยาง ผลให้เกิดการตกผลึกในเนื้อยางและบนผิวของยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขามแก้ว และศรัณยา [10] ได้ศึกษาการแพร่ของแว็กซ์บนพื้นผิวยางวัลคาไนซ์ พบว่า ความหนาของชั้นแว็กซ์ที่แพร่ออกมาเคลือบบนผิวของยางมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.0 - 6.0 ไมครอน และพบว่าความหนาของชั้นแว็กซ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของแว็กซ์และเวลาในการอบเร่งเพิ่มมากขึ้น แต่เนื่องจากเป็นการศึกษาการแพร่ของแว็กซ์เพียงชนิดเดียว ไม่ได้ศึกษาถึงสัดส่วนของแว็กซ์ที่มีผลต่อการแพร่ที่เวลาและอุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้นทางทีมวิจัยจึงมีความสนใจที่ศึกษาและพัฒนาต่อไป

S.S. Choi [11] ได้ศึกษาปริมาณการแพร่ของนอร์มอลอัลเคนระหว่าง n-$C_{22}H_{46}$ ถึง n-$C_{38}H_{78}$ ที่แพร่ในยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) และยางบิวตาไดอีน (BR) โดยทดสอบการแพร่ของแว็กซ์ที่ 80 องศาเซลเซียส 14 วัน พบว่า ปริมาณการแพร่ลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของนอร์มอลอัลเคนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงของ n-$C_{28}H_{58}$ ถึง n-$C_{38}H_{78}$ จะมีเปอร์เซ็นต์การแพร่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าการแพร่ยังขึ้นอยู่กับค่า End-to-End Distance ของนอร์มอลอัลเคนอีกด้วย

Ahmed Hammami และ K. Mehrotra [12] ได้ศึกษาถึงสมดุลวัฏภาคและสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter: DSC) ได้แก่ จุดหลอมเหลวและจุดการเกิดผลึก ของของผสมระหว่าง n-$C_{25}H_{52}$ + n-$C_{28}H_{58}$ และ n-$C_{44}H_{90}$+ n-$C_{50}H_{102}$ จากระยะห่างระหว่างจุดยอดของกราฟ 2 เส้น พบว่า การผสมของสาร 2 ชนิด จะทำให้เกิดผลึกที่มีรูปร่างเป็น Isomorphous หรือ Eutectic ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา

โครงงานนี้ได้ศึกษาโดยแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้ คือ การศึกษาเบื้องต้นเป็นการศึกษาสมบัติของแว็กซ์ผสม จากนั้นเป็นการผสมแว็กซ์ผสมกับยาง ศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง และศึกษาการแพร่และสัณฐานวิทยาของแว็กซ์บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อใช้อธิบายความสามารถในการป้องกันโอโซนของแว็กซ์ผสมในยางธรรมชาติ

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 แว็กซ์ชนิดต่างๆ

- แอนติออกซิแดนท์ อะลิฟาติกแว็กซ์ (Commercial wax : Com - wax)
- พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin waxes ; Para - wax)
- ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ (Microcrystalline waxes : Micro - wax)

3.2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

3.2.3 ผงเขม่าดำเกรด N330 (Carbon black N330)

3.2.4 น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)

3.2.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO)

3.2.6 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate : $CaCO_3$)

3.2.7 กรดสเตียริก (Stearic acid)

3.2.8 ไดฟีนีลกัวนิดีน (Diphenyl guanidine : DPG)

3.2.9 ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซิล ซัลโฟนาไมด์ (N – Cyclohexyl -2 – benzothiazyl - sulfonamide : CBS)

3.2.10 กำมะถัน (Sulfur)

3.2.11 ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen)

3.2.12 นอร์มอลเฮกเซน (*n* - Hexane)

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.3.1 ดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter : DSC)

3.3.2 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ MD-200S (Electronic Densimeter)

3.3.3 เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two - roll mill)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยางแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometer : ODR)

3.3.5 เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยแผ่นร้อน (Compression molding machine)

3.3.6 เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Tensile tester)

3.3.7 เครื่องวัดความแข็งแบบดูโรมิเตอร์ชนิด A (Shore A durometer)

3.3.8 ตู้อบบ่มเร่งยางด้วยโอโซน (Ozone test chamber)

3.3.9 ตู้อบความร้อน (Oven)

3.3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

3.3.11 กล้องวิดิโอบันทึกภาพพร้อมเลนส์กำลังขยายสูง (Microscope lens)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การศึกษาสมบัติของแว็กซ์ผสม

1. การเตรียมแว็กซ์ตัวอย่าง

1.1 ชั่งน้ำหนักพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ ตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.1

1.2 ผสมแว็กซ์ที่เตรียมในตารางที่ 3.1 เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

1.3 ทิ้งให้แว็กซ์แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์

สูตร	1	2	3	4	5	6	7
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Para – wax ต่อ Micro - wax	0 : 100	20 :80	40 : 60	50 : 50	60 : 40	80 : 20	100 : 0

2. การวัดความหนาแน่นโดยเครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ MD-200S

หาความหนาแน่นของแว็กซ์ตัวอย่างโดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ MD-200S ซึ่งสามารถใช้วัดความหนาแน่นของวัตถุได้ทั้งของแข็งและของเหลว ด้วยหลักการของอาร์คิมีดิส (Archimedes) โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของน้ำ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นค่าอ้างอิง มีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

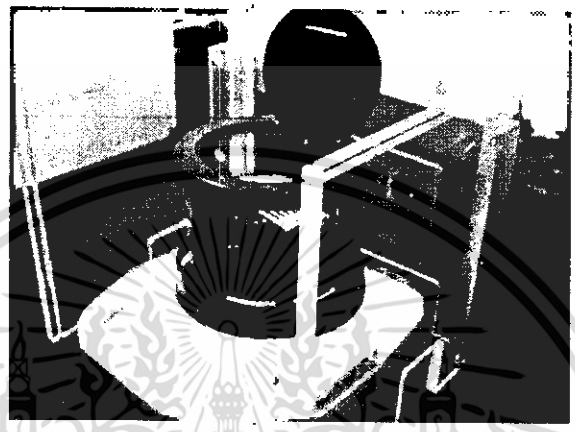
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ตั้งค่าหน้าจอแสดงผลเป็นศูนย์

2.2 ชั่งน้ำหนักของแว็กซ์ตัวอย่างในอากาศขณะแห้ง 3.65 - 4.50 กรัม

2.3 ชั่งน้ำหนักของแว็กซ์ตัวอย่างในน้ำแล้วบันทึกค่า (สังเกตดูว่ามีฟองอากาศอยู่ในน้ำหรือไม่ ถ้ามีให้กำจัดออกก่อนบันทึกค่า)

2.4 เครื่องชั่งจะแสดงผลเป็นค่าความหนาแน่นในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 เครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ MD-200S (Electronic Densimeter)

3. การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนโดยเครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

หาสมบัติทางความร้อนของแว็กซ์ตัวอย่างโดยใช้เครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) โดยวัดอุณหภูมิและการไหลของความร้อน จากการเปลี่ยนแปลงความร้อนของวัสดุเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ ทำให้ได้ข้อมูลทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณซึ่งวิธีการวิเคราะห์มีขั้นตอนดังนี้

3.1 ชั่งน้ำหนักแว็กซ์ตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิกรัม

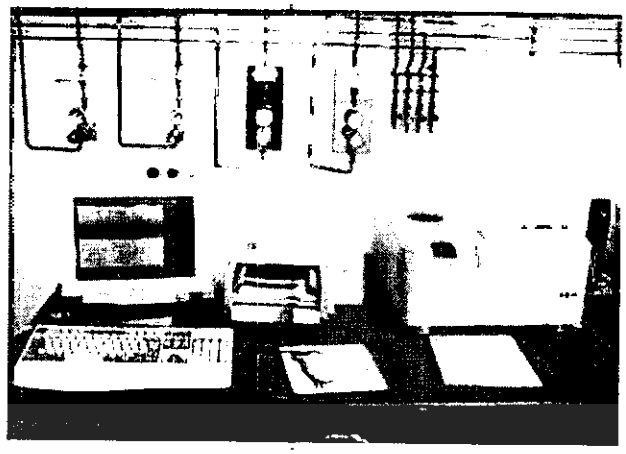
3.2 นำตัวอย่างบรรจุลงในเครื่อง DSC

3.3 วิเคราะห์ด้วยการสแกนแบบเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิด้วยอัตราเร็ว 2 °ซ ต่อนาที ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- สแกนแบบเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 จาก 40 - 100 °ซ
- สแกนแบบลดอุณหภูมิ จาก 40 - 100 °ซ
- สแกนแบบเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 2 จาก 40 – 100 °ซ

3.4 วิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่อง DSC เพื่อหาค่าความร้อนของการหลอมเหลว (ΔH_f^o) อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก (T_c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC)

3.4.2 การศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง

1. การเตรียมยางผสมสูตร (Rubber compound)

1.1 ผสมยางธรรมชาติ ผงเขม่าดำ และน้ำมันอะโรมาติก ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.2 เข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง จากนั้นทำการแบ่งยางออกเป็น 9 ส่วน

ตารางที่ 3.2 สูตรการผสมพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง

ชื่อพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง	น้ำหนัก (phr)
แว็กซ์ตัวอย่าง	15
ผงเขม่าดำ	40
น้ำมันอะโรมาติก	10
ซิงค์ออกไซด์	5
แคลเซียมคาร์บอเนต	10
กรดสเตียริก	2
ไดฟีนีลกัวนิดีน	0.2
ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซิล ซัลโฟนาไมด์	1
กำมะถัน	2

1.2 นำยางที่แบ่งไว้แต่ละส่วนมาผสมกับซิงค์ออกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต และแว็กซ์ตัวอย่างตามปริมาณที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นทิ้งไว้ในที่เย็นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

1.3 ผสมกับกรดสเตียริก ไดฟีนีลกัวนิดีนซัลเฟอร์ ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซิลซัลโฟ - นาไมด์ และกำมะถัน

1.4 เก็บตัวอย่างยางทั้ง 9 ตัวอย่างไว้ในอุณหภูมิต่ำเพื่อรอการขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การขึ้นรูปยาง (Vulcanization)

นำตัวอย่างยางทั้ง 9 ตัวอย่าง ที่ผ่านกระบวนการบดผสมมาตัดเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 เซนติเมตร นำเข้าเครื่องวัดการเชื่อมโยงของยางแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometer : ODR) รุ่น S/N TPD 1766 เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปยางผสมที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (t_c90) ด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยแผ่นร้อน โดยใช้แม่พิมพ์หนา 3 มิลลิเมตร อบด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความดัน 80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้เวลาที่ได้จากเครื่อง ODR รายละเอียดและหลักการทำงานของเครื่องแสดงดังภาคผนวก ก

3. การศึกษาสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่วัดได้แก่

3.1 ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D412-87 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Tensile tester) โดยเครื่องให้กำลังสูงสุด (Load cell) 500 นิวตัน ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตัดเป็นรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ASTM D3183 มีความหนา 2.0 ± 0.2 มิลลิเมตร การวัดค่าความต้านทานแรงดึงวัดที่ร้อยละ 100 ของร้อยละการยืดตัวและวัดร้อยละการยืดตัวสูงสุด

