

การดูซ้ำและการแพร่ของตัวทำละลายอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติที่ผสมสารมีซัว



นางสาว ปิยดา ยศสุนทร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2261-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SORPTION AND DIFFUSION OF ORGANIC SOLVENT INTO NATURAL RUBBER/POLAR  
COMPOUND BLENDS

Miss Piyada Yodsoontorn

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2261-3



ปิยดา ยศสุนทร : การดูดซับและการแพร่ของตัวทำละลายอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติที่ผสมสารมีขี้. (SORPTION AND DIFFUSION OF ORGANIC SOLVENTS INTO NATURAL RUBBER/POLAR COMPOUND BLENDS) อ. ที่ปรึกษา : ดร.เพียรพรพรค ทัศกร, 93 หน้า. ISBN 974-17-2261-3.

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการดูดซับและการถ่ายโอนตัวทำละลายอินทรีย์ 5 ชนิด (ไซลีน เฮปเทน บิวทิลอะซิเตท ออกทานอล โฟโพลีนไกลคอล) และน้ำมันหล่อลื่น เข้าไปในยางธรรมชาติที่ผสมสารมีขี้ (ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ และแป้งมันสำปะหลัง) ที่อุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส ก่อนและหลังการทำให้ยางคงรูป โดยมีสมมติฐานว่าการเพิ่มสารมีขี้เข้าไปในยางธรรมชาติจะช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขี้ได้ดีขึ้น โดยศึกษาอิทธิพลของสารมีขี้ ตัวทำละลายอินทรีย์ และอุณหภูมิที่มีต่อการถ่ายโอนตัวทำละลายอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติที่ผสมสารมีขี้ และอิทธิพลของสารมีขี้ต่อสมบัติเชิงกล

จากผลการทดลองการดูดซับและการถ่ายโอนมวลสารนี้ถูกอธิบายอยู่ในเทอมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามกฎการแพร่ของฟิค โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านซึ่งคำนวณได้จากข้อมูลการดูดซับและการแพร่ และการทดลองการดูดซับและการแพร่ที่อุณหภูมิต่างๆสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส ซึ่งพบว่าการทำให้ยางคงรูปทำให้การถ่ายโอนตัวทำละลายอินทรีย์เข้าไปในยางลดลงและป้องกันไม่ให้เกิดการละลายได้เพราะมีการเชื่อมโยงกันของสายโซ่โมเลกุลเกิดขึ้น และการเติมสารมีขี้เข้าไปในยางธรรมชาติทำให้มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขี้ได้ดีขึ้น ส่วนยางธรรมชาติในตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขี้จะมีการดูดซับและการแพร่ต่ำ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2545

# # 4372338423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: DIFFUSION COEFFICIENT/ARRHENIUS RELATION/VULCANIZATION

PIYADA YODSOONTORN : SORPTION AND DIFFUSION OF ORGANIC SOLVENT INTO NATURAL RUBBER/POLAR COMPOUND BLENDS. THESIS ADVISOR : PIENPAK TASAKORN PH.D., 93 pp. ISBN 974-17-2261-3.

This research is to investigate sorption and transport of five organic solvents (xylene, heptane, butyl acetate, octanol, propylene glycol) and lubricating oil into natural rubber blended with polar compounds (chloroprene rubber, nitrile rubber, cassava starch) at a temperature between 30-60°C before and after vulcanization. The hypothesis is that adding a polar compound to natural rubber improves its resistance to non-polar solvent. The influences of polar compounds, organic solvents and temperature on the transport of organic solvents into natural rubber/polar compound blends and the influence of polar compounds on mechanical properties have been studied.

The transport characteristic of the system can be described in term of the diffusion coefficients with follow Fick's law and the permeability coefficients can be calculated from the sorption and diffusion data. A temperature dependence of sorption and diffusion was also investigated to estimate the activation energy from the Arrhenius type relation. The transport of organic solvents into natural rubber is reduced if it is vulcanized. Adding a polar compound to natural rubber improve markedly resistance to the transport of non-polar solvent. Polar solvent showed low sorption and diffusion into natural rubber.

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Academic year 2002

Student's signature.....

Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบคุณ ดร.เพียรพรรค ทศคร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ทำให้การทำงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บริษัท เคมีคัล อินโนเวชัน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางไนไตรล์ ขอกราบขอบพระคุณ บริษัท กิจไพบูลย์ จำกัด และบริษัท บายเยอร์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบสมบัติเชิงกลของยาง ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือมาโดยตลอด ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้ ทำให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ได้ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
2. ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 ยางธรรมชาติ.....	3
2.2 ยางคลอโรพรีน.....	7
2.3 ยางอะครีโลไนไตรล์.....	11
2.4 แป้ง.....	14
2.5 การเลือกวัสดุยางมาใช้งาน.....	20

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 ผลของตัวทำละลายอินทรีย์ต่ออย่าง.....	30
2.7 ผลของ mineral oil-based fluids ต่ออย่าง.....	31
2.8 การแพร่ของของเหลวในยาง.....	31
2.9 gayviจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	46
3.1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	46
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	49
3.4 การเตรียมยางผสม.....	49
3.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสม.....	54
3.6 ศึกษาการดูดซับและการแพร่.....	55
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	57
4.1 เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยาง.....	57
4.2 สมบัติเชิงกลของยางผสม.....	58
4.3 การดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันในยาง.....	58
4.3.1 ผลของการทำให้ยางคงรูปต่อการดูดซับของยาง.....	61
4.3.2 ผลของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อการดูดซับของยาง.....	61
4.3.3 ผลของสารมีขั้วต่อการดูดซับของยาง.....	63



สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.4	ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของยาง.....	64
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันในยาง.....	69
4.4.1	ผลของการทำให้ยางคงรูปต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยาง.....	69
4.4.2	ผลของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยาง.....	72
4.4.3	ผลของสารมีขี้ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยาง.....	72
4.4.4	ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยาง.....	73
4.5	ค่าพารามิเตอร์อาร์รีเนียส.....	73
5.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	77
	รายการอ้างอิง.....	78
	ภาคผนวก.....	81
	ภาคผนวก ก. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป.....	82
	ภาคผนวก ข. สมบัติทางฟิสิกส์ของพอลิเมอร์.....	87
	ภาคผนวก ค. สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวทำละลายอินทรีย์.....	89
	ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการซึมผ่าน	
	พลังงานกระตุ้นในกระบวนการแพร่และการซึมผ่าน	
	และค่าความร้อนในการดูดซับ.....	90
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	93

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ขางพอลิคลอโรพรีนชนิดต่างๆในทางการค้า.....	9
2.2 สมบัติต่างๆที่ขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ของอะคริโลไนไตรล์ในโคพอลิเมอร์.....	13
2.3 ความต้านทานน้ำมันของยางอะคริโลไนไตรล์ตาม%ACN.....	13
2.4 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน.....	15
2.5 ปริมาณและสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิด.....	16
2.6 ลักษณะของเม็ดแป้งแต่ละชนิด.....	17
2.7 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ.....	18
2.8 ปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิด.....	19
2.9 พารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายไม่มีขั้ว.....	25
2.10 พารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายมีขั้ว.....	25
2.11 ค่าคงที่ของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล(ที่ 298 K).....	26
2.12 พารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์.....	27
2.13 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลวแต่ละชนิดในยางธรรมชาติ.....	38
2.14 ผลของความเข้มข้นของ n-decane ต่อการแพร่ในยางแต่ละชนิด.....	41
3.1 สมบัติของยางคลอโรพรีน.....	46
3.2 สมบัติของยางอะคริโลไนไตรล์.....	46
3.3 สมบัติจำเพาะของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐาน API คือ API-SJ/CP.....	47
3.4 สมบัติของตัวทำละลายอินทรีย์.....	48

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
3.5 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
4.1 ค่าเฉลี่ยการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ของยางผสมไม่คงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ.....	66
4.2 ค่าเฉลี่ยการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ของยางผสมคงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ.....	67
4.3 ค่าเฉลี่ยการดูดซับน้ำมันหล่อลื่นของยางผสมไม่คงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ.....	68
4.4 ค่าเฉลี่ยการดูดซับน้ำมันหล่อลื่นของยางผสมคงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ.....	68
4.5 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันหล่อลื่น ของยางผสมไม่คงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ.....	70
4.6 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันหล่อลื่น ของยางผสมคงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ.....	71
4.7 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การซึมผ่านตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันหล่อลื่น ของยางผสมคงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ.....	75
4.8 ค่าพารามิเตอร์พลังงานกระตุ้นตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันหล่อลื่น ของยางผสมคงรูป.....	76
ข.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของยางไนไตรล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C 1 atm.....	87
ข.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของยางคลอโรพรีน ที่อุณหภูมิ 25 °C 1 atm.....	87
ข.3 สมบัติทางฟิสิกส์ของยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิ 25 °C 1 atm.....	88
ค.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวทำละลายอินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 20 °C.....	89

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะของ cis-configuration ของยางธรรมชาติ.....	4
2.2 ลักษณะโครงสร้างของหน่วยย่อยพอลิคลอโรพรีน.....	8
2.3 การผลิตยางพอลิคลอโรพรีน.....	8
2.4 โครงสร้างของยางพอลิคลอโรพรีนแบบต่างๆ.....	10
2.5 ลักษณะโครงสร้างของมอนอเมอร์ที่เป็นหน่วยย่อยของยางอะครีโลไนไตรล์.....	11
2.6 โครงสร้างของยางอะครีโลไนไตรล์.....	12
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดที่จุดสมดุลของพอลิเมอร์กับค่าพารามิเตอร์การละลาย ของตัวทำละลายต่างๆ.....	24
2.8 มวลของ n-decane ที่ถูกดูดซับ โดยยางธรรมชาติที่เวลาต่างๆ .....	37
2.9 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และความหนืดของของเหลว ในยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 25°C.....	39
2.10 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลวที่มีความหนืดและความเข้มข้นต่างกัน ที่อุณหภูมิ 25°C.....	39
2.11 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-decane ในยางแต่ละชนิดที่มีอุณหภูมิ กลาสทรานซิชันต่างกัน.....	40
2.12 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-decane ในยางธรรมชาติที่มีสารเติมแต่งแต่ละชนิด ที่อัตราส่วนต่างกัน.....	41
2.13 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-decane ในยางธรรมชาติที่มีระดับความเป็นผลึก ในยางต่างกัน.....	42

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.1 เครื่องมือบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง.....	50
3.2 เครื่อง Oscillating Disk Rheometer.....	52
3.3 ลักษณะกราฟที่ได้จากเครื่อง ODR.....	53
3.4 ลักษณะของกราฟการคงรูปแบบต่างๆ.....	53
3.5 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดไฮโดรลิก.....	54
4.1 เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ.....	58
4.2 ค่าความต้านทานแรงดึงของ NR/CR และ NR/starch ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	59
4.3 ค่าความต้านทานแรงดึงของ NR/NBR ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	59
4.4 ค่าความยืดเมื่อขาดของยางผสมแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ.....	60
4.5 ค่าความแข็งของยางผสมแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ.....	60
4.6 ค่าการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ของยางธรรมชาติที่ยังไม่คงรูปที่อุณหภูมิ 30°C.....	62
4.7 ค่าการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ของยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วที่อุณหภูมิ 30°C.....	63
ก.1 การเรียกชื่อส่วนต่างๆของชิ้นทดสอบความทนแรงดึง.....	82
ก.2 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบความทนแรงดึงแบบหนึ่ง.....	83
ก.3 ลักษณะของชิ้นงาน การจับ และการยืดออก.....	84
ก.4 ขนาดต่างๆของชิ้นงานเมื่อมีการทดสอบความทนแรงดึง.....	85
ก.5 หัวกดแบบ A และ D สำหรับเครื่องกดแบบชอร์.....	86

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตยางธรรมชาติได้เป็นอันดับหนึ่งของโลกมาตั้งแต่ปี 2534 โดยผลิตได้ 1.34 ล้านตัน รองลงมาได้แก่ มาเลเซีย และอินโดนีเซีย ตามลำดับ การที่ประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งแทนที่ประเทศมาเลเซีย ซึ่งครองความเป็นอันดับหนึ่งมาหลายสิบปีติดต่อกัน เนื่องจากประเทศไทยมีการพัฒนาการปลูกยางธรรมชาติพันธุ์ใหม่ทดแทนพันธุ์เก่าและการขยายพื้นที่การปลูกยางจากภาคใต้ไปภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่างและภาคอีสานบางจังหวัด ในส่วนของประเทศมาเลเซียได้ลดปริมาณการปลูกเนื่องจากสาเหตุหลายประการเช่น พื้นที่การปลูกยางพาราลดจำนวนลง ปัญหาแรงงาน และการที่สามารถหาพืชเศรษฐกิจอื่นๆเช่น ปาล์มน้ำมัน ซึ่งให้ผลตอบแทนดีกว่าปลูกยางพารา สำหรับอินโดนีเซียซึ่งเป็นผู้ปลูกยางพารารายใหญ่นั้นก็มีศักยภาพที่แข่งขันกับไทยในด้านการผลิตเนื่องจากมีพื้นที่มาก แรงงานมาก แต่มีอุปสรรคอยู่หลายประการเช่น พัฒนาพันธุ์ยาง การขนส่ง และชาวสวนยางยังไม่ได้รับการส่งเสริมในด้านต่างๆ

ยางพาราหรือยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศที่สามารถนำมาผลิตได้อย่างมากมาย ในกระบวนการผลิตต่อเนื่องนับตั้งแต่การนำน้ำยางสดจากต้นยางพาราผ่านกรรมวิธีการผลิตเป็นวัตถุดิบยางแปรรูปขั้นกลางคือ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง ยางเครป ยางแผ่นผึ่งแห้ง และน้ำยางข้น ยางแปรรูปขั้นกลาง ส่วนใหญ่ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ส่งขายออกต่างประเทศในรูปยางดิบ ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ใช้เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานผลิตภัณฑ์ยางในประเทศเช่น ยางรถยนต์ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของและอื่นๆ การสนับสนุนและเร่งรัดอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางภายในประเทศจึงเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้จึงควรที่จะพัฒนาอุตสาหกรรมภายในประเทศเพิ่มขึ้นอย่างจริงจัง และต่อเนื่องเพราะจะเป็นมาตรการเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบยางที่มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด การทำให้ยางดิบมีมูลค่าเพิ่มขึ้น โดยการดัดแปรงรูปยางดิบให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ๆก็เป็นทางออกทางหนึ่งในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางแทนที่จะแสวงหาตลาดเพิ่มเพื่อส่งออกยางดิบซึ่งมีมูลค่าต่ำ

ปกติยางส่วนใหญ่มักนำมาทำสายยาง(hoses)และยางกันรั่วซีม(seals)ซึ่งต้องสัมผัสกับตัวกลางหลายชนิดมากมาย สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาเมื่อต้องการเลือกใช้วัสดุยางคือ ความต้านทานต่อตัวกลางทั้งหมดที่ยางต้องสัมผัสด้วยในอุณหภูมิสูงสุดที่นำมาใช้งาน ดังนั้นสิ่งสำคัญที่เราต้องทราบคือ การถ่ายโอนมวลของตัวกลางที่ต้องสัมผัสกับวัสดุยาง หากมีความรู้ในเรื่องนี้ อาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางแล้วทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการใช้งานได้ การเลือกองค์ประกอบ

ต่างๆในสารประกอบยังสามารถออกแบบได้อย่างเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องสัมผัสกับสารชนิดต่างๆได้ ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ อีกประมาณ 5-8 เปอร์เซ็นต์เป็นสารอื่นที่ไม่ใช่ยางปนอยู่ด้วยเช่น โปรตีน กรดไขมัน และน้ำตาล เป็นต้น ซึ่งสารที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้ทำให้ยางมีสมบัติมีขั้วเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงทำให้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วแทรกซึมเข้าไปในยางได้และความทนทานต่อน้ำมันของยางก็มีต่ำด้วย ซึ่งจะเกิดการพองตัวเมื่อแช่ในน้ำมัน จึงมีแนวความคิดในการนำยางธรรมชาติมาปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้ยางธรรมชาติทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันได้

สมมติฐานของงานวิจัยนี้คือ เมื่อเพิ่มสภาพการมีขั้วแก่ยางธรรมชาติ จะทำให้ยางมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วและน้ำมันได้

สำหรับงานวิจัยนี้ ยางที่เตรียมได้จะมีสมบัติขั้วโดยการผสมกับสารที่มีขั้วในอัตราส่วนต่างๆและทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายโอนมวลของตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดเข้าไปในยางที่เตรียมได้โดยศึกษาผลของสารที่มีขั้ว ตัวทำละลายอินทรีย์ และอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการถ่ายโอนมวลของตัวทำละลายอินทรีย์ และผลของสารที่มีขั้วต่อสมบัติเชิงกล

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของสารมีขั้ว ตัวทำละลายอินทรีย์ และ อุณหภูมิที่มีต่อการถ่ายโอนมวลของตัวทำละลายอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติผสมสารมีขั้ว
2. ศึกษาผลของสารมีขั้วที่มีต่อสมบัติเชิงกลเช่น ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็ง และค่าความยืดเมื่อขาดของยางผสมดังกล่าว

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. เตรียมยางผสมที่เตรียมจากการผสมยางธรรมชาติกับสารมีขั้วได้แก่ คาร์โบไฮเดรต (แป้งมันสำปะหลัง) ยางพอลิคลอโรพรีน ยางอะคริโลไนไตรล์
2. ปริมาณของตัวทำละลายได้แก่ heptane, xylene, octanol, propylene glycol, butyl acetate และน้ำมันหล่อลื่น ที่ถ่ายโอนเข้าไปในยางผสมที่เวลาต่างๆ
3. ผลของอัตราส่วนผสมและชนิดของสารมีขั้ว ตัวทำละลายอินทรีย์ รวมทั้งอุณหภูมิต่ออัตราการถ่ายโอนมวลสาร
4. ผลของสารมีขั้วต่อสมบัติเชิงกลคือ ความต้านทานแรงดึง ความแข็ง และความยืดเมื่อขาด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

แนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆจากยางธรรมชาติให้เหมาะสมกับการใช้งาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์

#### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR)<sup>(1),(2),(3)</sup>

พืชที่ให้ยางธรรมชาติเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ เรียกว่าต้นยางพารา มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* ซึ่งแต่เดิมมีอยู่เฉพาะในทวีปอเมริกาใต้เท่านั้น และได้มีผู้นำมาปลูกในทวีปเอเชียและแอฟริกา ภูมิอากาศแบบร้อนชื้นจะเหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของต้นยางพาราเช่น ในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งในปัจจุบันสามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากกว่า 90 % ของยางธรรมชาติที่ใช้ในโลกที่เหลือได้มาจากแถบแอฟริกากลาง สำหรับประเทศไทยสามารถปลูกยางพาราได้ทั้งภาคใต้และภาคตะวันออก

เมื่อต้นยางโตเต็มที่แล้วชาวสวนจะเก็บน้ำยางโดยการกรีดเปลือกของลำต้น (tapping) ให้น้ำยางไหลซึมออกมา น้ำยางที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำนม มีกลิ่นหอมเล็กน้อยประกอบด้วยอนุภาคยางเล็กๆแขวนลอยอยู่ในลักษณะอิมัลชัน (emulsion) มีเนื้อของแข็ง 30-40% ขึ้นกับพันธุ์ของต้นยาง อายุของต้นยาง และฤดูกาล

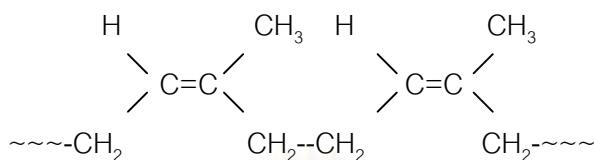
การแปรรูปน้ำยางให้เป็นยางดิบมีหลายลักษณะต่างๆกันคือ อยู่ในรูปของน้ำยางข้น (concentrated latex) หรือยางดิบแห้งชนิดต่างๆได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (air-dried sheet, ADS) ยางเครพขาว (crepes) หรือยางแท่ง (block rubber) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่างๆเช่น ยางรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ที่นอนฟองน้ำ และรองเท้ายาง เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากยางมีสมบัติพิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ คือ มีความยืดหยุ่นดี นอกจากนี้ยังมีเนื้อที่บีบ สามารถกันน้ำและอากาศไม่ให้ผ่านได้โดยง่าย อีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นยางจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และมีคุณค่ามาก

ยางธรรมชาติเป็นยางที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตวัสดุสำเร็จรูปทั่วไปที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษเช่น การทนต่อน้ำมัน หรือทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นหลายชนิด แต่ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตวัสดุสำเร็จรูปก็ยังคงสูงอยู่เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ดีมาก มีความสามารถในการกระดอน (resilience) สูง มีสมบัติเหนียวติดกันเองมาก การเกิดความร้อนสะสมต่ำ และมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของแก๊สได้ดี



### 2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน (Polyisoprene,  $(C_5H_8)_n$ ) ซึ่งได้จากหน่วยของ ไอโซพรีนต่อกันแบบหัวต่อหาง (head to tail) ลักษณะของ cis-configuration เป็นดังนี้



รูปที่ 2.1 ลักษณะของ cis-configuration ของยางธรรมชาติ<sup>(4)</sup>

ส่วนยางธรรมชาติชนิดอื่นๆเช่น ยางฮีเวีย (hevea rubber) มีโครงสร้างเป็น cis 1,4 polyisoprene ยางกัตตาเปอร์ชา (gutta-percha) และยางบาลาตา (barata) มีโครงสร้างเป็น trans 1,4 polyisoprene ซึ่งต้นกัตตามีอยู่ในประเทศมาเลเซีย ส่วนบาลาตามีอยู่บริเวณชายฝั่ง ตะวันออกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาใต้ และในแคว้นอินโดนีเซีย ซึ่งไม่ค่อยมีความสำคัญในทางการค้ามากนักมีการใช้งานน้อยแต่เดิมใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิลใต้น้ำ ปัจจุบันใช้ทำที่หุ้มลูกกอล์ฟ และกาวพิเศษบางชนิดเท่านั้น ทั้งนี้เพราะน้ำยางเกิดการแข็งตัวได้เร็วมากในอากาศ

### 2.1.2 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex)

น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำนม มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ความหนาแน่น ประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่า pH 6.5-7.0 น้ำยางจะมีอนุภาคขนาดต่างๆกันแขวนลอยหรือกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว (disperse medium) โดยอนุภาคเหล่านี้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน และมีประจุเป็นลบซึ่งผลัดกันตลอดเวลาจึงทำให้อนุภาคเหล่านี้สามารถแขวนลอย และคงสภาพเป็นยางเหลวอยู่ได้นานจนกว่าจะมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่างๆมารบกวนจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

น้ำยางมีลักษณะเป็นสารละลายคอลลอยด์ (colloid) ชนิดที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (hydrosol) แต่มีลักษณะ พิเศษคือ น้ำยางมีลักษณะก้ำกึ่งระหว่างสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แต่ลักษณะที่ไม่ชอบน้ำจะเด่นชัดกว่า นอกจากนี้ น้ำยางยังประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยางได้แก่ สารพวกโปรตีนและกรดอะมิโน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และอนุผลของโลหะเป็นต้น

### 2.1.3 ยางดิบแห้งชนิดต่างๆ<sup>(5)</sup>

#### 1) ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

ประเทศไทยสามารถผลิตยางแผ่นรมควันได้ประมาณ 80 % ของยางดิบที่ผลิตได้ทั้งหมดส่วนใหญ่ได้จากสวนยางขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้การแปรรูปน้ำยางสดเหล่านี้ให้เป็นยางแผ่นดิบรมควัน โดยนำแผ่นยางดิบที่ได้มาผึ่งทำให้แผ่นยางที่ได้มีความชื้นลดลง สำหรับการจัดชั้นของยางนั้นจะดูด้วยสายตา โดยพิจารณาจากขนาด รูปร่าง ความหนา สี เชื้อราบนแผ่นยาง ความสม่ำเสมอของตำหนิจากการรมควัน ความชื้น สิ่งแปลกปลอม เป็นต้น

การจัดชั้นคุณภาพของยางแผ่นรมควันสามารถแบ่งได้เป็นชั้นต่างๆดังนี้ คือ

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ

เป็นยางแผ่นรมควันที่มีการควบคุมการผลิตอย่างเข้มงวด ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรมควันมากเกินไป แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาดรมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 1

ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏหรือทิ้งรอยของยางถูกรมควันมากหรือปราศจากร่องรอยของการถูกรมควันไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 2

ก้อนยางแต่ละก้อนมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 5 % แผ่นยางมีฟองอากาศบ้าง แต่ปราศจากร่องรอยของการถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีจุดต่างของสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอม

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 3

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้างแต่ต้องไม่เกิน 10 % แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศบ้าง แต่ต้องไม่มีร่องรอยของการถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 4

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 20 % แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรมควันไม่ถูกต้องปานกลาง ยางต้องแห้งดี ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 5

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 30 % แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรมควันไม่ถูกต้องขนาดใหญ่

## 2) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air-Dried Sheet, ADS)

หนังสือมาตรฐานสากลว่าด้วยการจัดชั้นคุณภาพและการห่ออย่างธรรมชาติ (International Standards of Quality and Packing for Natural Grade The Green Book) หมายถึง แผ่นยางที่มีสีใสซึ่งมีขั้นตอนการผลิตเช่นเดียวกับยางแผ่นรมควันทุกประการเพียงแต่จะต้องมีการควบคุมแต่ละขั้นตอนอย่างพิถีพิถัน และทำให้แห้งโดยไม่ต้องรมควัน และต้องไม่มีการเติมสารอื่นนอกเหนือไปจากสารที่ได้รับการยกเว้น เช่น สารฟอกสีโซเดียมไบซัลไฟท์ และสารกันเชื้อรา พาราไดโตรพีนอล

## 3) ยางเครพ (crepes) ยางเครพที่ผลิตโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 พวก คือ

ก. ยางเครพที่ผลิตจากน้ำยางสดได้แก่ ยางเครพขาว และยางเครพสีจางเป็นยางที่ไม่มีการสีเหลือง กรรมวิธีผลิตไม่ทำให้ยางมีสีคล้ำหรือมีสีดำ มีการพิจารณาคัดเลือกพันธุ์ยางที่ใช้ในการผลิต น้ำยางที่จับตัวต้องเจือจางให้มีเนื้อยางแห้ง 20% เดิมโซเดียมไบซัลไฟท์ และสารฟอกสี

ข. ยางเครพคุณภาพต่ำ เป็นยางที่นำมาจากยางที่จับตัวแล้วเช่น เศษยางในกระบวนการผลิตขณะที่ยางผ่านเข้าเครื่องจักรต้องฉีดน้ำยางตลอดเวลาเพื่อชะล้างทำความสะอาดขั้นตอนสุดท้ายจะรีดยางเป็นแผ่นเครพ ผึ่งให้แห้งในโรงผึ่ง