3.2 ความแข็งของยาง (Hardness) ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบดูโรมิเตอร์ชนิด A (Shore A durometer) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีความหนา 1 เซนติเมตร

4. การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อโอโซน

การทดสอบจะยึดถือตามมาตรฐาน ASTM D1149 ด้วยเครื่องทดสอบโอโซน ที่ความเข้มข้นของโอโซน 50 pphm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตัดชิ้นงานที่ใช้ทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2 × 8 เซนติเมตร และมีความหนา 1.9 – 2.5 มิลลิเมตร และทำการยืดชิ้นงานออก 20 เปอร์เซ็นต์ของความยาวของชิ้นงาน โดยยืดชิ้นงานทิ้งไว้ในห้องมืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นตรวจดูลักษณะภายนอกชิ้นงาน เพื่อพิจารณาขนาดและจำนวนของรอยแตกที่เกิดขึ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ความสามารถในการต้านทานโอโซน รวมทั้งใช้กล้องกำลังขยายสูงเพื่อตรวจนับ พร้อมกับรายงานผลในหน่วยของจำนวนต่อพื้นที่ ซึ่งเป็นค่าองศาของการแตก (Degree of cracking)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การศึกษาการแพร่ของแว็กซ์ผสม

สามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ ชิ้นงานส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย และอีกส่วนนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศอิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยมีวิธีการดังนี้

1. อบตัวอย่างยางด้วยตู้อบที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ซึ่งจะต้องนำตัวอย่างยางออกจากตู้อบทุกๆ 12 ชั่วโมง เพื่อหาความหนาของชั้นแว็กซ์ที่ออกมาเคลือบผิวยางที่เวลาต่างๆ กัน

2. นำตัวอย่างยางที่ผ่านการอบแล้วมาหัก (Crack) โดยนำไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อทำให้ยางแข็งสามารถหักได้ (Cryogenic cracking)

3. นำตัวอย่างยางที่หักแล้วมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา และความหนาของชั้นแว็กซ์ที่แพร่ออกมาเคลือบบนผิวของผลิตภัณฑ์ยาง

4. นำตัวอย่างยางที่ผ่านการอบแล้วน้ำหนักอยู่ในช่วง 0.08 – 0.10 กรัม บรรจุในบีกเกอร์ที่มีตัวทำละลายนอร์มอลเฮกเซน (*n* - Hexane) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทำการระเหยนอร์มอลเฮกเซนออกในตู้ดูดควันเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณของแว็กซ์ที่แพร่ออกมาได้จาก

$$\text{ปริมาณแว็กซ์ต่อ 1 กรัมยาง} = \frac{\text{น้ำหนักแว็กซ์เริ่มต้น} - \text{น้ำหนักแว็กซ์ที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างยาง}}$$

5. นำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

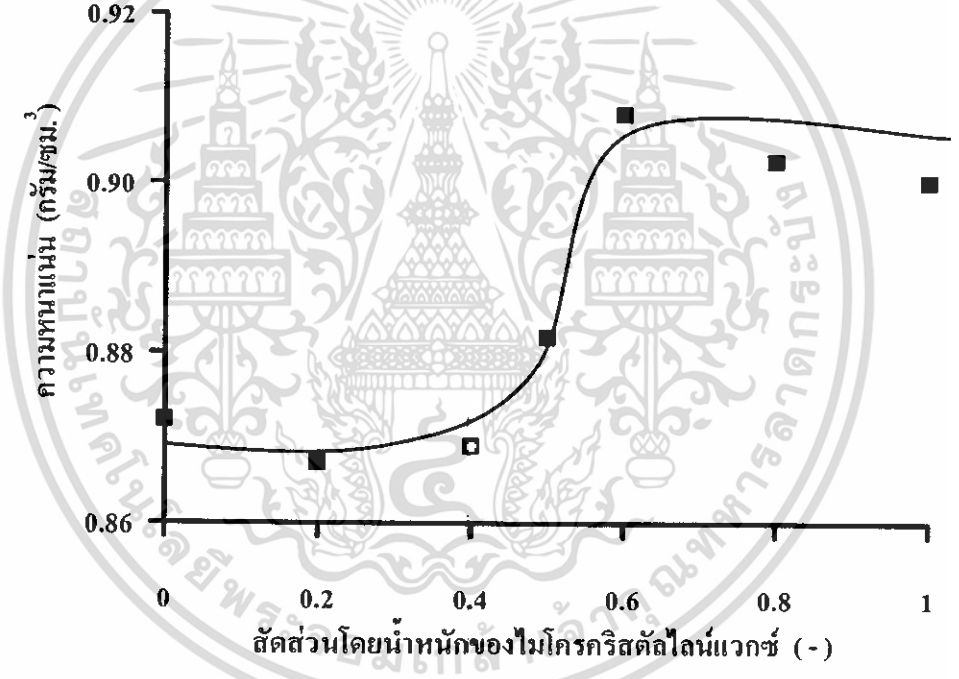
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาสมบัติของแว็กซ์ผสม

4.1.1 ผลการศึกษาความหนาแน่นของแว็กซ์ผสม

นำตัวอย่างแว็กซ์ที่เตรียมไว้ 7 ตัวอย่าง วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Electronic Densimeter และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบความหนาแน่นของแว็กซ์กับปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ได้ดังรูปที่ 4.1



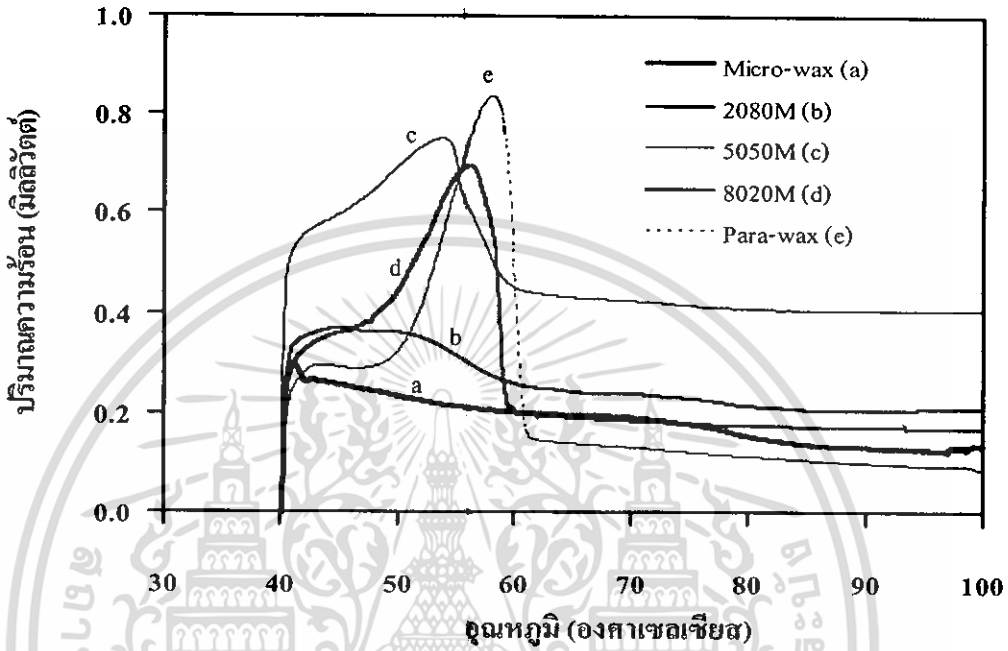
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์

จากรูปที่ 4.1 จากการทดลอง พบว่าไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์บริสุทธิ์และพาราฟินแว็กซ์บริสุทธิ์ มีความหนาแน่น 0.90 และ 0.87 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ลดลง ความหนาแน่นของแว็กซ์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ 60 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนักของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ความหนาแน่นของแว็กซ์ผสมจะมีค่าลดลงจนกระทั่งความหนาแน่นของแว็กซ์ผสมมีค่าคงที่ที่ 40 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนักของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์

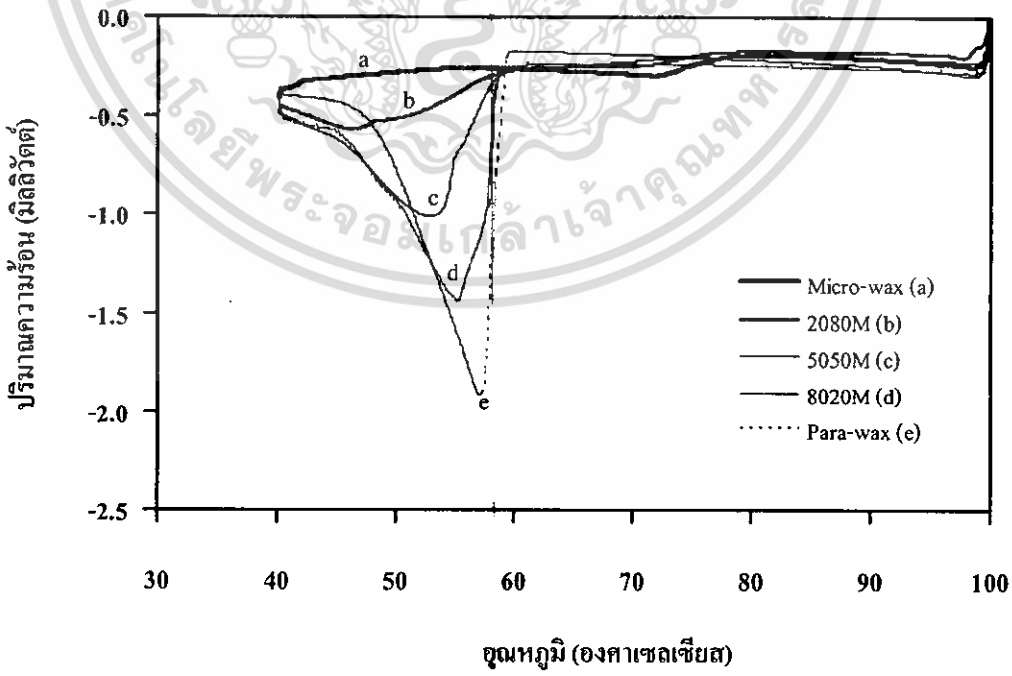
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของแว็กซ์ผสม

นำตัวอย่างแว็กซ์ 5 มิลลิกรัม วิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter : DSC) เพื่อใช้วัดอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการตกผลึก(T_g) ได้ผลการทดลองตามเทอร์โมแกรมดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 DSC เทอร์โมแกรมการหลอมเหลวของแว็กซ์ผสม



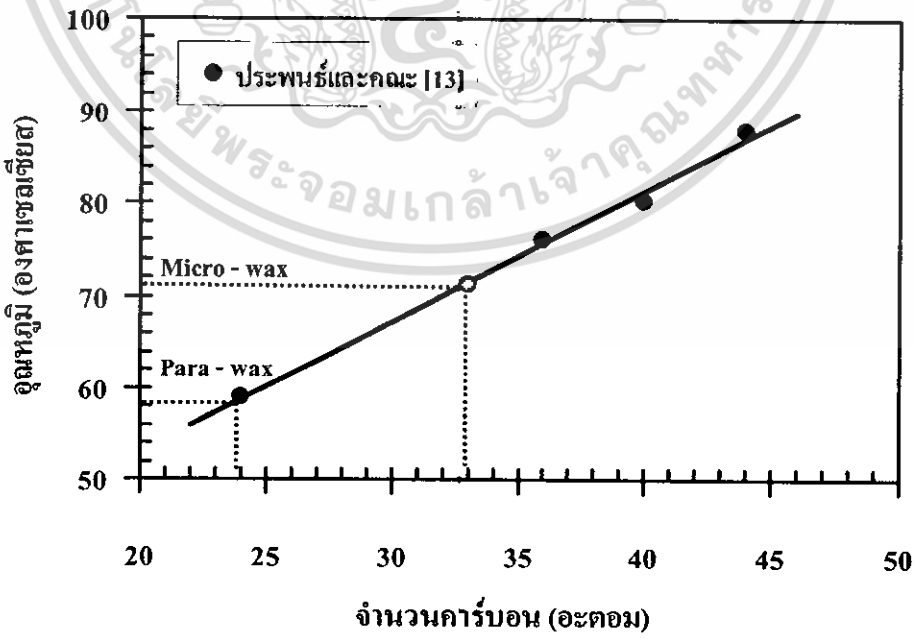
รูปที่ 4.3 DSC เทอร์โมแกรมการตกผลึกของแว็กซ์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่าพื้นที่ใต้กราฟของเทอร์โมแกรมของแว็กซ์ผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์มีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงถึงปริมาณผลึกของแว็กซ์ผสมมีจำนวนลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติเชิงความร้อนกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแว็กซ์ผสม ดังแสดงได้ในตารางที่ 4.1 พบว่าพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ มีอุณหภูมิการหลอมเหลว 58.12 และ 70.77 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบหาจำนวนคาร์บอนอะตอมจากค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวจากการทดลองของประพนธ์ และคณะ [13] ดังรูปที่ 4.4 พบว่าไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์มีจำนวนคาร์บอนอะตอมประมาณ 33 อะตอม และพาราฟินแว็กซ์มีค่าจำนวนคาร์บอนอะตอมประมาณ 24 อะตอม

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงความร้อนของตัวอย่างแว็กซ์ผสม

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของ Micro – wax ต่อ Para - wax	Micro - wax	2080M	5050M	8020M	Para - wax
อุณหภูมิการหลอมเหลว, T_m (°ซ)	70.77	71.63	53.92	56.25	58.12
อุณหภูมิการตกผลึก, T_c (°ซ)	72.04	50.88	53.00	55.32	57.39
ค่าความร้อนของการหลอมเหลว, ΔH_f^o (จูล/กรัม)	6.96	15.50	64.88	94.98	125.25



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคาร์บอนอะตอมกับอุณหภูมิของการหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

4.2.1 ผลการศึกษาปฏิกิริยาการคงรูป

จากการนำตัวอย่างยางทั้ง 9 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงของยางแบบจานสั่น ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม (t_c90) ในการขึ้นรูปยาง ได้กราฟดังรูปที่ 4.5 และเมื่อนำค่าแรงบิดที่เวลาต่างๆ มาคำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงของยาง (Degree of conversion) ในการเชื่อมโยงของยางตัวอย่าง ได้จากสมการที่ (4.1) ได้กราฟดังรูปที่ 4.6

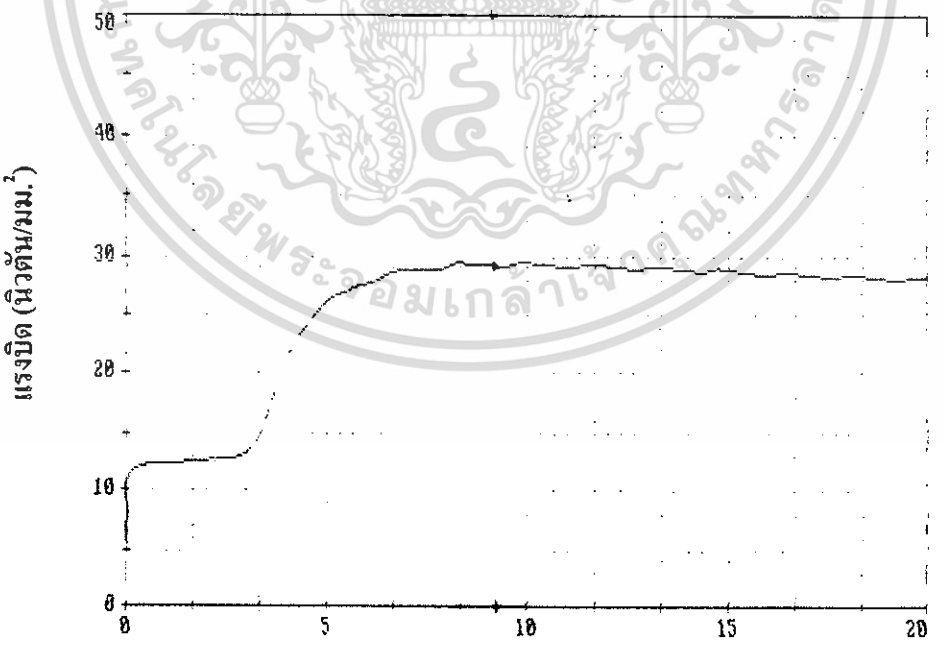
$$\alpha = \frac{(t_{qt} - M_L)}{(M_H - M_L)} \qquad (4.1)$$

เมื่อ α = Degree of conversion

t_{qt} = แรงบิดที่เวลาใดๆ ของการเชื่อมโยง (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

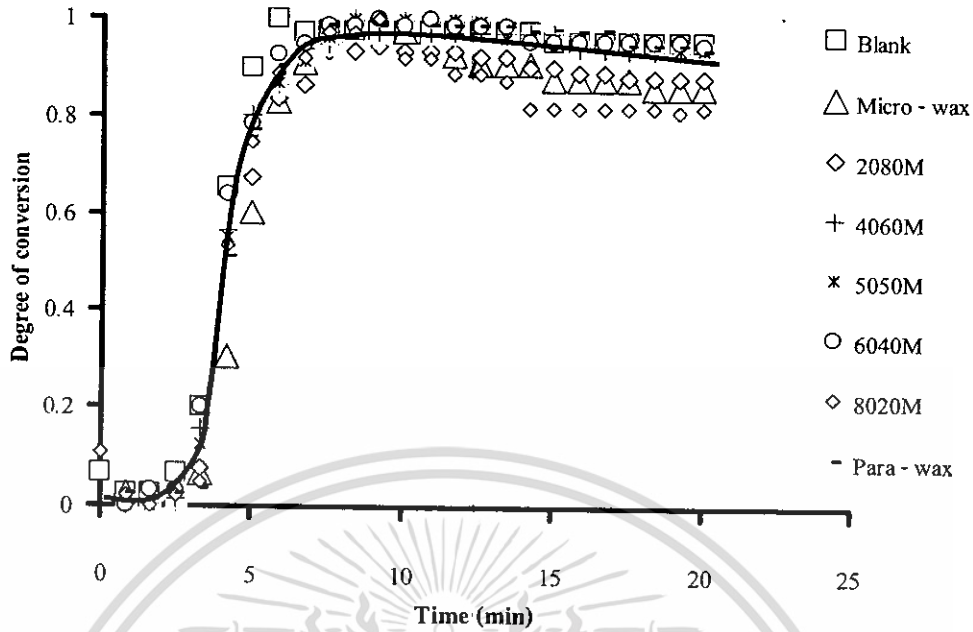
M_L = ค่าแรงบิดต่ำสุด (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

M_H = ค่าแรงบิดสูงสุด (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงลักษณะการสุกตัวของยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของยางกับเวลาในการคงรูปยางที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.6 เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของแว็กซ์ผสม ระหว่างไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์และพาราฟินแว็กซ์ พบว่า ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของยางในระหว่างการคงรูปมีความใกล้เคียงกัน แสดงว่าไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ไม่มีผลต่อเวลาในการคงรูปของยาง โดยพบว่าเวลาที่ใช้ในการสุกตัว (t_s) มีค่าประมาณ 6 นาที ดังนั้น เพื่อให้มั่นใจในการสุกของยางตัวอย่างจึงเลือกใช้ค่าเวลาในการสุกตัวของตัวอย่างยางธรรมชาติ 8 นาที สำหรับทุกตัวอย่าง

4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง

จากการทดลอง เมื่อนำตัวอย่างยางทั้ง 9 ตัวอย่าง ที่ผ่านการขึ้นรูปมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Tensile tester) และเครื่องวัดความแข็งแบบดูโรมิเตอร์ชนิด A (Shore A Durometer) ได้ผลดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด และความแข็งของผลิตภัณฑ์ยางที่ปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง

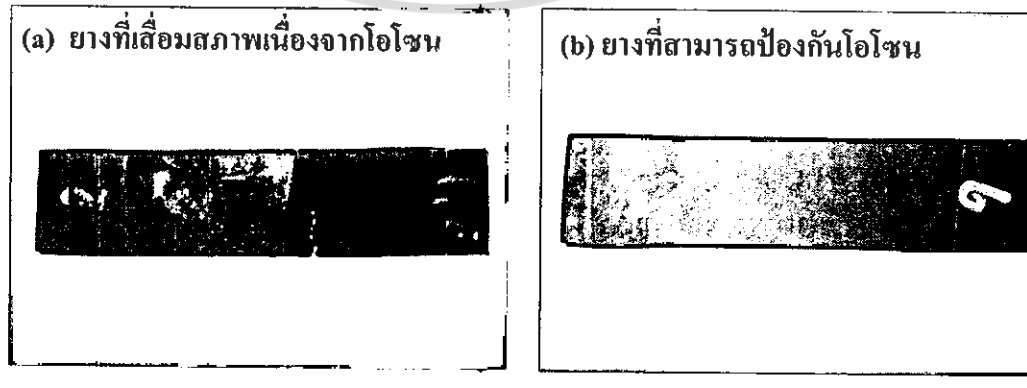
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยาง	ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร)	ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (ร้อยละ)	ความแข็ง (Shore A)
N - wax	18.95	657.10	54.00
Com - wax	18.32	648.80	50.00
Micro – wax	15.11	601.40	51.30
2080M	18.63	735.30	49.30
4060M	19.28	638.20	50.00
5050M	18.05	698.90	50.70
6040M	19.78	684.10	48.00
8020M	18.35	677.30	46.70
Para - wax	18.93	682.80	52.00