## 4) ยางแท่ง (Block Rubber)

ยางแท่งเป็นยางที่ทำจากน้ำยางและเศษก้อนยาง โดยทำให้ยางเป็นชิ้นเล็กๆแล้วนำมาอบด้วยความร้อนให้แห้งต่อจากนั้นจึงอัดเป็นแท่ง ยางแท่งเป็นยางที่มีการระบุคุณภาพมาตรฐานมีการใช้เครื่องจักรเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต บรรจุหีบห่อทันสมัยสะดวกในการขนส่งและใช้งาน ยางแท่งของประเทศไทยมีชื่อเรียกว่า เอส ที อาร์ (STR, Standard Thai Rubber) มีการระบุเป็นคุณภาพมาตรฐานยางแท่งด้วย

## 5) ยางskim (Skim Rubber)

ยางskimเป็นผลิตผลจากหางน้ำยาง ซึ่งมีเนื้อยางแห้งอยู่ 3-7 % อันเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำยางข้น การผลิตยางskimโดยนำหางน้ำยางมาจับตัว ยางที่ได้จะมีสารที่ไม่ใช่ยางปะปนอยู่ เช่น โปรตีนซึ่งทำให้ยางมีกลิ่นเหม็น และปฏิกิริยาการทำให้ยางคงรูปเกิดขึ้นเร็ว โดยทั่วไปยางskimจะผลิตจำหน่ายในรูปของยางแท่งและยางเครพ

## 6) ยางความหนืดคงตัว (Viscosity Stabilized Rubber)

ยางชนิดนี้มีความหนืดต่ำและคงตัว ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนการบดยางผสมสารเคมีที่เรียกว่า การบดยางให้นิ่ม (mastication) จะทำให้ประหยัดพลังงานในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยที่สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยางไม่เปลี่ยนแปลง ยางพวกนี้มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น

- ยาง CV (Constant Viscosity Rubber) เป็นยางที่มีความหนืดต่ำคงที่
- ยาง LV (Low Viscosity Rubber) เป็นยางที่มีความหนืดต่ำ

### 2.1.4 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติจะให้สมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากเมื่อถูกยืดออกโมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้ความต้านทานแรงดึงสูง สมบัติการคืนตัวและการกระดอน (resilience) สูงกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ การใช้สารเสริมแรง (reinforce filler) เช่น เขม่าดำ (carbon black) จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น ยางธรรมชาติมีจุดอ่อนตัว (softening point) ประมาณ 120 องศาเซลเซียส มีความทนทานน้ำ กรดเจือจาง ด่างและเกลือได้ดี แต่กับออกซิเจน โอโซน แสงแดด และแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้ยางธรรมชาติเกิดรอยแตก หรือเกิดการแตกหักได้ ซึ่งปริมาณโอโซน 100 ppm สามารถทำลายยางได้ภายใน 2 นาที และถ้าจุ่มยางธรรมชาติในกรดเช่น กรดไนตริก กรดซัลฟูริก กรดโครมิก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ จะถูกทำลายอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ความทนน้ำมันของยางธรรมชาติมีค่าต่ำมากเพราะยางธรรมชาติมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเป็นยางที่ไม่มีขั้ว มีมากในประเทศไทย ราคาถูก

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางที่ทำจากยางธรรมชาติได้แก่ ยางล้อรถยนต์ ยางเครื่องบิน ยางรองคอสพาน ยางรองรับแรงสะเทือน หรือแผ่นดินไหว ยางชิ้นส่วนรถยนต์ และเฟอรินเจอร์ พื้นรองเท้า กาวยาง ยางเส้นรัดของ เป็นต้น

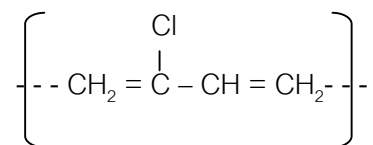
## 2.2 ยางพอลิคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber, CR)<sup>(1),(6),(7),(8)</sup>

นีโอพรีน (Neoprene) เป็นชื่อเรียกโดยทั่วไปของยางคลอโรพรีน หรือพอลิคลอโรพรีน (poly-2-chlorobutadiene) เป็นยางสังเคราะห์ทางการค้าชนิดแรกของโลก ถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดย W.H.Carothers และผู้ร่วมงาน ในปี ค.ศ.1930 ต่อมาในปีค.ศ. 1931 จึงเริ่มมีการผลิตขึ้นสำหรับการค้าโดย E.I. du Pont de Nemours & Company ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในเวลาต่อมาได้ถูกใช้กระจายไปทั่วโลก ภายหลังจากการพัฒนาและการผลิตเป็นเวลาเกือบ 40 ปี พบว่ามีผู้ผลิตยางชนิดนี้อย่างน้อย 7 บริษัทคือ

- E.I du Pont Nemours & Company (ในสหรัฐอเมริกาและไอร์แลนด์เหนือ)
- Showa Neoprene K.K. (ญี่ปุ่น)
- Petrotex (อเมริกา)
- Bayer-Baypren (เยอรมัน)
- Denki Kagaku-Denka (ญี่ปุ่น)
- Plastimere-Butaclor (ฝรั่งเศส)
- Skyprene-Toya Soda (ญี่ปุ่น)

### 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางพอลิคลอโรพรีน

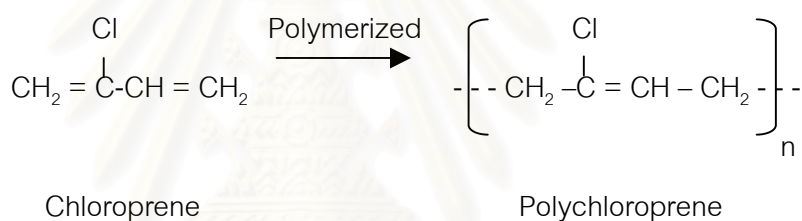
ยางพอลิคลอโรพรีน ประกอบด้วยหน่วยย่อยของคลอโรพรีน (2-chloro-1,3-butadiene) เชื่อมโยงกัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของหน่วยย่อยพอลิคลอโรพรีน<sup>(7)</sup>

### 2.2.2 การผลิตยางพอลิคลอโรพรีน

ในปัจจุบันการผลิตยางพอลิคลอโรพรีนส่วนใหญ่ใช้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระในอิมัลชัน (free radical emulsion polymerization of chloroprene) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การผลิตยางพอลิคลอโรพรีน<sup>(1)</sup>

สมบัติของยางที่ได้ขึ้นกับเทคนิคในการสังเคราะห์ และสารเติมแต่งที่เติมเข้าไปในยาง ยางสังเคราะห์ที่ได้ มีทั้งที่เป็นของแข็งและเป็นน้ำยาง ตารางที่ 2.1 แสดงยางพอลิคลอโรพรีนชนิดต่างๆในทางการค้า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

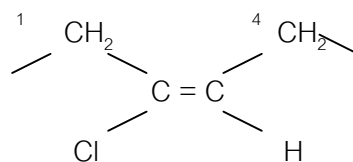
## ตารางที่ 2.1 ยางพอลิคลอโรพรีนชนิดต่างๆในทางการค้า<sup>(9)</sup>

Du Pont Neoprene			
Grade	Mooney Viscosity:ML100°C	Principal features/Applications	Crystallization rate*
AC	-	For impact adhesives	VH
AD	-	For impact adhesives	VH
GN	55-65	General purpose	M
GNA	55-65	Improved raw polymer stability	M
GRT	45-60	Good building tack	L
GS	45-60	Non-discolouring	M
GW	45-60	Very good tear strength and flex fatigue	M
W	45-54	Good ht.resistance/low compression set	H
W-M1	36-42	For cable and cellular product	M
WD	110-130	For low temperature applications	VL
WHV	110-130	For low cost, highly filled compound	M
WRT	45-54	Maximum resistance to crystallization	VL
WX	45-54	Slower curing than neoprene W	M
TW	45-54	Good processing	L
TW100	95-105	For high filler loading	-
TRT	45-54	Most crystallization resistant grade	VL

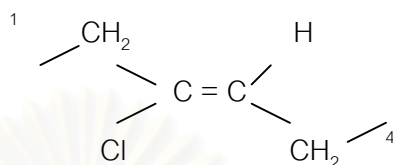
\*VH = very high : H = high : M = medium : L = low : VL = very low

### 2.2.3 โครงสร้างของยางพอลิคลอโรพรีน

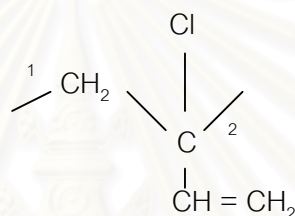
การสังเคราะห์ยางพอลิคลอโรพรีน ทำได้โดยใช้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันด้วยอนุมูลอิสระเสรี (free-radical emulsion polymerization) เป็นการพอลิเมอไรซ์ 2-chloro-1,3-butadiene พอลิเมอไรท์ที่ได้มีโครงสร้างแบบต่างๆ 4 แบบ ดังรูปที่ 2.4 ส่วนใหญ่เป็น trans-1,4 ประมาณ 85%; เป็น cis-1,4 ประมาณ 10% เป็น 1,2- ประมาณ 1.5 % และเป็น 3,4- ประมาณ 1%



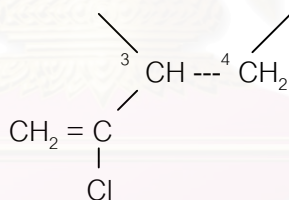
Cis-1,4-polychloroprene (10%)



Trans-1,4-polychloroprene (85%)



1,2-polychloroprene (1.5%)



3,4-polychloroprene (1%)

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของยางพอลิคลอโรพรีนแบบต่างๆ<sup>(9)</sup>

#### 2.2.4 สมบัติของยางพอลิคลอโรพรีน

ยางพอลิคลอโรพรีนเป็นยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว ความหนาแน่นสูง ยางที่ผลิตได้ในทางการค้าจะมีค่า  $T_g$  ประมาณ  $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $T_m$  ประมาณ  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในการจัดตัวส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นแบบ trans-form จึงทำให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย ให้สมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากเมื่อถูกเมื่อถูกยืดออกโมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้ความต้านทานแรงดึงสูง มีสมบัติทางกายภาพคล้ายยางธรรมชาติ แต่มีสมบัติต้านความทานทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากการสัมผัสกับอากาศ ความร้อน และสารเคมีดีกว่าเพราะยางพอลิคลอโรพรีนมีพันธะคู่ที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาจึง

เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีและออกซิเจนได้ยาก โดยยางพอลิคลอโรพรีนยังทนต่อสภาพที่สัมผัสกับน้ำมันปิโตรเลียมได้บ้าง แต่ไม่ทนต่อพวกอะโรมาติก เพราะยางพอลิคลอโรพรีนเป็นยางที่มีขั้ว เมื่อสัมผัสกับน้ำมันหรือจารบีซึ่งไม่มีขั้วจึงไม่เกิดการละลายเข้ากัน นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการลวกติดไฟและยอมให้ก๊าซซึมผ่านต่ำ สามารถใช้ได้สำหรับช่วงความแข็งที่กว้างซึ่งเป็นสมบัติที่ดีสำหรับการแปรรูปสมบัติต่างๆของยางธรรมชาติและพอลิคลอโรพรีน

สารตัวเติมสำหรับยางพอลิคลอโรพรีนมีหลายชนิดได้แก่ เขม่าดำ (carbon black), แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ), ซิลิกาและซิลิเกต และไมกา ซึ่งการเติมสารตัวเติมดังกล่าวจะช่วยในการปรับปรุงสมบัติของยางพอลิคลอโรพรีนด้านต่างๆให้ดีขึ้นได้

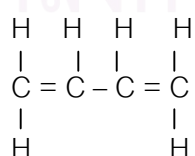
ตัวอย่างการใช้งานที่สำคัญของยางพอลิคลอโรพรีน ถ้าเป็นพอลิคลอโรพรีนที่ได้จากการพอลิเมอไรซ์ที่อุณหภูมิต่ำ จะตกผลึกง่าย ดังนั้นจึงนิยมนำมาผลิตเป็นกาวยาง (adhesives) สำหรับยางพอลิคลอโรพรีนเกรดอื่นๆ มักนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พวกอะไหล่รถยนต์ (automotive part) ท่อหรือสายยาง สายพานลำเลียง ราวบันไดเลื่อน ปะเก็นและแผ่นบุภายในถังเก็บสารเคมี เป็นต้น

## 2.3 ยางอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile-Butadiene Rubber, NBR)<sup>(1),(9),(11)</sup>

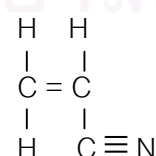
ยางอะคริโลไนไตรล์หรือเรียกว่า ยางไนไตรล์ จัดเป็น special purpose rubber สมบัติจำเพาะอย่างแรกคือ มีความต้านทานน้ำมันได้ดี ทั้งที่อุณหภูมิปกติและที่อุณหภูมิสูง ถูกผลิตขึ้นในทางการค้าครั้งแรกโดย I.G.Farbenindustrie ประเทศเยอรมัน ในปี ค.ศ. 1935 โดยมีชื่อทางการค้าว่า Perbunan