4.2.3 ผลการศึกษาความต้านทานต่อโอโซน

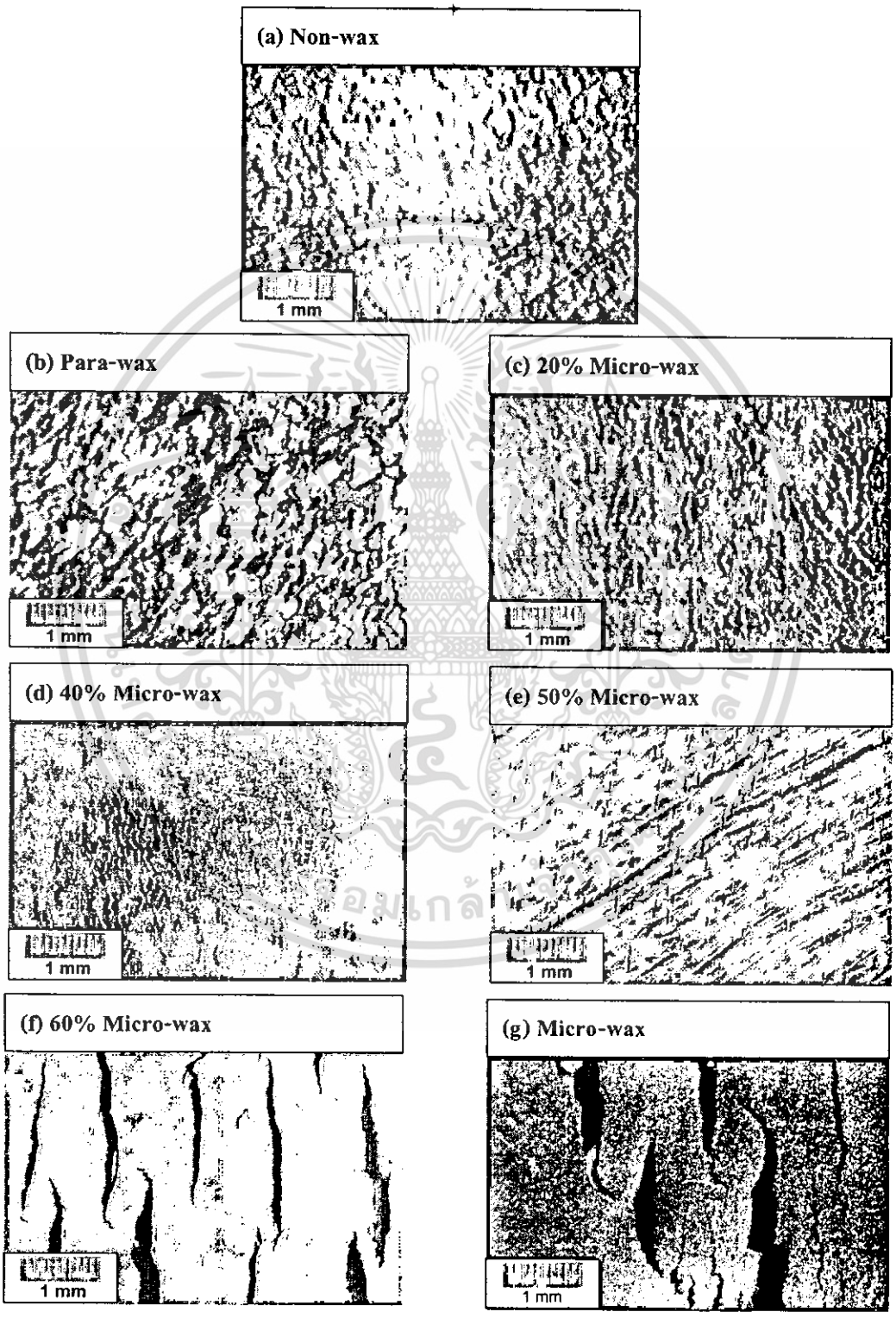
เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของแว็กซ์ผสมที่มีผลต่อการแพร่ออกมาเคลือบบนผิวของยาง ดังนั้น เพื่อศึกษาถึงอัตราส่วนของแว็กซ์ผสมที่เหมาะสมในการป้องกันโอโซนในยางธรรมชาติ ทำได้โดยนำตัวอย่างยางยืดออก 20 เปอร์เซ็นต์ มาอบในตู้อบบ่มเร่งด้วยโอโซนที่ความเข้มของโอโซน 50 pphm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากลักษณะพื้นผิวของยาง พบว่ายางมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้ 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ ลักษณะแรกเป็นยางที่เสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน ซึ่งยางจะเกิดรอยแตกขนาดใหญ่และขาดออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7(a) และยางที่เกิดรอยแตกขนาดเล็ก อีกทั้งมีสภาพและความยืดหยุ่นเช่นเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.7(b) แสดงว่ายางสามารถป้องกันโอโซนได้



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อให้สามารถบอกรายละเอียดบนพื้นผิวของยางธรรมชาติให้มากขึ้น จึงต้องมีการพิจารณาสัณฐานวิทยาของพื้นผิวตัวอย่างยางโดยใช้กล้องถ่ายภาพแบบดิจิตอลที่กำลังขยาย 40 เท่า ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นรายละเอียดของตัวอย่างยางธรรมชาติที่ผ่านการอบเร่งด้วยโอโซนมีลักษณะรอยแตกของผิวยางที่แตกต่างกัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.8 (a) - (g)

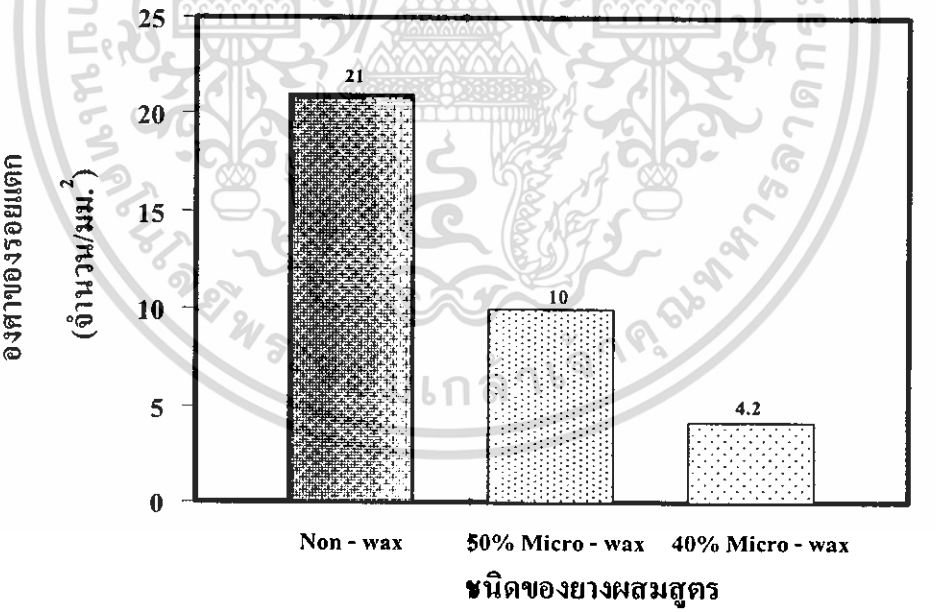


รูปที่ 4.8 ลักษณะรอยแตกของยางธรรมชาติที่ผ่านการอบเร่งด้วยโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 พบว่า พื้นผิวของตัวอย่างยางธรรมชาติที่ไม่ผสมแว็กซ์จะมีรอยแตกขนาดเล็กและมีความต่อเนื่องกันเป็นจำนวนมากอย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.8(a) ส่วนในยางธรรมชาติที่ผสมกับพาราฟินแว็กซ์และแว็กซ์ผสมที่ปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ 20 โดยน้ำหนัก ไม่สามารถมองเห็นรอยแตกของยางได้ เนื่องจากมีแว็กซ์แพร่ออกมาเคลือบที่ผิวยางเป็นจำนวนมาก และเกิดรอยแตกของแว็กซ์ขึ้น ซึ่งสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.8(b) และ 4.8(c) จากลักษณะดังกล่าวหากมีการอบเร่งให้นานขึ้น โอโซนสามารถซึมผ่านรอยแตกของแวกซ์เข้าทำปฏิกิริยากับยางทำให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็วยิ่งขึ้น แต่เมื่อปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ที่ 60 – 100 โดยน้ำหนัก ยางเกิดรอยแตกที่มีขนาดใหญ่มากประมาณ 3 มม. ดังรูปที่ 4.8(f) และ4.8(g) ซึ่งลักษณะดังกล่าวไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ไม่สามารถป้องกันโอโซนได้ และเมื่อยางผสมกับแว็กผสมที่สัดส่วนของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ 40 – 50 โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดลักษณะรอยแตกที่มีขนาดเล็กมากประมาณ 100 – 200 ไมโครเมตร และมีความต่อเนื่องกันน้อยกว่าในยางธรรมชาติที่ไม่ผสมแว็กซ์ ซึ่งหมายถึงความสามารถของการป้องกันโอโซนในยางธรรมชาติได้ดี

ดังนั้นจากลักษณะดังกล่าวสามารถรายงานผลการทดลองในลักษณะขององศาของรอยแตก (Degree of Cracking) ซึ่งหมายถึง จำนวนรอยแตกขนาดเล็กที่เกิดขึ้นใน 1 ตารางมิลลิเมตร สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงค่าองศาของรอยแตก (Degree of Cracking)

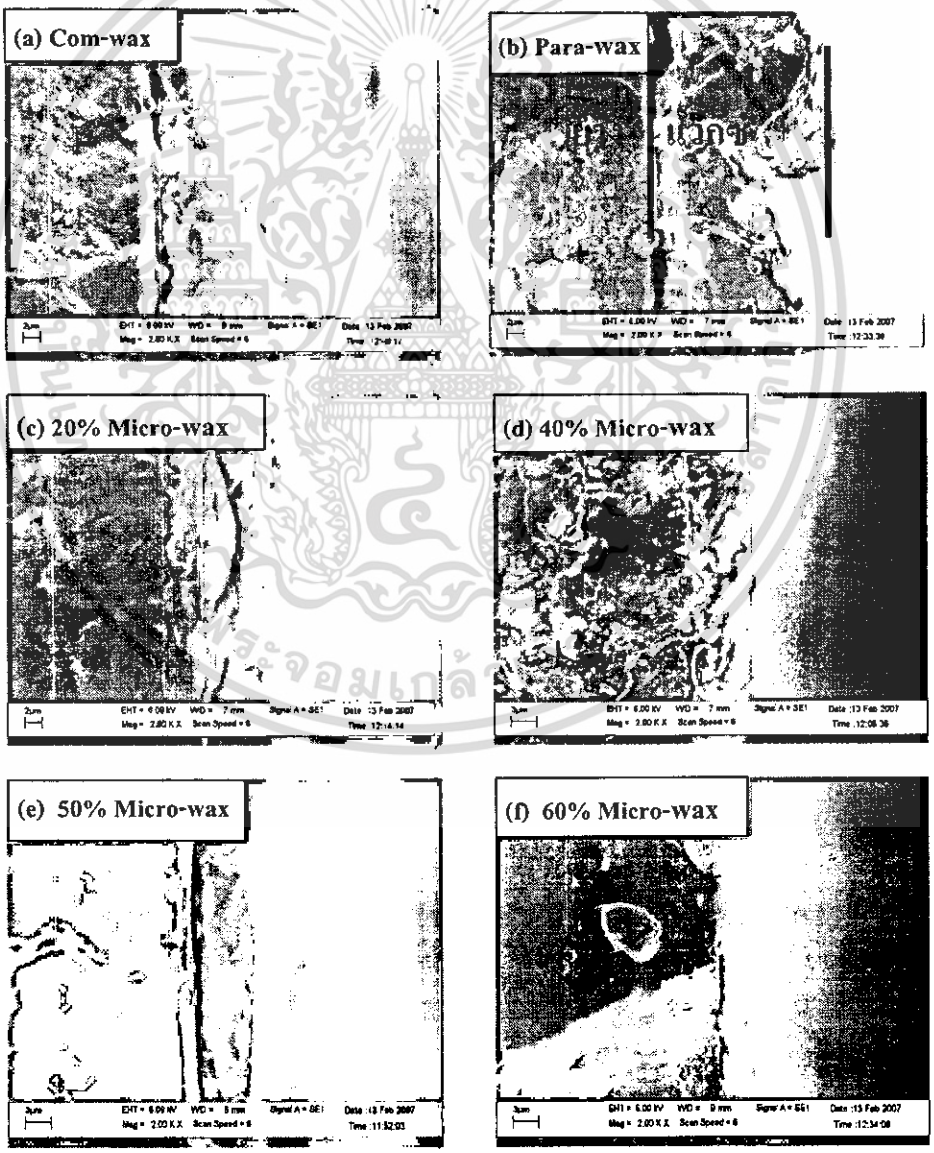
เมื่อพิจารณาจากองศาของรอยแตก พบว่าองศาของรอยแตกในยางมีค่าลดลงเป็นเท่าตัวเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ใช้แว็กซ์อย่างชัดเจน แสดงว่าที่ปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ 40 – 50 โดยน้ำหนัก เป็นแว็กซ์ผสมที่สามารถป้องกันโอโซนได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

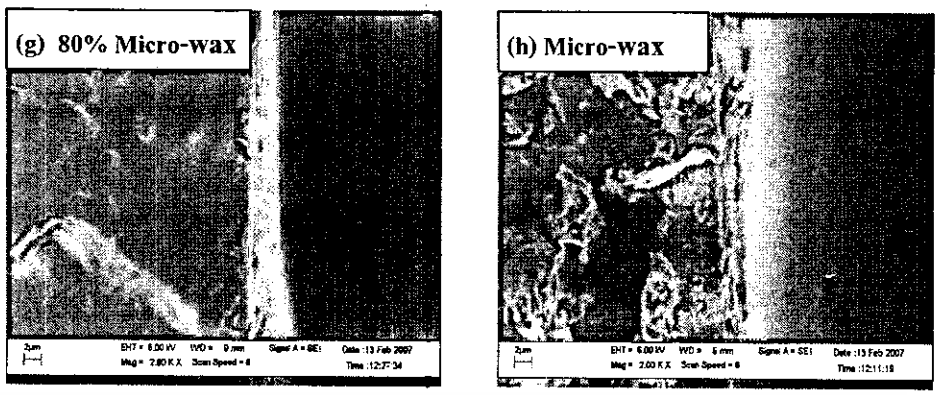
4.3 ผลการศึกษาการแพร่และลักษณะสัณฐานวิทยาของแว็กซ์ผสม

4.3.1 ลักษณะสัณฐานวิทยา

ลักษณะสัณฐานวิทยาของการแพร่ของแว็กซ์ สามารถสังเกตได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า ซึ่งการแพร่ของแว็กซ์บนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ยางนั้น เกิดจากการที่ผสมแว็กซ์ลงไปในยางมากเกินพอดี เมื่อทำการอบที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมงแล้ว จะเกิดการแพร่ของแว็กซ์ขึ้น โดยจะเกิดเป็นผลึกของแว็กซ์เกาะอยู่ที่พื้นผิวของยาง จากการศึกษาของขามแก้วและคณะ[10] ที่อธิบายถึงลักษณะของความหนาของชั้นแว็กซ์ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดแว็กซ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (a)-(h)



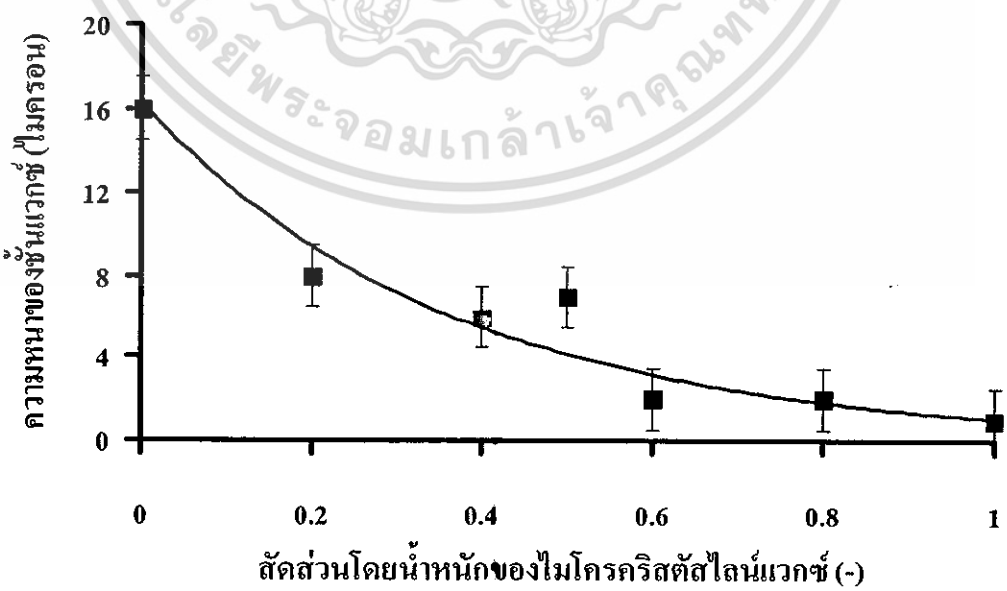
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพตัดขวางเปรียบเทียบความหนาของชั้นแว็กซ์ที่สัดส่วนผสมของไมโครคริสตัสไลน์แว็กซ์ในช่วง 0 – 100 ร้อยละโดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.10 พบว่าแว็กซ์เชิงพาณิชย์ (a) มีความหนาเฉลี่ย 6.0 ไมครอน พาราฟินแว็กซ์ (b) มีความหนาเฉลี่ย 16.0 ไมครอน ไมโครคริสตัสไลน์แว็กซ์ (h) มีความหนาเฉลี่ย 1.0 ไมครอนและความหนาของชั้นแว็กซ์ผสม (c)-(g) ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2 - 8 ไมครอน ซึ่งความหนาของชั้นแว็กซ์ที่แตกต่างกันตามชนิดของแว็กซ์นี้อธิบายได้จากการศึกษาของขามแก้วและคณะ[10] โดยความหนาของชั้นแว็กซ์จะบ่งบอกถึงความสามารถในการป้องกันโอโซนของแว็กซ์ที่ผสมในตัวอย่างยาง

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบความหนาเฉลี่ยของชั้นแว็กซ์กับสัดส่วนโดยน้ำหนักของไมโครคริสตัสไลน์แว็กซ์ได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นแว็กซ์กับปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 พบว่าความหนาของชั้นแว็กซ์ลดลงเมื่อปริมาณของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์เพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาจากการลดลงของชั้นแว็กซ์ซึ่งเป็นสมการเอมพิริคัลพบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเอ็กซ์โพเนนเชียลดังสมการ

$$S_{wax} = 16{,}3e^{(-2.73 w_{Micro})} \tag{4.2}$$

เมื่อ S_{wax} = ความหนาของชั้นแว็กซ์ (ไมครอน)

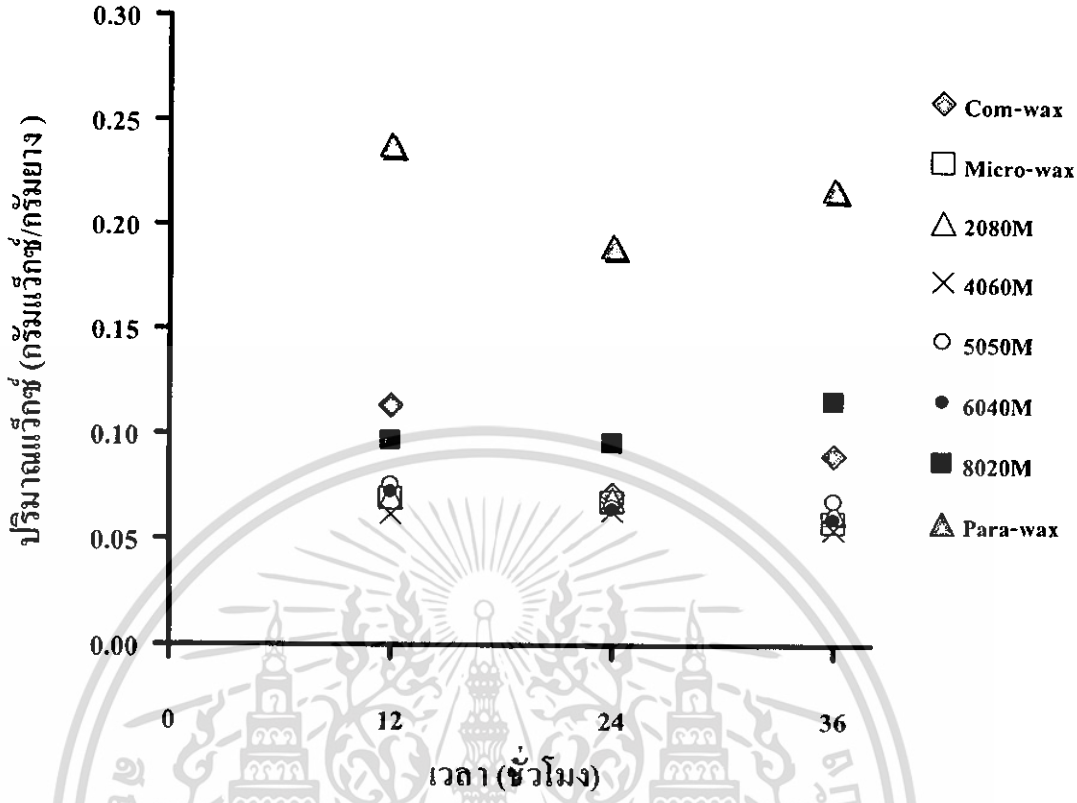
w_{Micro} = สัดส่วนโดยน้ำหนักของไมโครคริสตัสไลน์แว็กซ์

จากสมการสามารถใช้ทำนายความหนาของชั้นแว็กซ์ที่ออกมาเคลือบที่ผิวของยาง เมื่อทราบสัดส่วนโดยน้ำหนักของไมโครคริสตัสไลน์แว็กซ์ โดยความหนาของชั้นแว็กซ์ใช้อธิบายปรากฏการณ์การแพร่ของแว็กซ์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลดังข้อสรุปของ S.S. Choi และคณะ[11] ซึ่งมีความสำคัญกับการป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติ

4.3.2 ผลการทดลองหาปริมาณการแพร่ของแว็กซ์ผสมโดยวิธีการสกัด

การแพร่ คือ การหาปริมาณของแว็กซ์ที่ตกผลึกออกมายังพื้นผิวของยางที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยได้จากการนำตัวอย่างยางชนิดต่างๆ อบที่อุณหภูมิคงที่ที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 12, 24 และ36 ชั่วโมง มาสกัดด้วยตัวทำละลายนอร์มอลเฮกเซน ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วระเหยนอร์มอลเฮกเซนออกจากสารละลาย ชั่งน้ำหนักสารที่เหลืออยู่ เพื่อหาน้ำหนักของแว็กซ์ที่แพร่ออกมาเคลือบที่ผิวของยาง ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างยางที่เป็นพาราฟินแว็กซ์มีปริมาณแว็กซ์ต่อกรัมยางมากที่สุด และเมื่อพิจารณาที่แว็กซ์ผสมระหว่างพาราฟินแว็กซ์และไมโคร-คริสตัลไลน์แว็กซ์ที่การผสมของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์มากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มีปริมาณของแว็กซ์ที่แพร่ออกมายังผิวของยางมีแนวโน้มคงที่และมีปริมาณใกล้เคียงกับยางที่ผสมแว็กซ์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