### 2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางอะคริโลไนไตรล์

ยางอะคริโลไนไตรล์ คือโคพอลิเมอร์ของไดอีนกับไนไตรล์ที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งในที่นี้จะจำกัดเฉพาะโคพอลิเมอร์ของบิวตะไดอีน กับอะคริโลไนไตรล์เท่านั้น เนื่องจากยางอะคริโลไนไตรล์ส่วนใหญ่จะได้มาจากการโคพอลิเมอไรซ์โมโนเมอร์ 2 ชนิดคือ



Butadiene



Acrylonitrile

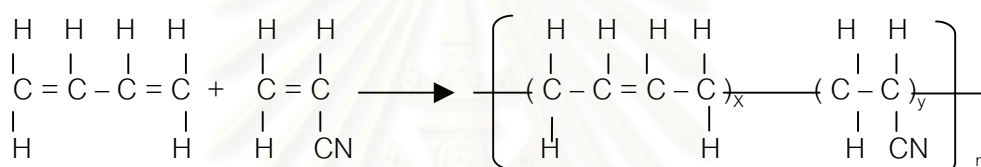
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างของมอนอเมอร์ที่เป็นหน่วยย่อยของยางอะคริโลไนไตรล์<sup>(9)</sup>



เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของโมโนเมอร์ทั้งสองใกล้เคียงกัน ดังนั้นในทางปฏิบัติ อัตราส่วนโดยน้ำหนักถือว่าเป็นอัตราส่วนโดยจำนวนโมลด้วยตัวอย่างเช่น ยางไนไตรล์ที่มีอัตราส่วนระหว่างบิวตะไดอีน และอะคริโลไนไตรล์เท่ากับ 2:1 จะเป็นทั้งอัตราส่วนโดยน้ำหนักและโดยจำนวนโมเลกุล

### 2.3.2 การผลิตยางอะคริโลไนไตรล์

โดยทั่วไปไปยางอะคริโลไนไตรล์ถูกผลิตด้วยกระบวนการโคโพลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันของบิวตะไดอีนกับอะคริโลไนไตรล์ ซึ่งคล้ายกับพอลิเมอร์แบบอิมัลชันอื่นๆเช่น ยางSBR ซึ่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 วัตถุประสงค์สำคัญที่ใช้ในการสังเคราะห์ยางอะคริโลไนไตรล์คือ บิวตะไดอีนและอะคริโลไนไตรล์มอนอเมอร์ ซึ่งสังเคราะห์มาจากแนพทาที่ได้จากน้ำมัน



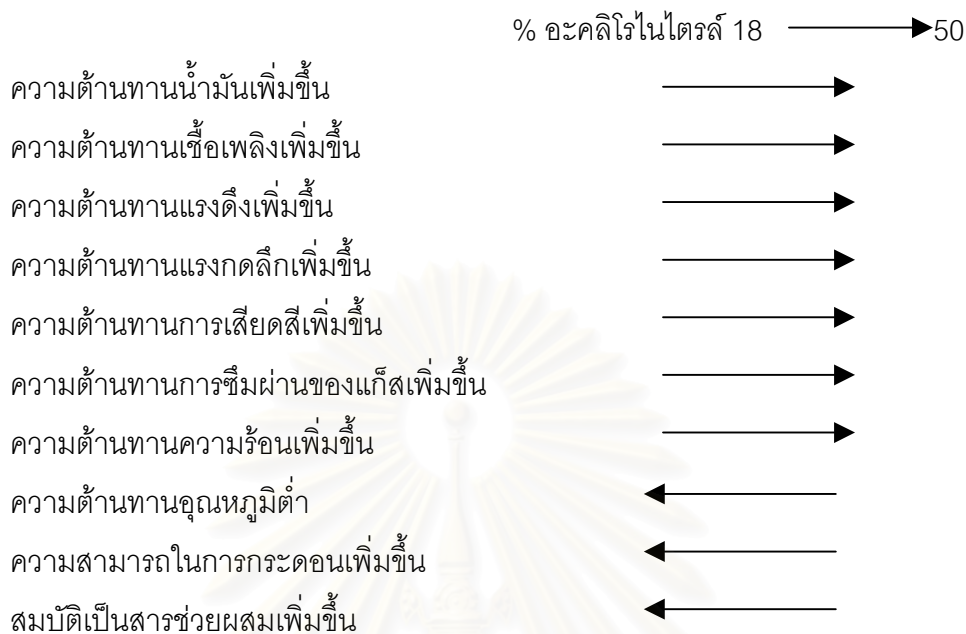
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของยางอะคริโลไนไตรล์<sup>(9)</sup>

ค่า x และ y จะขึ้นอยู่กับส่วนผสม และอุณหภูมิของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ยางในสมัยแรกๆ จะประมาณ 25-50 องศาเซลเซียส หรือเรียกว่า hot polymer ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จะมีกิ่งก้านสาขามาก จึงมีความเหนียวดี และจากการพัฒนากระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน ทำให้สามารถสังเคราะห์ยางอะคริโลไนไตรล์ที่อุณหภูมิประมาณ 5 องศาเซลเซียสได้เป็น cold polymer ซึ่งโมเลกุลจะเป็นแบบเส้นมากกว่า จึงสามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่า hot polymer

### 2.3.3 สมบัติของยางอะคริโลไนไตรล์

สมบัติของยางอะคริโลไนไตรล์ขึ้นกับปริมาณอะคริโลไนไตรล์ที่อยู่ในยาง (18-50%) ซึ่งสมบัติเหล่านี้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 การมียางอะคริโลไนไตรล์หลายเกรด ทำให้ผู้ผลิตสารประกอบยางสามารถเลือกยางให้มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานได้มากขึ้น

## ตารางที่ 2.2 สมบัติต่างๆที่ขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ของอะคลิโรไนไตรล์ในโคพอลิเมอร์<sup>(9)</sup>



จะเห็นได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์อะคลิโรไนไตรล์สูงจะทำให้มีสมบัติความต้านทานต่อน้ำมันและเชื้อเพลิงได้ดี และความต้านทานแรงดึง แรงกดลึก การเสียดสี การซึมผ่านของแก๊ส และความร้อนได้ดี แต่ที่เปอร์เซ็นต์อะคลิโรไนไตรล์ต่ำจะมีสมบัติความต้านทานอุณหภูมิต่ำ แลความสามารถในการกระดอนและสมบัติเป็นสารช่วยผสมได้ดี

ความต้านทานน้ำมันของยางอะครีโลไนไตรล์ตาม %ACN แสดงในตารางที่ 2.3

## ตารางที่ 2.3 ความต้านทานน้ำมันของยางอะครีโลไนไตรล์ตาม % ACN<sup>(9)</sup>

% อะคลิโรไนไตรล์ในพอลิเมอร์	ความต้านทานน้ำมันของยางคงรูป
50-60	ความต้านทานน้ำมันดีมาก
35-40	ความต้านทานน้ำมันดี
25	ความต้านทานน้ำมันปานกลาง
15	ความต้านทานน้ำมันต่ำ
2-5	เกิดการพองตัวในน้ำมัน

ยางอะคริไลไนไตรล์ซึ่งมีปริมาณอะคริไลไนไตรล์สูงและสูงมากจะถูกใช้งานเมื่อต้องการความต้านทานน้ำมันสูงสุด เช่น oil wellpart, fuel cell liner และ fuel hose เป็นต้น รวมถึงการใช้งานอื่นๆ ที่ต้องการความต้านทานน้ำมันและน้ำมันเชื้อเพลิงอะโรมาติก

ส่วนเกรดปานกลาง (medium grade) จะถูกใช้งานในที่ซึ่งน้ำมันมีปริมาณอะโรมาติกต่ำกว่าหรืองานที่ยอมให้มีการบวมตัวได้บ้าง

ยางอะคริไลไนไตรล์เกรดต่ำและต่ำปานกลาง (Low and medium low acrylonitrile grades) จะถูกนำมาใช้งานในกรณีที่ความอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่ำมีความสำคัญมากกว่าความต้านทานน้ำมัน

## 2.4 แป้ง<sup>(10)</sup>

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหารเช่น เมล็ดและหัว มนุษย์ได้รับแป้งจากพืชแตกต่างกันตามภูมิประเทศในโลก ทางด้านทวีปอเมริกาเหนือกลาง จะมีข้าวโพด ข้าวสาลีเป็นแหล่งให้แป้งที่สำคัญ ทางยุโรปมีมันฝรั่งและแถบเอเชีย แอฟริกา มีข้าวและมันสำปะหลัง เป็นต้น แต่ที่สำคัญมีการใช้กันทั่วโลกคือ แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวสาลี แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ อาหารทั้งหมดส่วนใหญ่จะมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักของทุกชนชาติเช่น ข้าว ขนมปัง ก๋วยเตี๋ยวและพาสต้า

คำว่า แป้ง ในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปนเช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาวัวร์ (flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง ก็จะถูกอยู่ในประเภทฟลาวัวร์เรียกว่า corn flour, wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้าที่ยังมีโปรตีน 7-8% เรียกว่า rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนอันหมายถึงโปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่นๆถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นแป้งสตาร์ช (starch) เช่น corn starch, wheat starch เป็นต้น สำหรับแป้งมันสำปะหลังที่ไทยผลิตมากที่สุดในโลก ปัจจุบันผลิตโดยกรรมวิธีทันสมัยมีความบริสุทธิ์ของแป้งสูง จัดเป็นแป้งสตาร์ช (cassava starch) คำว่าแป้งที่กล่าวต่อไปนี้จึงหมายถึงแป้งสตาร์ช

สำหรับประเทศไทย อุตสาหกรรมแป้งถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมแปรรูปทางเกษตรกรรมหลักของประเทศ แป้งที่ผลิตมากที่สุดคือ แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งได้มีการผลิตเป็นแป้งคุณภาพสูง (มีสิ่งเจือปนน้อย) ปัจจุบันมีโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังที่จดทะเบียนกับสมาคมการค้าอุตสาหกรรม

สาหรรมแป้งมันสำปะหลังไทยอยู่ 41 โรงงาน การผลิตสำรวจในช่วง พ.ศ. 2530-2540 สามารถผลิตแป้งมันสำปะหลังได้ในปริมาณ 2 ล้านตัน ส่งออกจำหน่ายต่างประเทศประมาณ 1 ล้านตัน

### 2.4.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิดคือ

1. อะมิโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น
2. อะมิโลเพกทิน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่ง วางตัวในแนวรัศมี

แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.4 ทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.4 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน<sup>(10)</sup>

คุณสมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha$ -1,4	$\alpha$ -1,4 และ $\alpha$ -1,6
ขนาด	200-2000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับ ตัวเป็นก้อนและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

และปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าแป้งข้าวโพด แป้งสาลีจะมีโครงสร้างแบบอะมิโลสสูงสุด แป้งข้าวโพดข้าวเหนียวไม่มีเลย ส่วนแป้งมันสำปะหลังจะมีโครงสร้างแบบอะมิโลเพกทินสูง ซึ่งอะมิโลเพกทินนี้จะมีสมบัติการละลายน้ำได้ดีซึ่งแสดงถึงสภาพความมีขี้สูงนั่นเอง

ตารางที่ 2.5 ปริมาณและสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิด<sup>(10)</sup>

	แป้งมันฝรั่ง	แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมัน สำปะหลัง	แป้งข้าวโพด ข้าวเหนียว
อะมิโลส (%น้ำหนักแห้ง)	21	28	28	17	0
อะมิโลเพกทิน (%น้ำหนักแห้ง)	79	72	72	83	100
DP อะมิโลส	3,000	800	800	3,000	-
DP อะมิโลเพกทิน	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$2 \times 10^6$
จำนวนโมเลกุลอะมิโลส ( $\times 10^2$ )ในแป้ง 1 กรัม	30	130	130	20	0
จำนวนโมเลกุลอะมิโลเพก ทิน( $\times 10^{17}$ )ในแป้ง 1 กรัม	150	130	130	150	190
สัดส่วนจำนวนโมเลกุลของ อะมิโลสต่ออะมิโล เพก ทิน	200	1000	1000	150	0
DPเฉลี่ยของโมเลกุล	14,000	3,000	3,000	18,000	2,000,000

DP = Degree of Polymerization

อะมิโลเพกทินถือว่ามีควมสำคัญมากกว่าอะมิโลสทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ ดังนั้นเมื่อมีอะมิโลเพกทินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ปริมาณของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินที่แตกต่างกันทำให้สมบัติของแป้งแตกต่างกัน

#### 2.4.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาดเล็กที่มีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ แสดงดังตารางที่ 2.6 และ 2.7 และเม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็น semi-crystalline มีส่วนที่เป็นผลึก (crystallite) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) หรือ gel phase เมื่อสายพอลิเมอร์ของกลูโคสมาเรียงขนานกัน เกิดพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่าง 2 สาย และเกิดการรวมตัวกับน้ำ (hydrate bridge) เกิดเป็นพื้นที่ส่วนที่เรียกว่าผลึกหรือ micelle (crystallite) ส่วน

ที่เกิดเป็นผลึกนี้เกิดจากอะมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลในหลายๆไมเซลล์ (micelles) เชื่อมกันเป็นร่างแห 3 มิติด้วยพันธะไฮโดรเจน ความแข็งแรงของร่างแหขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุลที่มาเชื่อมต่อกันและการจัดโมเลกุลของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งมีโครงสร้างที่เป็นผลึกอยู่ 25-50 % ในแป้งจากหัวหรือราก ส่วนอะมิโลเพกทินจะมีโครงสร้างเป็นผลึกและส่วนอะมิโลสจะอยู่ในส่วนของอสัณฐาน ซึ่งปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.6 ลักษณะของเม็ดแป้งแต่ละชนิด<sup>(10)</sup>

	แป้งมันฝรั่ง	แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	แป้งมัน สำปะหลัง	แป้งข้าวโพด ข้างเหนียว
แหล่งแป้ง	ส่วนหัว	เมล็ดธัญพืช	เมล็ดธัญพืช	ส่วนราก	เมล็ดธัญพืช
เส้นผ่านศูนย์กลาง( $\mu\text{m}$ )	5-100	2-30	1-45	4-35	2-30
เส้นผ่านศูนย์กลาง( $\mu\text{m}$ ) เฉลี่ยโดยจำนวน	27	10	8	15	10
เส้นผ่านศูนย์กลาง( $\mu\text{m}$ ) เฉลี่ยโดยน้ำหนัก	40	15	25	25	15
จำนวนเม็ดแป้ง ( $\times 10^6$ ) ต่อแป้ง 1 กรัม	60	1300	2600	500	1300
โมเลกุลของแป้ง ( $\times 10^{12}$ ) ต่อเม็ดแป้ง 1 หน่วย	50	10	5	4	0.01
Specific area ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	100	200	500	200	300

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ<sup>(10)</sup>

แหล่งแป้ง	ขนาด (ไมครอน)	รูปร่าง
ข้าวสาลี	2-35	กลม ค่อนข้างรี
ข้าวโพด	5-25	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม รูปร่างคล้ายแท่ง
ข้าวเจ้า	3-5	แบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวบาร์เลย์	2-35	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม
ข้าวฟ่าง	15-35	กลม คล้ายไข่
ข้าวโอต	5-8	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม
ข้าวไรน์	10-50	กลม ค่อนข้างรี
ลูกเดือย	8-20	กลมแบนมีหลายเหลี่ยม
triticale	5-35	กลม ค่อนข้างรี
มันฝรั่ง	15-121	กลม รูปไข่มีวงคล้ายเปลือกหอย
มันสำปะหลัง	5-35	กลม คล้ายไข่ที่มีรอยตัด
ท้าวยายม่อม	13-70	รูปไข่
สาคุ	15-65	รูปไข่

จากการศึกษาโครงสร้างของเม็ดแป้งพบว่ารูปร่างพื้นผิวแป้งที่สามารถให้น้ำและโมเลกุลเล็ก ๆ ผ่านได้ เป็นส่วนอสังฐานที่แทรกเข้าไปภายในเม็ดแป้ง เกิดเป็น gel phase อยู่ระหว่างช่องส่วนผลึกที่ขนานกัน โมเลกุลขนาดไม่เกิน 1,000 ดาลตันสามารถผ่านได้จาก transmission electron microscopy (TEM) พบว่าช่องเปิดพบบนพื้นผิวเม็ดแป้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-0.3  $\mu\text{m}$  มีช่องภายในขนาด 0.07-0.1  $\mu\text{m}$

ตารางที่ 2.8 ปริมาณผลึกและโครงสร้างของแป้งแต่ละชนิด<sup>(10)</sup>

ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก(%)	อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชัน(%) <sup>1)</sup>	ปริมาณอะมิโลส(%)
โครงสร้าง A			
ข้าวโอต	33	60.7	23
ข้าวไรน์	34	61.3	26
ข้าวสาลี	36	63.5	23
ข้าวเหนียว	37	64.5	-
ข้าวฟ่าง	37	72.2	25
ข้าวเจ้า	38	70.0	17
ข้าวโพด	40	71.3	27
waxy maize	40	72.7	0
dasheen	45	79.4	16
nageli amyloextrin	48	88.4	-
โครงสร้าง B			
amylomaize	15-22	86	55-75
สาकु	26	70.5	28
มันฝรั่ง	28	67.3	22
โครงสร้าง C			
มันเทศ	38	70.0	20
horse chestnut	37	69.0	25
มันสำปะหลัง	38	66.0	18

โครงสร้าง A : แป้งจากธัญพืชเรียงตัวหนาแน่นมาก

โครงสร้าง B : พืชหัว เรียงตัวกันหลวมๆ

โครงสร้าง C : พืชตระกูลถั่ว โครงสร้าง A และ B ปนกันไป

<sup>1)</sup> จุดกึ่งกลางในช่วงการเกิดเจลาตินในเซชัน



## 2.5 การเลือกวัสดุยางมาใช้งาน<sup>(11)</sup>

ปกติยางส่วนใหญ่มักนำมาทำเป็นสายยาง (hoses) และยางกันรั่วซึม (seals) ซึ่งมักจะต้องสัมผัสกับตัวกลางมากมายหลายชนิดเช่น

- น้ำมันหล่อลื่น สารหล่อลื่น น้ำมันสังเคราะห์ น้ำมันธรรมชาติ และปิโตรเลียม
- แก๊สโซลีน แก๊สโซฮอล ดีเซล
- สารให้ความเย็น เช่น คลอโรฟลูออโรไฮโดรคาร์บอน
- ตัวทำละลาย เช่น อะซิฟาทิก อะโรมาติก คลอริเนตไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ เอสเทอร์
- น้ำ สารละลายน้ำ และไอน้ำ
- กรดอินทรีย์ กรดอนินทรีย์ และเบส
- ก๊าซคลอรีน ก๊าซไฮโดรคลอริก ก๊าซไนตริก
- น้ำมันที่ป้องกันการกัดกร่อน
- โลหะ พลาสติก แก้ว

สิ่งที่ควรพิจารณาเมื่อต้องการเลือกใช้วัสดุยางคือ ความต้านทานต่อตัวกลางทั้งหมดที่ยางจะต้องสัมผัสด้วยในอุณหภูมิสูงสุดที่นำมาใช้งานเช่น น้ำมัน, any grease, อากาศ หากมีความรู้ น้อยในเรื่องการผสมเข้ากันของยางและตัวกลาง อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการใช้งานได้ ซึ่งองค์ประกอบต่างๆของสารประกอบยางสามารถออกแบบใช้เหมาะสมกับกับกาใช้งานที่ต้องสัมผัสกับตัวกลางได้

### 2.5.1 ผลกระทบของของเหลวที่มีต่ออย่างทางด้านเคมีและด้านกายภาพ

#### 1) ผลกระทบของของเหลวที่มีต่ออย่างทางด้านเคมี

ของเหลวบางชนิดและสารเติมแต่งที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับยางที่อุณหภูมิที่เหมาะสมอาจทำให้เกิด crosslinking หรือ scission ของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ ซึ่งมักเห็นได้ชัดเจนของผลที่เกิดขึ้นในบรรยากาศที่มีออกซิเจน หรืออากาศ

ปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพของยางได้เช่น ทำให้สูญเสียความยืดหยุ่นกลายเป็นแข็ง เปราะ หรือไม่ก็อ่อน เหนียว

#### 2) ผลกระทบของของเหลวที่มีต่ออย่างทางด้านกายภาพ

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยางเกิดได้ 2 ลักษณะคือ

- 1) การดูดซับ (absorption) ของของเหลว
- 2) การถูกสกัดโดยการละลาย เช่น พวก plasticizer, antioxidants ออกจากยาง ทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง

- เมื่อเกิดการดูดซับมากกว่าเกิดการถูกสกัดออกจะทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเกิดการพองตัว (swelling) ของยาง

- เมื่อเกิดการถูกสกัดออกมากกว่าเกิดการดูดซับจะทำให้ปริมาตรลดลงเกิดการหดตัวลง (shrinkage) ของยาง

การพองตัวจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อแช่ในของเหลวจนกระทั่งไม่มีการดูดซับ ซึ่งปริมาตรที่ขยายจะคงที่ เป็นเวลาที่ถึง equilibrium จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ รูปร่าง และความหนา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาตรทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยางคือ tensile strength, hardness modulus และ elongation

การพองตัวจะทำให้ผลเช่นเดียวกับการเติม plasticizer ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เพราะจะไปลด hardness, modulus และ tensile strength

การหดตัวปกติจะเกิดความยืดหยุ่นลดลงเพราะจะมีค่า hardness, modulus และ tensile strength เพิ่มขึ้น

- การเพิ่มขึ้นของปริมาตร 25 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำเป็น static seals ได้

- การเพิ่มขึ้นของปริมาตร 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำเป็น dynamic seals ได้

เมื่อเกิดการหดตัวของยางจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำ seal เพราะอาจทำให้เกิดการรั่วและที่สำคัญควรทราบชนิดของของเหลวด้วยถ้าเป็นของเหลวที่ระเหยไม่ได้เช่น mineral oil อาจทำให้เกิดการพองตัวของยางได้อย่างถาวร แต่ถ้าเป็นของเหลวที่ระเหยได้เช่น gasoline, gasohols สามารถเกิดการหดตัวของยางได้เมื่อทำการระเหยให้แห้ง

วิธีที่ใช้เลือกใช้อย่างให้เหมาะสมกับการใช้กับของเหลวโดยการทดสอบโดยการแช่ภายใต้สภาวะที่ควบคุมไว้ และวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร สมบัติเชิงกลเช่น tensile strength hardness และ elongation ของชิ้นทดสอบหลังการแช่ เพื่อสังเกตความต้านทานต่อของเหลว ซึ่งผลของการทดสอบจะชี้ให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางอยู่ในข้อจำกัดที่ยอมรับได้หรือไม่

อย่างไรก็ตามก็มีวิธีง่าย ๆ ทั่วไปที่พอจะบอกให้ทราบถึงความเหมาะสมของยางต่อของเหลวซึ่งอาศัยหลักคือ

- the rule of thumb "like dissolves like"
- the solubility parameter
- aniline point
- the Elastomer Compatibility Index (ECI)

### 2.5.2 Like Dissolves Like<sup>(11),(12)</sup>

ตัวทำละลายมีขั้ว (Polar solvent) จะชอบละลายพอลิเมอร์มีขั้วและตัวทำละลายไม่มีขั้ว (non-polar solvent) จะชอบละลายพอลิเมอร์ไม่มีขั้ว ซึ่งความเหมือนกับทางเคมีระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลายสามารถแสดงถึงการละลายได้พอสมควร ยกตัวอย่างเช่น เบนซินจะละลายได้ใน mineral oil เพราะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเหมือนกัน แต่น้ำไม่ละลายใน mineral oil เพราะโครงสร้างทางเคมีต่างกัน

ซึ่ง like dissolves like จะใช้ได้กับ linear polymer เช่น plastics, thermoplastic elastomers, nonvulcanize rubber compound ซึ่งถ้าเป็น elastomers ที่มี network structure จะไม่ละลายแต่จะพองตัวขึ้น เช่น EPDE elastomers ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์จะพองตัวในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนเช่น mineral oil และ fuels เช่นเดียวกับ silicone elastomers พองตัวใน silicone oil และ fluoroelastomer พองตัวใน fluorinated hydrocarbon fluids ดังนั้นสิ่งสำคัญที่เราต้องทราบคือ ธรรมชาติของยางและของเหลวทางเคมีนั่นเองจะช่วยแนะนำความเหมาะสมของยางและของเหลวโดยไม่ต้องทำการแช่

### 2.5.3 Solubility Parameter<sup>(12),(13),(15)</sup>

พารามิเตอร์การละลาย (Solubility Parameter) เป็นวิธีง่าย ๆ ของการทำนายสมบัติแรงดึงดูดของวัตถุที่เราทราบสมบัติขององค์ประกอบของวัตถุนั้นๆ โดยเฉพาะพอลิเมอร์ ซึ่งจะมีประโยชน์ในการทำนายการพองตัว (swelling) ของยางวัลคาไนซ์ในตัวทำละลาย

การละลายจะเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกละลายเข้ากันได้ (compacible) และอยู่ร่วมกับ (co-exist) โดยไม่มีแนวโน้มที่จะแยกออกจากกัน อัตราการละลายขึ้นกับหลายแฟกเตอร์ ได้แก่ ขนาดโมเลกุลของตัวทำละลายและอุณหภูมิ เป็นต้น

โมเลกุลต่างชนิดกันจะอยู่ด้วยกันได้ เมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างกันมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน

การวัดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เหมาะสมจะอาศัย CED (cohesive energy density) ซึ่งเป็นพลังงานที่ทำให้ของเหลวปริมาตร 1 โมลกลายเป็นไอ (energy of vaporization per molar volume)

$$CED = \frac{\Delta E_v}{V} = \frac{\Delta H_v - RT}{M/D}$$

โดยที่

$$\Delta E_v = \text{พลังงานที่ใช้ในการระเหย}$$

$$\Delta H_v = \text{ความร้อนของการระเหย}$$

R = ค่าคงที่ของก๊าซ

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

V = ปริมาตรโดยโมลของของเหลว

M = น้ำหนักโมเลกุล

D = ความหนาแน่น

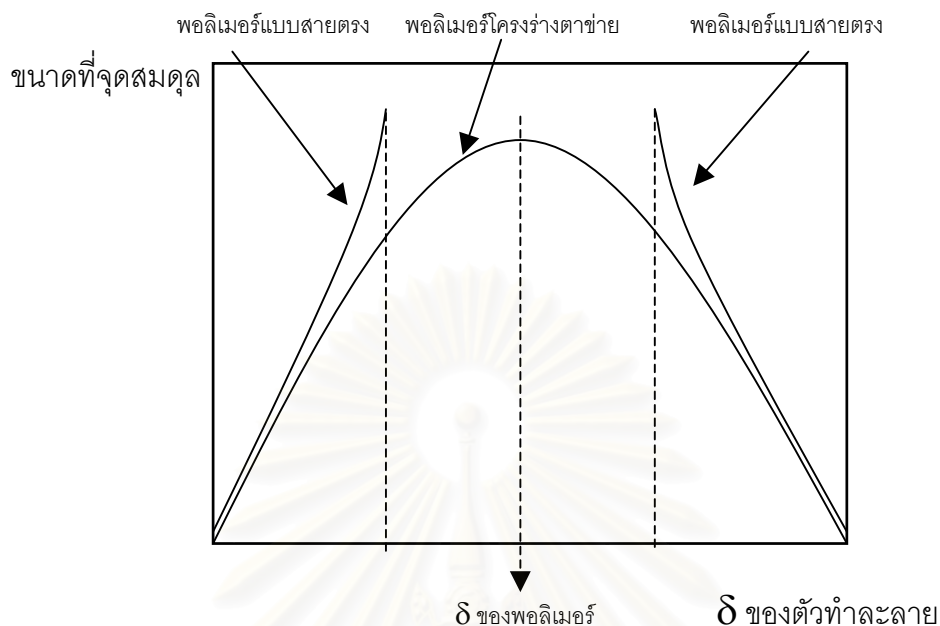
โดยทั่วไป CED มีหน่วยเป็น  $\text{cal/cm}^3$  ถ้าเป็นหน่วยระบบเอสไอ จะมีหน่วยเป็นเมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถหาค่าพารามิเตอร์การละลายของสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว โดยการคำนวณจากสมการของฮิลเดอบรอนด์นั่นคือ รากที่สองของ CED คือพารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter,  $\delta$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็น  $(\text{cal/cm}^3)^{1/2}$  หรือ  $\text{MPa}^{1/2}$