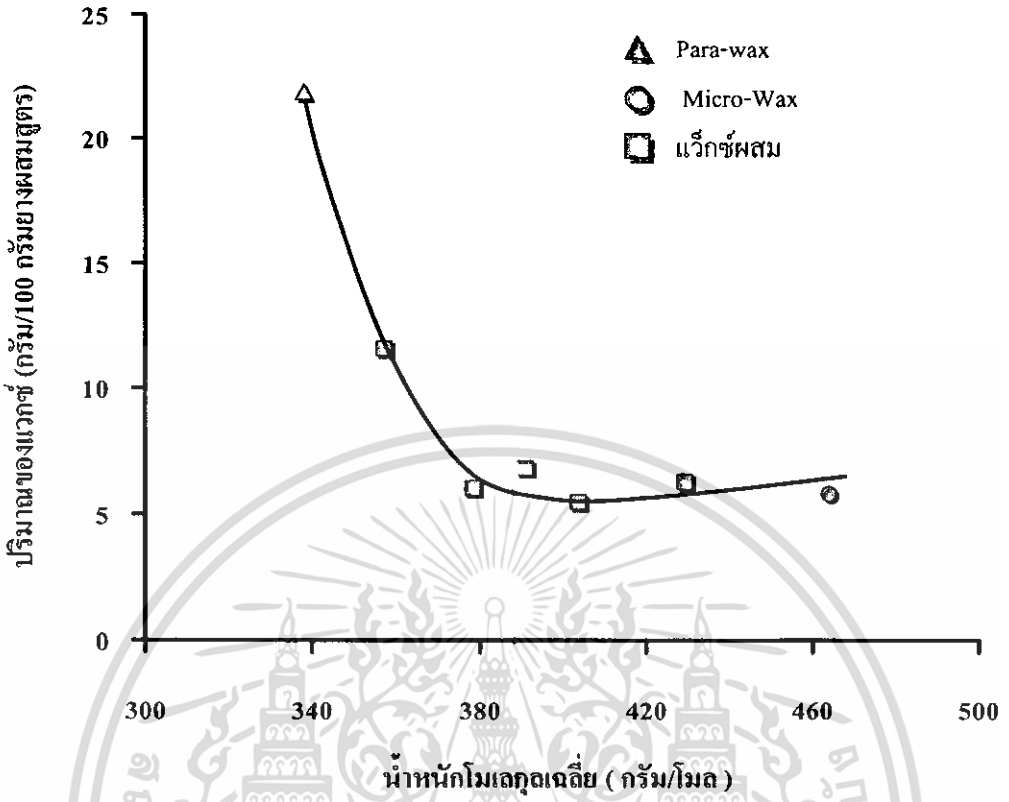


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบยางและปริมาณแว็กซ์ต่อกรัมยางที่แพร่ออกมาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

4.3.3 ผลของอัตราส่วนของแว็กซ์ผสมต่อปริมาณการแพร่

จากผลของปริมาณไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ที่มีต่อลักษณะการแพร่ของแว็กซ์ผสมในยางธรรมชาติ เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตเปรียบเทียบปริมาณของแว็กซ์ที่แพร่ออกมาต่อ 100 กรัมของยางผสมสูตร โดยที่สัญลักษณ์ที่แสดงด้วยสามเหลี่ยมทึบเป็นพาราฟินแว็กซ์ สัญลักษณ์ที่แสดงด้วยวงกลมทึบเป็นไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ และสัญลักษณ์ที่แสดงด้วยสี่เหลี่ยมทึบเป็นแว็กซ์ผสมระหว่างพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์จะได้ดังรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ปริมาณของแว็กซ์ผสมที่แพร่ออกมา เมื่ออบที่อุณหภูมิคงที่ 40 °ซ เวลา 36 ชม.

จากรูปที่ 4.13 เมื่อนำปริมาณแว็กซ์ที่สกัดได้จากตัวอย่างยางชนิดต่างๆ มาเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (อัตราส่วนผสมระหว่างพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ที่การผสมของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ตั้งแต่ 0, 20, 40, 50, 60 และ80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) พบว่าที่น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตั้งแต่ 379 กรัม/โมล ขึ้นไปมีปริมาณแว็กซ์ผสมที่แพร่ออกมามีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ แสดงว่าไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ในในแว็กซ์ผสมดังกล่าวสามารถยึดเหนี่ยวและทำให้พาราฟินแว็กซ์แพร่ออกไปพร้อมๆ กันได้

และทำให้สามารถทำนายการแพร่ของแว็กซ์ผสมในยางได้จากสมการการแพร่ของแว็กซ์ที่นำเสนอโดย S.S. Choi [11] ดังแสดงในสมการที่ (2.3) ซึ่งความสัมพันธ์อยู่ในเทอมของน้ำหนักโมเลกุลของนอร์มอลอัลเคนคูณกับค่าคงที่พารามิเตอร์ในการแพร่ ก็จะสามารถหาการแพร่ของแว็กซ์ได้แต่เพื่อความสะดวกต่อการใช้ในการทำนายจึงใช้ความสัมพันธ์ที่เป็นร้อยละการแพร่กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยได้ดังสมการที่ (4.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_m = a + bM_w + cM_w^2 + dM_w^3 + \ldots.. \quad (4.3)$$

เมื่อ M_m = ร้อยละการแพร่ (%)

M_w = น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (กรัม/โมล)

a,b,c,d = พารามิเตอร์ที่เป็นค่าคงที่ ที่อุณหภูมิใดๆ

จากสมการดังกล่าวจะต้องหาค่าคงที่พารามิเตอร์ ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของร้อยละการแพร่ของแว็กซ์ผสมที่แพร่ออกมากับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยในกราฟรูปที่ 4.13 เมื่ออบยางที่อุณหภูมิคงที่ที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง ได้ค่าคงที่พารามิเตอร์ ดังตารางที่ 4.3 และสมการการแพร่ที่มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของแว็กซ์ผสมได้ดังสมการที่ (4.4) ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) ที่ 0.99

$$M_m = 2.54\times10^3 - 18.2M_w + 4.32\times10^{-2} M_w^2 - 3\times10^{-5} M_w^3 \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่พารามิเตอร์ *a, b, c* และ *d* ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

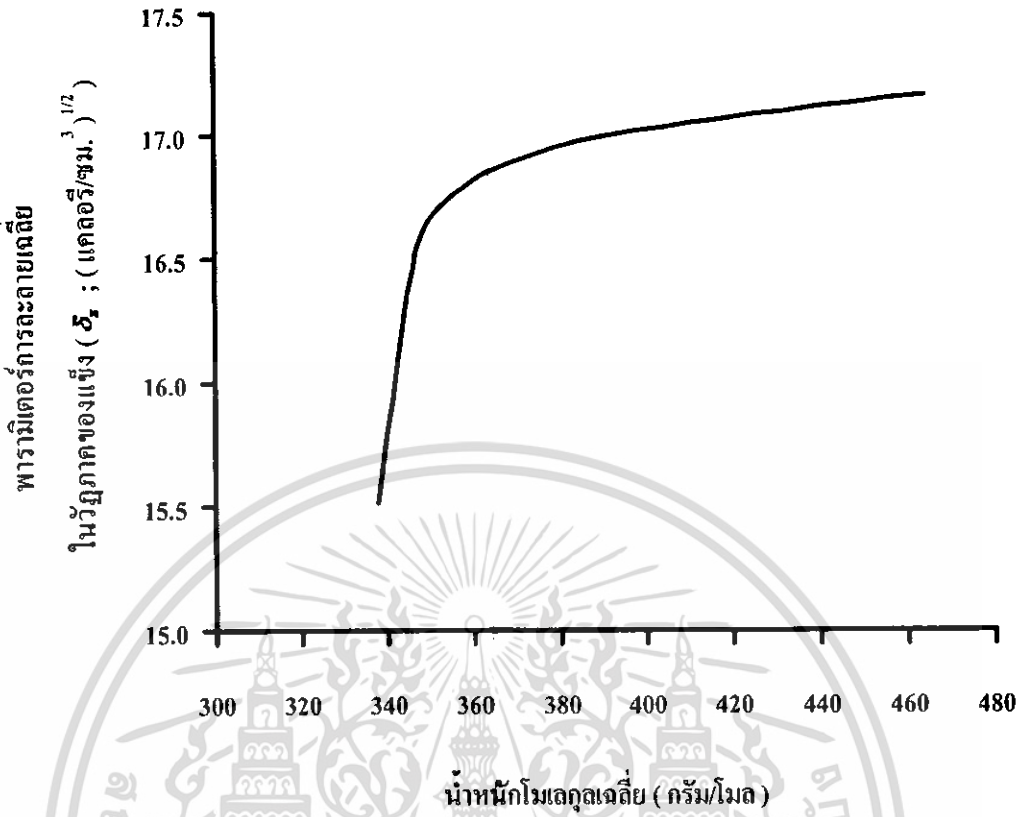
พารามิเตอร์	a	b	c	D
ค่า	2.54×10^3	-18.2	4.32×10^{-2}	-3.0×10^{-5}

จากสมการที่พัฒนา สามารถใช้ทำนายความหนาของชั้นแว็กซ์ที่ใช้ในการป้องกันโอโซน ซึ่งสามารถอธิบายความหนาของชั้นแว็กซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.13 แสดงว่าโครงสร้างของแว็กซ์มีผลต่อความหนาของแว็กซ์ โดยแว็กซ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะแพร่ได้ช้ากว่า เมื่อเทียบกับแว็กซ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย

4.3.4 ผลการศึกษาการละลายของแว็กซ์กับน้ำหนักโมเลกุล

จากความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ได้จากสมการที่ (2.23) สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\overline{\delta}_s$) ของแว็กซ์ผสมที่น้ำหนักโมเลกุลต่างๆ ได้ โดยคำนวณได้จากคุณสมบัติของแว็กซ์คือ ค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลว จุดหลอมเหลว และความหนาแน่น เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้อธิบายถึงลักษณะการตกผลึกของแว็กซ์ผสมแสดงดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