นอกจากจะหาค่าพารามิเตอร์การละลายของสารอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วจากค่า  $\Delta H_v$  แล้วยังสามารถหาได้จากค่าคงที่ของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (แสดงค่าไว้ในตารางที่ 2.11) โดยอาศัยสมการ

$$\delta = \frac{\rho \Sigma G}{M}$$

G คือ ค่าคงที่ของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลตามโครงสร้างทางเคมีของสาร มีหน่วยเป็นฮิลเดอบรอนด์ (Hilderbrand unit, H) ส่วน M คือน้ำหนักโมเลกุล

การหาค่าพารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายที่มีโมเลกุลเล็กทำได้โดยง่ายไม่ว่าจะหาค่าพลังงานโคฮีซีฟ หรือจากการคำนวณตามโครงสร้างทางเคมีโดยอาศัยค่าคงที่ G ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่สำหรับพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่จะหาค่าพารามิเตอร์การละลายด้วยวิธีเดียวกันนั้นไม่ได้จึงต้องอาศัยการทดลองเข้ามาช่วย โดยการใช้ตัวทำละลายที่ค่าพารามิเตอร์การละลายกับพอลิเมอร์ สำหรับพอลิเมอร์ที่เป็นโครงสร้างตาข่ายจะไม่ละลายกับตัวทำละลายกลายเป็นสารละลายแต่จะเกิดการพองตัวสร้างกราฟความสัมพันธ์ของขนาดของการพองตัวของพอลิเมอร์ที่สภาวะสมดุลกับค่าพารามิเตอร์การละลายใช้ค่าสูงสุดของกราฟแทนค่าพารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์ หรืออาจรายงานค่าพารามิเตอร์การละลายเป็นช่วงดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.7



**รูปที่ 2.7** ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดที่จุดสมดุลของพอลิเมอร์กับค่าพารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายต่างๆ<sup>(13)</sup>

ได้แสดงค่าพารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์ในตารางที่ 2.12 ในกรณีค่าพารามิเตอร์การละลายของระบบที่มีขั้วและมีพันธะไฮโดรเจน Hansen ได้สมมติค่าพารามิเตอร์ dispersion, polar และ hydrogen-bonding ขึ้นมา และนำมาแทนค่าในสมการนี้

$$\delta_t^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2$$

โดย  $\delta_t$  คือค่าพารามิเตอร์การละลายทั้งหมดของ Hensen

$\delta_d$  คือเทอมของ dispersive

$\delta_p$  คือเทอมของ polar

$\delta_h$  คือเทอมของ hydrogen-bonding

ซึ่งค่าของพารามิเตอร์การละลายของ Hensen ก็ควรจะมีค่าเท่ากับของ Hildebrand

ค่าพารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายไม่มีขั้วจะแสดงในตารางที่ 2.9 แต่ตัวทำละลายที่มีขั้วนั้นต้องพิจารณา dipole-dipole interactions ในตัวทำละลายมีขั้วด้วยซึ่งแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.9 พารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายไม่มีขั้ว<sup>(14)</sup>

ตัวทำละลาย	$\delta$ (H)*	ตัวทำละลาย	$\delta$ (H)*
Benzene	9.2	Benzene, nitro	10.0
Benzene, chloro	9.5	Benzene, propyl	8.6
Biphenyl, perchloro	8.8	Hexane-1	7.4
1,3-Butadiene, 2-methyl (isoprene)	7.4	Methane	5.4
Butane	6.8	Methane, bromo	9.6
Cyclohexane	8.2	Heptane	7.4
Cyclohexane, methyl	7.8	Hexane	7.3
Octane	7.6	Pentane	7.0
Toluene	8.9	Xylene, m-	8.8

ตารางที่ 2.10 พารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายมีขั้ว<sup>(14)</sup>

ตัวทำละลาย	$\delta$ (H)*	ตัวทำละลาย	$\delta$ (H)*
Furan, tetrahydro	9.1	1,3-Hexanediol-2-ethyl	23.4
1,2-propanediol (pro- pylene glycol)	10.8	2-Propanol (iso-propyl alcohol)	10.0

ตารางที่ 2.11 ค่าคงที่ของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล( ที่ 298 องศาเซลวิน )<sup>(14)</sup>

หมู่ฟังก์ชัน	ค่าคงที่ G	หมู่ฟังก์ชัน	ค่าคงที่ G
-CH <sub>3</sub>	214	CO ketone	275
-CH <sub>2</sub> -	133	COO ester	310
-CH<	28	CN	410
>CH<	93	Cl( mean )	260
CH <sub>2</sub> =	190	Cl( single )	270
-CH= double bonded	111	Cl twined as in >CCl <sub>2</sub>	260
>C=	19	Cl triple as in – CCl	250
CH ≡ C-	285	Br single	340
-C≡C-	222	I single	425
Phenyl	735	Cf <sub>2</sub>	150
Phenylene	658	Cf <sub>3</sub>	274
Naphthyl	1146	S sulfides	225
Ring, 5 membered	105-115	SH thiols	315
Ring, 6 membered	95-105	ONO <sub>2</sub> nitrates	440
Conjugation	20-30	NO <sub>2</sub> (aliphatic nitro-	440
H( variable )	80-100	compounds)	
O ether	70	PO <sub>4</sub> (organic phosphate)	500
		Si (in silicones)	38

H\* = Hiderbrand unit

$$= ( \text{cal/cm}^3 )^{1/2}$$

ศูนย์วิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.12 พารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์<sup>(15)</sup>

Polymer	$\delta$ (MPa <sup>1/2</sup> )	T (°C)
Cellulose	32.02	
Epoxy resin	22.3	
Natural rubber	16.2	
	17.09	
Poly(butadiene-co-acrylonitrile		
BUNA N(72/25)	18.93	25
(61/39)	20.5	75
Poly(chloroprene)	18.42	25
	19.19	
	17.60	
Poly(styrene)	18.72	35
Poly(propylene)	18.80	25
Poly(vinyl alcohol)	25.78	
Poly(vinyl acetate)	19.62	25
Poly(vinyl chloride)	19.28	
Poly(methylene)	14.30	20
Poly(butadiene)	16.20	75
	17.15	

ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์จะมีการเชื่อมโยงโมเลกุลด้วยพันธะโควาเลนต์ รวมทั้งพวกเทอร์โมเซตพลาสติกด้วย แต่ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ หากไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีเสียก่อน แต่อาจเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายที่มีพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกัน และหากมีการเชื่อมโยงโมเลกุลมากๆ การบวมตัวจะลดน้อยลง

เมื่อพอลิเมอร์ถูกใส่ลงในตัวทำละลายการละลายพอลิเมอร์จะเกิดเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการบวมตัวอย่างช้าๆ เรียกว่า solvation ซึ่งโมเลกุลของตัวทำละลายจะถูกดูดซับเข้าไปอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์อย่างช้าๆ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาด เนื่องจากการขยายตัว



ขั้นตอนที่ 2 เมื่อพอลิเมอร์เกิดการบวมตัวจนถึงจุดๆหนึ่งโมเลกุลของพอลิเมอร์จะเกิดการแยกออกจากกัน ได้เป็นสารละลายพอลิเมอร์ โดยไม่มีการแตกหักของพันธะปฏิกิริยาในการละลายนี้

ดังนั้น พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกสูงย่อมเกิดการละลายยาก เนื่องจากโมเลกุลของตัวทำละลายจะแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างผลึกที่หนาแน่นและเสถียรได้ยาก นอกจากนี้โครงสร้างที่เป็นร่างแหจะไม่เกิดการละลายในขั้นตอนที่ 2 เพียงแต่จะบวมตัวเท่านั้น แต่ก็เป็นไปได้ในบางกรณีที่จะหาตัวทำละลายที่แข็งแรงพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลของผลึกและละลายพอลิเมอร์ได้ การให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ไปถึงจุดหลอมเหลวของผลึกก็จะทำให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมได้

#### 2.5.4 Aniline Point<sup>(10)</sup>

Aniline เป็น aromatic amine ( $C_6H_5NH_2$ ) เป็นของเหลวมีพิษ มีจุดเดือดเท่ากับ  $184\text{ }^{\circ}C$  และมีกลิ่น

Aniline point ของของเหลวคือ อุณหภูมิต่ำสุดของ degree centigrade ที่ทำให้ของเหลวนั้นผสมเข้ากัน aniline ที่ปริมาตรเดียวกัน

วิธีหา aniline point ของ น้ำมันปิโตรเลียม และ ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน ใน ISO2977 คือเติมปริมาตรจำเพาะของ aniline และ liquid sample เท่ากันในหลอดทดลอง และ mixed mechanically ซึ่งอุณหภูมิจะถูกควบคุมให้สูงขึ้นจนกระทั่ง 2 phase ผสมกันได้ จากนั้นทำการลดอุณหภูมิโดยควบคุมอัตราของอุณหภูมิไว้ด้วยซึ่งจะทำการบันทึกอุณหภูมิที่ 2 phase แยกออกจากกันเป็น aniline point

ซึ่งเป็นการวัดค่าการละลายของของเหลวใน aniline เช่น Aromatic hydrocarbon จะละลายดีใน aniline และแสดงได้โดยที่จะมีค่า aniline point ต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ paraffin hydrocarbon จะละลายใน aniline ได้น้อยที่สุดนั่นคือมี aniline point สูงสุด

Aniline point สามารถบอกค่าประมาณปริมาณ aromatic ใน mineral oils ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลของการพองตัวของยางในน้ำมัน ซึ่ง aniline point ของ น้ำมันลดลง แสดงว่ามี aromatic มาก ผลของการพองตัวของ elastomers ก็สามารถบอกได้ ซึ่งค่า aniline point ของน้ำมันจะให้ผลเหมือนกับ elastomers คือจาก ASTM reference oils จะบอกช่วง aniline point ที่พบในน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมัน ASTM เบอร์ 1 มี aniline point สูง เท่ากับ  $124\text{ }^{\circ}C$  เป็นผลให้เกิดการพองตัว หรือ การหดตัว ได้ต่ำ

น้ำมัน ASTM เบอร์ 2 มี aniline point ปานกลาง เท่ากับ  $93\text{ }^{\circ}C$  เกิดการพองตัว ปานกลาง

น้ำมัน ASTM เบอร์ 3 มี aniline point ต่ำ เท่ากับ  $70^{\circ}\text{C}$  มีวงอะโรมาติกมากที่สุดเกิดการพองตัวของวัสดุยางได้ดี

ซึ่งน้ำมันทางการค้าชนิดอื่นๆ ที่มี aniline point เหมือนกันจะให้ผลต่อสารประกอบยางที่เหมือนกันซึ่งจะสอดคล้องกับ ASTM oil

วิธีนี้ถูกใช้มาหลายปีแล้ว ซึ่งสามารถทำนายผลของ mineral oils ต่อ elastomers แต่วิธีนี้จะน่าเชื่อถือได้กับน้ำมันที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง พบว่าน้ำมันต่างชนิดกันเมื่อมี aniline point เหมือนกันก็สามารถให้กำลังการพองตัว (swelling power) แตกต่างกันได้เพราะมีการเติมสารเติมแต่งที่ต่างชนิดกันและปริมาณแตกต่างกัน

### 2.5.5 Elastomer Compatibility Index (ECI)<sup>(11)</sup>

การใช้ standard test elastomer บอกให้ทราบผลทางด้านเคมีและกายภาพของ petroleum based และ fire-resistant fluids วัสดุยางสินค้าที่จะมาใช้งานจริง เทียบกับ standard elastomer

Standard elastomers หรือ test elastomers คือยางวัลคาไนซ์ ซึ่งมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันไปในยางแต่ละชนิด ถูกใช้สำหรับทำนายผลของ fluid ต่อยางที่ใช้งานที่มีองค์ประกอบเหมือนกัน ยางนี้จะถูกผลิตโดยการเติมสารเติมแต่งที่ไม่ถูกสกัด (attack) มากโดย fluid ซึ่งจะต้องมีองค์ประกอบให้น้อยที่สุด โดย plasticizers และ processing aids ต้องไม่ทำให้เกิด shrinkage