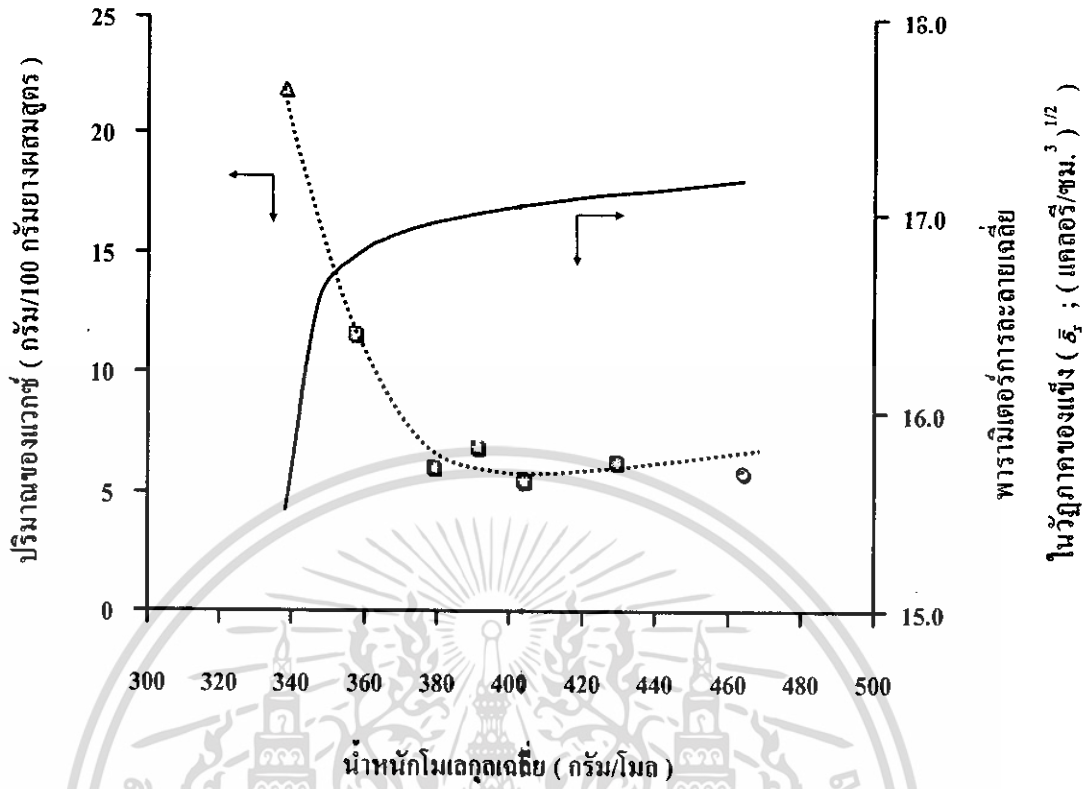
รูปที่ 4.14 พารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_s$) ของแว็กซ์ผสมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 พบว่าที่น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยในช่วง 338 ถึง 379 กรัม/โมล มีค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_s$) เพิ่มขึ้นสูงมากโดยช่วงดังกล่าวมีอัตราส่วนผสมของพาราฟินแว็กซ์มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยในช่วงตั้งแต่ 379 กรัม/โมล ขึ้นไป มีอัตราส่วนผสมของพาราฟินแว็กซ์น้อยกว่า 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็งมีแนวโน้มคงที่โดยจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็งของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์

4.3.5 ผลการศึกษาการละลายและการแพร่ของแว็กซ์กับน้ำหนักโมเลกุล

เมื่อนำร้อยละการแพร่ที่ได้จากการทดลองและค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_s$) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.23) ของแว็กซ์ผสมชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยซึ่งจะได้ดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ปริมาณของแว็กซ์ที่แพร่ออกมายังผิวยางและค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_s$) ของแว็กซ์ผสมชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาการแพร่และการตกผลึกของแว็กซ์ผสมในวัฏภาคของแข็งซึ่งแสดงได้จากค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_s$) พบว่าอัตราส่วนแว็กซ์ที่ใช้ผสมระหว่างพาราฟินแว็กซ์และไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ที่ใช้การผสมของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่มีการผสมเข้ากันได้ดีและการตกผลึกเกิดขึ้นได้เหมาะสมสำหรับการใช้ป้องกันโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงงานนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนผสมระหว่างไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์และพารา-ฟินแว็กซ์ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติการป้องกันโอโซนในยางธรรมชาติ โดยได้ศึกษาถึงองค์ประกอบและสมบัติของแว็กซ์ผสม พร้อมทั้งศึกษาปรากฏการณ์การแพร่ของแว็กซ์ผสมที่แพร่ออกมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง

5.1.1 สมบัติของแว็กซ์ผสม

จากการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของตัวอย่างแว็กซ์โดยใช้เครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter : DSC) และความหนาแน่นด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นแบบอิเล็กทรอนิกส์ MD-200S (Electronic Densimeter) พบว่า

พาราฟินแว็กซ์มีอุณหภูมิการหลอมเหลว 58.12 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการตกผลึก 57.39 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของการหลอมเหลว 125.25 จูล/กรัม และความหนาแน่น 0.87 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์มีอุณหภูมิการหลอมเหลว 70.77 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการตกผลึก 72.04 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนของการหลอมเหลว 6.96 จูล/กรัม และความหนาแน่น 0.90 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการหลอมเหลว พบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวแว็กซ์ผสมมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์มีค่าลดลง และมีจำนวนคาร์บอนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจากการทดลองของประพนธ์ และคณะ [13] พบว่าไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์มีจำนวนคาร์บอน 33 อะตอม และพาราฟินแว็กซ์มีจำนวนคาร์บอน 24 อะตอม

5.1.2 สมบัติการป้องกันโอโซนของแว็กซ์

แว็กซ์ผสมที่ 40- 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์เป็นอัตราส่วนเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นแว็กซ์ป้องกันโอโซนในยางธรรมชาติได้ ทั้งนี้ค่าองศาของรอยแตกในยางเนื่องจากโอโซนมีค่าลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าองศาของรอยแตกของยางธรรมชาติที่ไม่ใช้แว็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ปรากฏการณ์การแพร่ของแว็กซ์ผสม

ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของการเคลือบผิวยางธรรมชาติของแว็กซ์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ร้อยละการแพร่ของแว็กซ์ผสมที่ออกมาเคลือบบนพื้นผิวของยาง และค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\overline{\delta}_s$) ของแว็กซ์ผสม พบว่าแว็กซ์ผสมที่ 40 - 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์สามารถตกผลึกออกมาที่ผิวของยางโดยไม่เกิดการแยกกันอยู่ และให้ความหนาของชั้นแว็กซ์อยู่ในช่วง 6 – 8 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นความหนาที่เหมาะสมในการในการป้องกันโอโซน ดังนั้นจึงน่าจะเหมาะสำหรับนำมาผลิตแว็กซ์ป้องกันโอโซนในยางธรรมชาติ ทั้งนี้ต้องมีการศึกษาต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการศึกษาการแพร่ของแว็กซ์ผสมโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายนอร์มอลเฮกเซน พบว่ามีปริมาณที่มากและมีแนวโน้มในการแพร่ไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการสกัดนานเกินไป อาจทำให้แว็กซ์ที่อยู่เนื้อยางละลายออกมาพร้อมกับแว็กซ์ที่แพร่ออกมายังพื้นผิวของยางด้วย รวมทั้งในสูตรการผสมยางมีการเติมน้ำมันอะโรมาติก โดยสารดังกล่าวมีความสามารถในการละลายได้ดี ดังนั้นจึงควรหาวิธีวิเคราะห์ปริมาณของแว็กซ์ด้วยวิธีที่เหมาะสมยิ่งขึ้น เช่น การวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี – แมสสเปกโตรมิทรี (Gas chromatography – mass spectrometry : GC - MS)

5.2.2 ควรทำการศึกษาทดลองเปรียบเทียบการป้องกันโอโซนของแว็กซ์ผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนในยางธรรมชาติ เช่น สารประกอบพารา – ฟีนิลลีนไดเอมีน (para- Phenylenediamine : PPDs) เป็นต้น เพื่อเป็นการพัฒนาแว็กซ์ที่นำผลิตแว็กซ์ป้องกันโอโซนในยางธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันโอโซนมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] พงษ์ธร แซ่อุย. **ชนิด สมบัติ และการใช้งาน**. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2547.

[2] พงษ์ธร แซ่อุย. **สารเคมียาง**. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2547.

[3] สุพรรณ นิ่มสุวรรณ. **"Rubber Technology Unit."** [Online]. Available: htt//rubber.sc.mahido.ac.th/RTU/information3_4.htm. 2005.

[4] http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/basicrubbertech.htm

[5] อิทธิพล แจ้งชัด. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง**. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

[6] Robert W. Keller. "Oxidation and Ozonetion of Rubber." **Rubber Chemistry and Technology**., vol.24. pp. 938-651.

[7] Robert W. Layer and Robert P.Lattimer. "Protection of Rubber Against Ozone". **Rubber Chemistry and Technology**., vol.63. pp, 426-449.

[8] Franco Cataldo. "On the Ozone Protection of Polymer having Non-conjugated Unsaturation". **Polymer Degradation Stability**., vol.72, 2001. pp. 278-296.

[9] S.H. Nah and A.G. Thomas. "Migration and Blooming of Waxes to the Surface of Rubber Vulcanizates". **Journal of Polymer Science**., vol.18, 1980. pp. 511-521.

[10] ขามแก้ว พจน์โยธิน และศรัณยา คงโคตร, **การใช้ประโยชน์ไมโครคริสตัลไลน์แวกซ์สำหรับอุตสาหกรรมยาง**. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

[11] S.S. Choi. "Migration Behaviors of Wax to Surface in Rubber Vulcanizates". **J. App. Polymer Science**., vol.73, 1999. pp. 2587-2593.

[12] H. Ahmed and Anil K. Mehrotra. "Liquid-Solid-Solid Thermal Behaviour of n-$C_{44}H_{90}$+ n-$C_{50}H_{102}$ and n-$C_{25}H_{52}$+ n-$C_{28}H_{58}$ Paraffinic Binary Mixtures". **Fluid Phase Equilibria**., vol.111, 1995. pp. 253-272.