Test elastomer ต้องไม่สับสนกับ commercial elastomer ที่ใช้งานจริง ซึ่งองค์ประกอบจะไม่บอกมาโดยโรงงานผลิต โดยทั่วไป commercial elastomer จะมีองค์ประกอบมากกว่า test elastomer ซึ่งจะมีการเติมลงไปที่ต้องที่ใช้งาน

โดยทั่วไปมีสูตรที่ใช้ผลิต standard elastomer ใน ISO 6072 ชื่อว่า Hydraulic fluid power – compaticity between elastomer materials and fluid มี 3 standard elastomers

1. NBR1, base on acrylonitrile rubber
2. FPM1, base on fluorocarbon rubber
3. EPDM1, base on ethylene – propylene – diene rubber

ดูการเปลี่ยนแปลงของ standard elastomer ไปแต่ใน fluid ที่สภาวะใดๆ ของ ECI คือ

- a) The test elastomer used
- b) Percentage change in volume
- c) The change in hardness expressed in IRHD (microtest)
- d) Percentage change in tensile strength
- e) Percentage change in elongation at break

## 2.6 ผลของตัวทำละลายอินทรีย์ต่ออย่าง<sup>(11)</sup>

ตัวทำละลายอินทรีย์ คือของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แบ่งเป็น

- อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เพนเทน, เฮกเซน, อีเทอร์
- อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซิน, โทลูอิน, ไซลีน
- คลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน เช่น คลอโรฟอร์ม, คาร์บอนเตตระคลอไรด์
- แอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล, เอทานอล, โพรพานอล, บิวทานอล
- อีเทอร์ เช่น ไดเอทิลอีเทอร์, ไดบิวทิลอีเทอร์
- คีโตน เช่น อะซีโตน, เมทิลเอทิลคีโตน
- เอสเตอร์ เช่น เอทิลอะซิเตท, บิวทิลอะซิเตท

Elastomers ที่มีขั้ว เช่น NBR, HNBR, ECO และ FPM จะพองตัวได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น คีโตน, เอสเทอร์ เพราะมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน

ถ้า Elastomers ไม่มีขั้ว เช่น IIR, EPDM แสดงจุดเด่นคือต้านทานการพองตัวในตัวทำละลายที่มีขั้วได้ เพราะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน

ตามทฤษฎีนี้ไม่สามารถใช้ได้ทุกกรณี เพราะการพองตัวของเหลวไม่ได้ขึ้นอยู่กับการมีหรือไม่มีหมู่ขั้วอย่างเดียว แต่ขึ้นกับขนาดโมเลกุลส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนในโมเลกุล

ในกรณีของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น อะซีโตนเอทิลอะซิเตท ซึ่งผลของการมีขั้วต่อการพองตัวของเหลวเป็นปัจจัยสำคัญ เพราะส่วนของไฮโดรคาร์บอนในโมเลกุลมีขนาดเล็ก ในกรณีของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเช่น น้ำมันเอสเทอร์ การพองตัวเนื่องจากผลของการมีขั้วจะถูกปกปิดจากผลของไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ของโมเลกุลต่อการพองตัวของยาง เช่น FPM elastomer จะพองตัวมากในเอทิลอะซิเตทซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่จะต้านทานการพองตัวในน้ำมันเอสเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ต่างจาก EPDM จะมีการต้านทานสูงในการพองตัวในเอทิลอะซิเตท แต่จะพองตัวในน้ำมันเอสเทอร์ ซึ่งการพองตัวในตัวทำละลายที่เป็นเอสเทอร์ เหมือนกัน แต่ต่างกันที่น้ำหนักโมเลกุล ซึ่งหมู่ขั้วในเอทิลอะซิเตทมีผลต่อการพองตัวมากที่สุดและถ้ามีการผสมของตัวทำละลายหลายชนิดซึ่งปริมาณและชนิดของตัวทำละลายก็มีผลต่างจากเดิมต่ออย่าง

เมื่อเลือกยางให้เหมาะสมกับตัวทำละลายอินทรีย์แล้ว อย่างไรก็ตามก็ต้องมีการทดสอบโดยการแช่ และถ้ามีการทำให้แห้งต้องไม่เกิดการถูกกัดโดยตัวทำละลาย

## 2.7 ผลของ Mineral Oils-based Fluids ต่อยาง<sup>(11)</sup>

mineral oil-based fluids เป็นน้ำมันที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง แต่จะมีพิษสูงและติดไฟได้ ย่อยสลายยาก ประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญๆ คือ

น้ำมันพาราฟิน ซึ่งประกอบด้วยพาราฟิน เป็นส่วนใหญ่

น้ำมันเนฟทีนิก ประกอบด้วย ไฮโดรคาร์บอน, อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเครื่องยนต์ หรือ น้ำมันเกียร์ ซึ่ง elastomer ที่มีขั้ว เช่น NBR, HMBR, CR CSM, ECO, CO AEM, ACM, FPM, FMQ, AU, EU, YBPO เป็นต้น จะต้านทานการพองตัวใน mineral oil ที่อุณหภูมิต่างกัน นอกจากผลของอุณหภูมิแล้วยังขึ้นกับ

- ปริมาณอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำมัน
- ปริมาณสารเติมแต่งในสารประกอบยาง
- ความเข้มข้นและโครงสร้างเคมีของสารเติมแต่ง

CR ต้านทาน mineral oil ที่มีน้ำมันพาราฟินได้บ้าง(ไม่นิยมใช้) แต่จะพองตัวและอ่อนตัวในน้ำมันเนฟทีนิก

## 2.8 การแพร่ของของเหลวในยาง<sup>(16),(17)</sup>

การแพร่เป็นกระบวนการที่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่จากส่วนที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังที่ความเข้มข้นต่ำกว่า เหมือนดังเช่น การถ่ายโอนของเหลวเข้าไปในยาง เมื่อนำยางไปแช่ในของเหลวที่พื้นผิวของยางจะดูดซับ (absorb) ของเหลวจนถึงสภาวะสมดุล การกระจายตัวของของเหลวในช่วงแรกยังไม่สม่ำเสมอโดยของเหลวส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนบริเวณที่อยู่ใกล้ผิวยาง และเมื่อเวลาผ่านไปของเหลวก็จะแทรกเข้าไปในช่องว่างของยาง จนกระทั่งของเหลวอยู่โดยทั่วทั้งหมดยางอย่างสม่ำเสมอซึ่งเป็นที่สภาวะสมดุล

มีตัวอย่างมากมายที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการที่โมเลกุลเล็กๆแพร่เข้าและออกผ่านยางทั้งในระหว่างการผลิตและการใช้งาน

ซึ่งในการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายอาศัยการแพร่ของตัวทำละลายเข้าไปในพอลิเมอร์จนกระทั่งบวมตัว และแยกออกจากกันในที่สุด เช่นการเกิดเจลของ PVC ด้วยพลาสติกไซเซออร์จะเกิดโดยการแพร่ของ plasticizer เข้าไปในพอลิเมอร์ และสารหล่อลื่น (lubricant) เป็นสารเติมแต่งในพลาสติกหลายชนิดจะถูกเลือกใช้เนื่องจากไม่รวมตัวกับพอลิเมอร์เพราะสารหล่อลื่นจะซึมหรือแพร่ออกทำหน้าที่หล่อลื่นระหว่างผิวพลาสติกและผิวโลหะเช่น ผิวแม่แบบ ผิวลูกกลิ้ง จากการแพร่ในบางครั้งก็ต้องการให้เกิดมาก ในบางครั้งก็ไม่ต้องการ

การเคลื่อนที่ของของเหลวเชื่อว่าเป็นไปตามกฎการแพร่และความเร็วของการเคลื่อนที่ของของเหลวนี้จะถูกแสดงออกมาในค่าสัมประสิทธิ์การแพร่(Diffusion coefficient) ของของเหลว

ในยาง ส่วนใหญ่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนและน้ำมัน ซึ่งถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงไม่ได้หมายความว่ามีความเร็วของเหลวจำนวนมากที่เกิดการถ่ายโอนเพราะระยะช่วงหลังจะถูกควบคุมโดย Permeability ซึ่งเกี่ยวข้องกับ diffusion coefficient และ solubility ของของเหลวในยาง

### 2.8.1 ทฤษฎีการแพร่

สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) ของของเหลวผ่านยางสามารถให้นิยามตาม กฎการแพร่ของฟิค (Fick's law) โดยสมการพื้นฐานของการแพร่ของฟิค ใน ค.ศ. 1855 มีลักษณะคล้ายกับการนำความร้อน (Heat conduction equation) ของ Fourier ได้ดังนี้

#### 1) กฎการแพร่ข้อที่ 1 ของฟิค

มีความสัมพันธ์เบื้องต้นอยู่ในรูปของฟลักซ์ (Flux) ซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวแทรกซึม ซึ่งจำกัดความไว้ว่าในระบบซึ่งอุณหภูมิและความดันคงที่ การแพร่ขององค์ประกอบ A ในทิศทาง z คือ

$$J_{A,Z} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad (1.1)$$

เมื่อ  $J_{A,Z}$  คือฟลักซ์เชิงโมลเทียบกับความเร็วเฉลี่ยเชิงโมล

ในที่นี้จะกำหนดฟลักซ์ไว้ 4 แบบดังนี้

$\bar{N}_A$  ฟลักซ์เชิงโมลเทียบกับฟิวดั้งเดิม

$\bar{n}_A$  ฟลักซ์เชิงมวลเทียบกับฟิวดั้งเดิม

$\bar{J}_A$  ฟลักซ์เชิงโมลเทียบกับฟิวดั้งเดิมที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยเชิงโมล

$\bar{j}_A$  ฟลักซ์เชิงมวลเทียบกับฟิวดั้งเดิมที่ด้วยความเร็วเฉลี่ยเชิงมวล

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์

$$\bar{N}_A = C_A \bar{V}_A \quad (1.2)$$

$$\bar{n}_A = \rho_A \bar{V}_A \quad (1.3)$$

$$\bar{J}_A = C_A (\bar{v}_A - \bar{V}) \quad (1.4)$$

$$\bar{j}_A = \rho_A (\bar{v}_A - \bar{V}) \quad (1.5)$$

$\frac{dC_A}{dz}$  คือผลต่างความเข้มข้นในทิศทาง Z และ

$D_{AB}$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) หรือสภาพการแพร่มวล

(mass diffusivity) ของ A ผ่านองค์ประกอบ B

Groot เสนอสมการ 1.6 เป็นกรณีทั่วไป ไม่จำกัดอุณหภูมิ และความดันคงที่

$$J_{A,Z} = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} \quad (1.6)$$

ถ้าอุณหภูมิ และความดันคงที่ สมการ (1.1) ก็คือสมการ (1.6) นั่นเอง  
จาก (1.4) และ (1.6) เมื่อเป็นระบบ 2 องค์ประกอบ

$$J_{A,Z} = C_A(V_{A,Z} - V_Z) = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz}$$

ดังนั้น

$$C_A V_{A,Z} = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + C_A V_Z \quad (1.7)$$

หาค่า  $V_Z$  ของระบบสององค์ประกอบ

$$V_Z = \frac{1}{C} (C_A V_{A,Z} + C_B V_{B,Z})$$

$$C_A V_Z = y_A (C_A V_{A,Z} + C_B V_{B,Z}) \quad (1.8)$$

แทน (1.8) ใน (1.7) ได้

$$C_A V_{A,Z} = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A (C_A V_{A,Z} + C_B V_{B,Z})$$

จากสมการ (1.2) สำหรับความเร็วในทิศทาง z แทนค่า  $C_A V_{A,Z}$  และ  $C_B V_{B,Z}$  เป็นปริมาณ  
ฟลักซ์ ดังนั้น

$$N_{A,Z} = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A (N_{A,Z} + N_{B,Z}) \quad (1.9)$$

เป็นในรูปเวกเตอร์คือ

$$\overline{N}_A = -CD_{AB} \nabla y_A + y_A (\overline{N}_A + \overline{N}_B) \quad (1.10)$$

สมการ (1.9), (1.10) อยู่ในรูปแบบเดียวกัน และมีชื่อเรียกว่า สมการของฟิค

สมการ (1.10) แสดงให้เห็นว่าฟลักซ์  $\bar{N}_A$  เป็นผลบวกของ 2 ปริมาณเวกเตอร์คือ

$-CD_{AB} \nabla y_A$  คือฟลักซ์เชิงโมล  $J_A$  เป็นฟลักซ์การแพร่ของ A อันเป็นผลมาจากผลต่างความเข้มข้นตามกฎข้อที่ 1 ของฟิค

$y_A(\bar{N}_A + \bar{N}_B) = C_A \bar{V}$  คือฟลักซ์เป็นผลมาจากองค์ประกอบ A ถูกพาไปเพราะการไหลของของไหล (bulk flow) เทอมนี้มีค่าเป็น 0 ได้ถ้า  $N_A = N_B$  หรือ  $\bar{V}$  เป็นศูนย์ หรือกรณีการแพร่ในของแข็ง การแพร่ในตัวกลางอยู่นิ่ง

ตัวอย่าง ถ้าหย่อนผงสีลงในทะเลสาบ ซึ่งเป็นตัวกลางอยู่นิ่งจะเกิดการแพร่ของสี (ในแนวรัศมี) เพราะมีผลต่อความเข้มข้น ค่าฟลักซ์จะประกอบด้วยเทอมแรกของสมการ (1.9) เท่านั้น