[13] ประพนธ์ ปรียารัตนโชติ และคณะ. **การประยุกต์ใช้สมการแวนเดอร์วาลส์เพื่อแยกพาราฟินแวกซ์ออกจากน้ำมันหล่อลื่นในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่น**. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

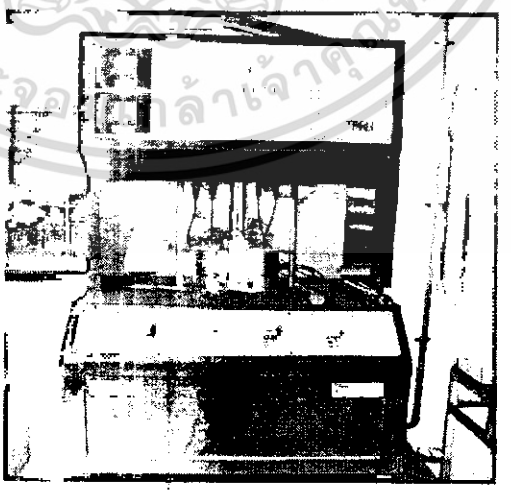
ภาคผนวก ก

เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยางแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometer : ODR)

การหาเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปยางต้องนำตัวอย่างยางผสมสูตรมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานสั่น ซึ่งเป็นเครื่องมือทดสอบการเชื่อมโยงที่เที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อหาสภาวะในการเชื่อมโยงของยางที่เหมาะสม หาเวลาที่ใช้ในขบวนการผลิตยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์

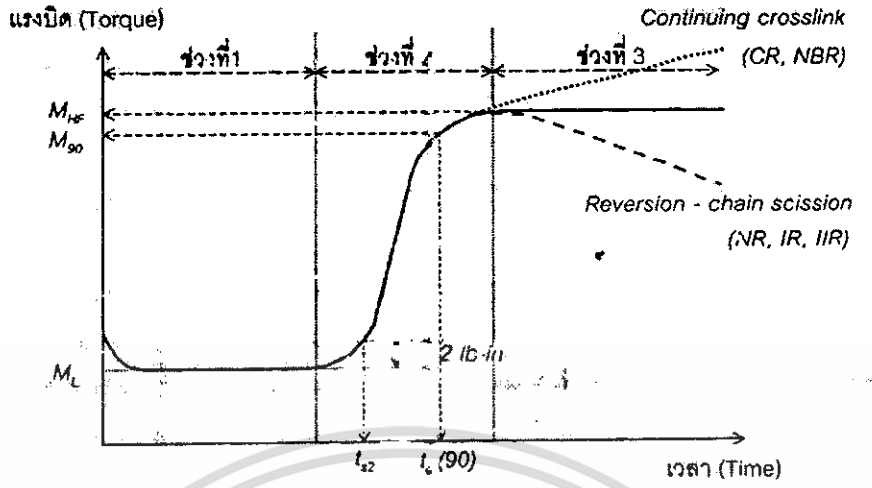
หลักการของเครื่อง ODR คือ การตรวจวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแรงบิดหรือทอร์ค (Torque) ของจานวงกลมรูปโคน (Biconical disc) หมุนสั่นอยู่ในตัวอย่างยางที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ดังรูปที่ ก.1

ในการทดสอบ ยางตัวอย่างถูกวางในช่องปิด (Cavity) โดยการตัดเป็นแผ่นประกบจานโลหะ (Disc) แล้วให้อุณหภูมิที่ทดสอบการเชื่อมโยงของยาง จานโลหะจะหมุนแบบสั่นไปมาแบบด้วยมุม ± 1, 3 หรือ 5 องศา ตามแนวระนาบ การเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลยางสามารถวัดได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงบิด (Toque) ที่ใช้เพื่อทำให้การหมุนของจานที่มุมคงที่ เนื่องจากการทดสอบนี้ทำที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงไม่มีผลของการเปลี่ยนแรงบิดเนื่องจากความหนืด ผลการทดสอบอยู่ในรูปของกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา เรียกว่า กราฟรีโอมิเตอร์ (Rheometer chart) รีโอกราฟ (Rheograph) หรือ กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ดังรูปที่ ก,2



รูปที่ ก.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยางแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometer : ODR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของยางในระหว่างปฏิกิริยาคงรูป

เมื่อ M_L = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

M_{HF} = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

M_{HR} = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)

M_H = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาที่ทดสอบ เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น

t_{s2} = เวลาเริ่มเชื่อมโยง หรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 ปอนด์ – นิ้ว เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด

M_{90} = ค่าแรงบิดที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ของการเชื่อมโยง คำนวณได้จาก

$$M_{90} \simeq M_L + 0.9 (M_{HF} - M_L)$$

$t_c(90)$ = เวลาเชื่อมโยง คือเวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90 เปอร์เซ็นต์ หรือเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมโยงยาง (Optimum cure time)

จากรูปที่ ก.2 ช่วงเวลา t_{s2} (Scorch time) คือช่วงเวลาปลอดภัยที่ผู้ผลิตสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ก่อนที่ยางจะเกิดการเชื่อมโยงจนไม่สามารถขึ้นรูปได้ ส่วน $t_c(90)$ คือเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางให้มีสมบัติดีที่สุด จากกราฟสามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงของยางในระหว่างปฏิกิริยาคงรูปออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 ขั้นการเริ่มต้น (Delay phase) เมื่อเริ่มให้แรงบิด ยางจะนิ่มเล็กน้อยเนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลยางตามแนวแรง และความหนืดของยางจะลดลงเนื่องจากความร้อน แต่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาการคงรูป

ช่วงที่ 2 ขั้นการเกิดพันธะเคมี (Curing phase) เป็นขั้นที่กำมะถัน สารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้น เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ทำให้ค่าแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งสูงสุดและคงที่ ซึ่งอัตราความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ อุณหภูมิ ชนิดของยาง และระบบของสารที่ใช้ทำให้ยางคงรูป

ช่วงที่ 3 นการผ่านจุดที่ยางคงรูปเต็มที่ (Overcure phase) ช่วงนี้สามารถให้ข้อมูลการเสื่อมสภาพของยางได้ ถ้ายังทำการทดสอบต่อไป เส้นกราฟจะเป็นได้ใน 3 ลักษณะ คือ

- เส้นกราฟคงที่ แสดงว่าเมื่อเวลาผ่านไป ยางมีองศาการเชื่อมโยง (Degree of crosslinking) คงที่ ไม่เกิดการเสื่อมสภาพของยาง

- เส้นกราฟสูงขึ้น ค่ามอดูลัสของยางมีค่าเพิ่มขึ้น (Marching modulus) แสดงว่ายางมีองศาการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางบางชนิดเกิดการเสื่อมสภาพแบบเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ยางที่เกิดปรากฏการแบบนี้ได้แก่ ยางคลอโรพรีน (CR) และยางไตรล์ (NBR)

- เส้นกราฟลดลง เนื่องจากยางบางชนิดเสื่อมสภาพแบบเกิดการขาดของสายโซ่ (Chain scission) หรือเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (Reversion) ยางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ได้แก่ ยางธรรมชาติ (NR) ยางไอโซพรีน (IR) และยางบิวทิล (IIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_S$) ของแว็กซ์ผสม

การศึกษาอัตราส่วนของแว็กซ์ผสมที่มีผลต่อการป้องกันโอโซนในยางธรรมชาติ ซึ่งเกิดจากการแพร่ของแว็กซ์ออกมายังพื้นผิวยาง นอกจากการปริมาณของแว็กซ์ที่แพร่ออกมาแล้วยังต้องพิจารณาค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_S$) ของแว็กซ์ผสมที่ C_{33} = 0.8 โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (2.23)

$$\frac{\left(\Delta H_f^\circ\right)_i}{R\left(T_m^\circ\right)_L}\left(1-\frac{\left(T_m^\circ\right)_L}{\left(T_m^\circ\right)_i}\right)=-\frac{\nu^1}{R\left(T_m^\circ\right)_L}\left\{\left(\bar{\delta}_L-\delta_L^i\right)^2-\left(\bar{\delta}_S-\delta_S^i\right)^2\right\} \tag{2.23}$$

เมื่อ $$\left(T_m^\circ\right)_L=\sum_i \omega_i\left(T_m^\circ\right)_i$$

$$\delta_L^i=7.41+0.5914\ln(n/7) \tag{2.24}$$

$$\delta_S^i=8.50+5.763\ln(n/7) \tag{2.25}$$

ตารางที่ ข.1 จุดหลอมเหลวและค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลวของแว็กซ์

ชนิดแว็กซ์	จุดหลอมเหลว (เคลวิน)	ค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลว (แคลอรี/โมล)	ความหนาแน่น (กรัม/ซม.^{3})
Para-wax ($C_{24}H_{50}$)	331.27	10,117.95	0.872
Micro-wax ($C_{33}H_{68}$)	343.92	726.37	0.900

การคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

1. การหาจุดหลอมเหลวของของผสม $\left(T_m^\circ\right)_L$ ได้จาก

$$\left(T_m^\circ\right)_L=(0.27)(331.27)+(0.73)(343.92)=340.45\ K$$

2. การหาปริมาตรต่อโมล (ν^{33} : ซม^3/โมล) ของไมโครคริสตัสไลน์แว็กซ์ที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nu^{33} = \frac{0.2}{0.900}(464)$$
$$= 412.44$$

3. การหาค่าพารามิเตอร์การละลายขององค์ประกอบ i จากสมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25)

$$\left.\begin{aligned}\delta_L^{24} &= 8.31\\ \delta_L^{33} &= 8.14\end{aligned}\right\} \ \bar{\delta}_L = 8.22$$
$$\delta_S^{24} = 15.6$$
$$\delta_S^{33} = 17.26$$

4. จัดรูปสมการที่ (2.23) และแทนค่าที่คำนวณได้ในสมการ

$$-\frac{726.37}{412.44}\left(1-\frac{340.45}{343.92}\right) = \left\{(\bar{\delta}_L - 8.14)^2 - (\bar{\delta}_S - 17.26)^2\right\}$$
$$-0.018 = \left[(\bar{\delta}_L)^2 - 16.28\bar{\delta}_L - (\bar{\delta}_S)^2 + 34.32\bar{\delta}_S - 231.65\right]$$
$$\bar{\delta}_L^2 - 16.28\bar{\delta}_L = \bar{\delta}_S^2 - 34.32\bar{\delta}_S - 231.63 \qquad \text{(ข.1)}$$

5. แทนค่า $\bar{\delta}_L = 8.22$ ในสมการที่ (ข.1)

$$\bar{\delta}_S^2 - 34.32\bar{\delta}_S = (8.22)^2 - 16.28(8.22) - 231.63$$
$$\bar{\delta}_S^2 - 34.32\bar{\delta}_S + 297.88 = 0$$

6. การหาคำตอบของสมการสามารถหาได้จากสูตร

$$y = \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

แทนค่าที่คำนวณได้ในสูตรจะได้

$$\bar{\delta}_S = \frac{-(-34.32) \mp \sqrt{(-34.32)^2 - 4(297.88)(1)}}{2(1)}$$
$$\bar{\delta}_S = 17.10, 17.42 \ \bar{\delta}_S$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_s$) ของแว็กซ์ผสมชนิดต่างๆ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่กล่าวข้างต้นและผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_s$) ของแว็กซ์ผสมชนิดต่างๆ

Para-wax (% โดยน้ำหนัก)	Micro-wax (% โดยน้ำหนัก)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (กรัม/โมล)	พารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยในวัฏภาคของแข็ง ($\bar{\delta}_s$;(แคลอรี/ซม.^{3})$^{1/2}$)
0.0	1.0	464.0	17.2
0.1	0.9	447.3	17.1
0.2	0.8	431.8	17.1
0.3	0.7	417.3	17.1
0.4	0.6	403.8	17.0
0.5	0.5	391.1	17.0
0.6	0.4	379.2	17.0
0.7	0.3	368.0	16.9
0.8	0.2	357.4	16.8
0.9	0.1	347.4	16.6
1.0	0.0	338.0	15.5

ตารางที่ ข.3 ปริมาณของแว็กซ์ผสมที่แพร่ออกมาเคลือบที่ผิวของยางที่ได้จากการสกัด

เวลาที่ใช้อบ (นาที)	ปริมาณของแว็กซ์ที่แพร่ออกมา (กรัม/100กรัมยางสูตร)						
	Micro-wax	2080M	4060M	5050M	6040M	8020M	Para-wax
0	7.46	6.53	5.95	6.55	6.84	12.10	27.12
12	6.92	6.96	6.21	7.60	7.27	9.66	23.86
24	6.77	6.90	6.37	6.54	6.43	9.61	19.04
36	5.80	6.26	5.47	6.81	5.98	11.58	21.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้