## 2) กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law of diffusion)

โดยมีข้อสมมติคือ ให้ความหนาแน่น  $\rho$  และสัมประสิทธิ์การแพร่  $D_{AB}$  คงที่ และไม่มีเทอมการผลิตหรือสูญเสีย A ในระบบ (ไม่มีปฏิกิริยา) เป็นการแพร่ของโมเลกุลในทิศทางเดียว

ของไหลไม่มีการเคลื่อนที่เช่น การแพร่ในของแข็ง การแพร่ในของเหลวซึ่งอยู่นิ่ง และการที่ฟลักซ์ของสององค์ประกอบเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน  $V = 0$  ดังนั้น กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคคือ สมการที่ (1.11)

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A \quad (1.11)$$

หรือ

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial Z^2} \quad (1.12)$$

ในกรณีไอและของเหลวกระทำกับพอลิเมอร์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของตัวถูกละลาย

ในสมการนี้บอกให้รู้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเมื่อเวลาผ่านไป ( $dc/dt$ ) จะได้ว่าในขั้นสุดท้ายของการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจะเกิดช้ามาก (เพราะความแตกต่างของความเข้มข้นน้อยลง จึงเกิดการแพร่ได้ช้า) นั่นคืออัตราการแพร่ลดลงขณะที่ความแตกต่างของความเข้มข้นต่ำลง เรียกว่า “ การแพร่ของโมเลกุลแบบไม่คงที่ ” (unsteady-state molecular diffusion) หมายถึงกระบวนการถ่ายเทมวลซึ่งความเข้มข้นที่จุดหนึ่งๆ เปลี่ยนไปกับเวลาเรียกว่ากระบวนการสภาวะไม่คงตัว หรือกระบวนการซึ่งขึ้นอยู่กัเวลา ความเข้มข้นไม่คงที่เนื่องจากฟลักซ์ไม่คงที่ กระบวนการประเภทนี้อาจพบได้ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการต่างๆ ไปก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัวหรือกระบวนการแบบกะ (batch)

โดยระบบของการแพร่ตามกฎของฟิคจะปฏิบัติที่ช่วงอุณหภูมิที่อยู่เหนืออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature) ของยาง

การแก้ปัญหาจากสมการการแพร่ใช้ได้กับทุกรูปร่างเช่น ทรงกระบอก ทรงกลม ทรงลูกบาศก์ แผ่นระนาบเรียบ ภายใต้สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขต ด้วยทั้งที่สัมประสิทธิ์การแพร่คงที่หรือเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้น ซึ่งการหาคำตอบเชิงวิเคราะห์ที่ได้โดยง่ายนั้นโดยการถ่ายเทมวลลงสู่ตัวกลางกึ่งอนันต์ (semi-infinite medium) ที่ความเข้มข้นที่พื้นผิวหนึ่งมีค่าคงที่ ซึ่งการใช้ชั้นทดสอบที่เหมาะสมคือ แผ่นระนาบเรียบ (plane sheet) ซึ่งพฤติกรรมการแพร่เหมือนกับว่าเป็นตัวกลางกึ่งอนันต์ ไม่มีผลกระทบจากขอบ

เวลาและระยะทางของการแพร่สู่ตัวกลางกึ่งอนันต์ ในการแก้สมการที่ 1.9 สภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตคือ

$$\begin{aligned} C_A &= C_{A0} & t &= 0 & \text{ทุกค่า } z \\ C_A &= C_{AS} & z &= 0 & \text{ทุกค่า } t \\ C_A &= C_{A0} & z &\rightarrow \infty & \text{ทุกค่า } t \end{aligned}$$

โดยการใช้ laplace transformation และวิธีการแยกตัวแปรคำตอบ คือ

$$\frac{C_{A,S} - C_A}{C_{A,S} - C_{A,0}} = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_{AB}t}}\right) \quad (1.13)$$

$$\operatorname{erf}\frac{z}{2\sqrt{D_{AB}t}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{2\sqrt{D_{AB}t}}} e^{-n^2} dn$$

$\operatorname{erf} z$  เป็น error function

เมื่อ  $M_t$  คือปริมาณของเหลวต่อหน่วยพื้นที่ตัดขวางของขอบเขตระหว่างพื้นผิวที่เวลา  $t$

$$M_t = 2(C_\infty - C_0) \left(\frac{Dt}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.14)$$

แสดงการแพร่ในแผ่นระนาบเรียบ (plane sheet) ในช่วงระยะเริ่มแรกที่เกิดใน semi-infinite medium ซึ่งสมการที่ใช้ก็คือ



$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{2}{l} \left( \frac{Dt}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.15)$$

เมื่อ  $M_\infty$  คือ ปริมาณที่ถูกดูดกลืนที่สภาวะสมดุล

l คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่นระนาบเรียบ

ซึ่ง diffusion coefficient, D จะหาได้จากความชันของกราฟระหว่าง  $M_t$  กับ  $t^{1/2}$  โดยใช้สมการที่ 1.15 เพื่อหาค่า D

โดยวิธีการทดลองหาค่า D มีหลายวิธี แต่มีที่สำคัญอยู่ 2 วิธี ซึ่งปริมาณของของเหลวทั้งหมดที่ถูกดูดซับ จะบันทึกในช่วงเวลาต่างๆ

วิธีที่ 1 วัดความเข้มข้นจาก refractive index ที่เปลี่ยนแปลงจะใช้ได้กับยางที่เป็น optically transparent ซึ่งความเข้มข้นของของเหลวที่เฉลี่ยแต่ละชั้นจะวัดเป็นช่วงเวลา โดยแบ่งเป็นชั้นๆ ซึ่งหาค่า D ตามสมการ 1.13

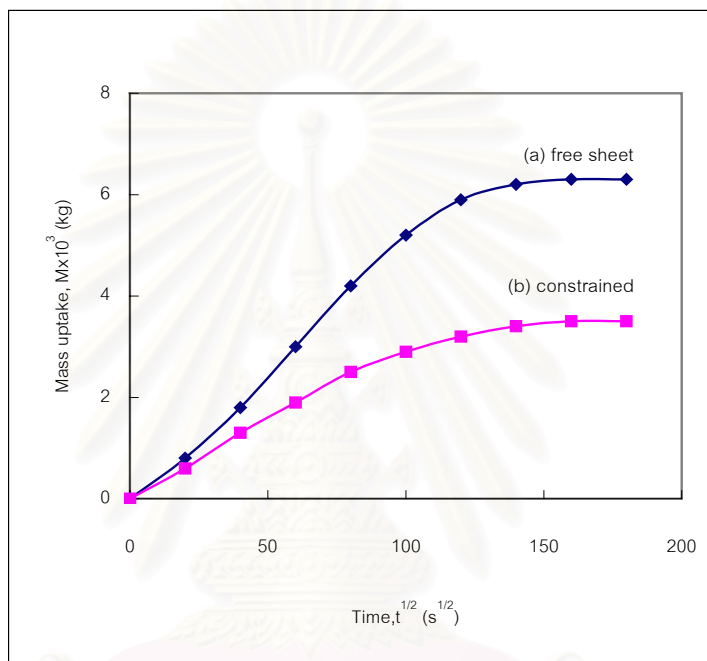
วิธีที่ 2 วัดปริมาณของเหลวที่ถูกดูดซับโดยการชั่งน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่ชั่งได้จะนำมาเขียนกราฟระหว่างปริมาณของของเหลวที่ถูกดูดซับกับเวลาหรือ (เวลา)<sup>1/2</sup> ซึ่งการหาค่า D ได้จากสมการที่ 1.14 หรือ 1.15 จะขึ้นอยู่กับข้อมูลช่วงแรกๆ

## 2.8.2 การแพร่ของของเหลวไฮโดรคาร์บอนและน้ำมันในยาง<sup>(17)</sup>

ยางคงรูปแผ่นในของเหลวยางจะดูดกลืนของเหลวและเกิดการพองตัว จากรูปที่ 2.8 (a) free sheet จะเป็นรูปตัว S (sigmoidal) โดยเส้นโค้งที่เพิ่มขึ้นในตอนต้นของการพองตัวซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ ซึ่งมี 2 สาเหตุคือ พื้นผิวของแผ่นยางเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของของเหลวที่ผิวของแผ่นยางเพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดผลกระทบทั้ง 2 นั้นคือ การพองตัวของยางที่สภาวะสมดุลนั้นขึ้นอยู่กับแรงกดอัดบนยาง (the stresses exerted on the rubber) โดยช่วงแรกของการดูดกลืนที่ผิวของยางขึ้นอยู่กับความทนต่อการกดอัด (compressive stress exerted) ของยางที่แห่งนี้ จะไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างของผิว (restricting the lateral movement of surface) แต่ตัวกลางที่ทำให้เกิดการพองที่ดีเช่น สารไฮโดรคาร์บอนและน้ำมัน นี้เองทำให้เกิดแรงกดอัดทางด้านข้าง (lateral compressive stress) ซึ่งมากพอที่จะทำให้พื้นผิวเกิดรอยย่นเนื่องจากความไม่เสถียร ขณะที่ของเหลวแทรกเข้าไปในช่องว่างของยางแห้ง (the bulk the proportion of dry rubber) ลดลงนั้นไม่นานนักยางก็ไม่สามารถต้านทานแรงการบวมตัว (swelling force) ดังนั้นทำให้ผิวของยางเกิดการตั้งขยายแพร่ออก ความเข้มข้นของของเหลวที่ผิวยางจะเพิ่มขึ้นจากเริ่มต้น เมื่อผิวถูกป้องกันจากการเกิด lateral movement จนกระทั่งถึงสมดุล

การเบี่ยงเบนจากเส้นตรงเนื่องจากกลไกที่ได้มาจากการป้องกันการขยายตัวออกทางด้านข้างของแผ่นยางตลอดการทดลอง

ในกรณี รูปที่ 2.8(b) constrained แผ่นยางสามารถพองตัวในทิศของความหนา (thickness direction only) อย่างเดียวเพราะฉะนั้นความเข้มข้นที่ผิว และพื้นผิวของยางก็จะคงที่ตลอดการทดลอง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยางมีพันธะที่รักษาสภาพจากแรงกดอัดได้ในช่วงแรกๆ และทำให้สภาวะขอบเขตยังคงรักษาความคงที่ตลอดการทดลองซึ่งเป็นไปตามกฎการแพร่



รูปที่ 2.8 มวลของ decane ที่ถูกดูดซับ(M) โดยแผ่นยางธรรมชาติที่เวลาต่างๆ(t) <sup>(17)</sup>

#### ผลของธรรมชาติของของเหลว (Effect of nature of liquid)

การทดลองการแพร่ของยางธรรมชาติในของเหลวชนิดต่างๆ แสดงผลตามตารางที่ 2.13 โดยให้สัดส่วนโดยปริมาตรที่สภาวะสมดุลของ free sheet คือ  $v$  และ constrained คือ  $v_c$  และให้  $x$  คือ rubber-liquid interaction parameter จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่,  $D$  จะเกี่ยวข้องกับ ความหนืด (viscosity) ของของเหลว และได้แสดงดังรูปที่ 2.9 จากทฤษฎีของ Einstein และ Eyring ซึ่งให้เห็นว่า  $D$  เป็นส่วนกลับของความหนืดของยางและรัศมีการแพร่ของโมเลกุล (สมมติว่าเป็นวงกลม) และจากความหนืดของของเหลวมีผลต่อรัศมีการแพร่ของโมเลกุลนี้เอง Eyring บอกไว้ว่ากรณีที่มีโมเลกุลแพร่มากๆ ความหนืดของของผสม (ยาง+ของเหลว) มักจะใช้มากกว่าความหนืดของยางอย่างเดียว ซึ่งผลของความหนืดของยางยังไม่แน่ชัด แต่ที่ความหนืดของของเหลวต่ำจะเป็นพลาสติกไฮเซอร် ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ และค่า  $D$  ก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น

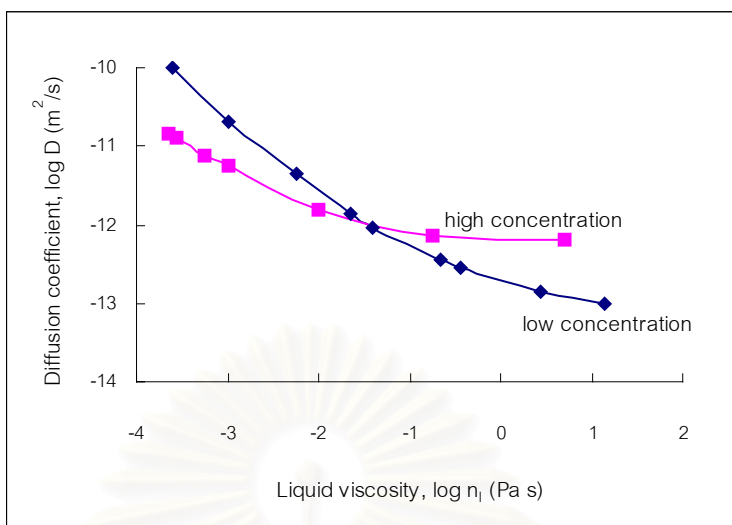
อีกด้วย แต่ผลเช่นนี้จะมีไม่มากในอุณหภูมิของการทดลองที่เหนืออุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยาง ซึ่งของเหลวจะไม่ทำให้เกิดพลาสติกไซเซอริ์ในกรณีนี้

**ตารางที่ 2.13** สัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลวแต่ละชนิดในยางธรรมชาติ ทำการวัดที่ความเข้มข้นต่ำ ในอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0.04<sup>(17)</sup>

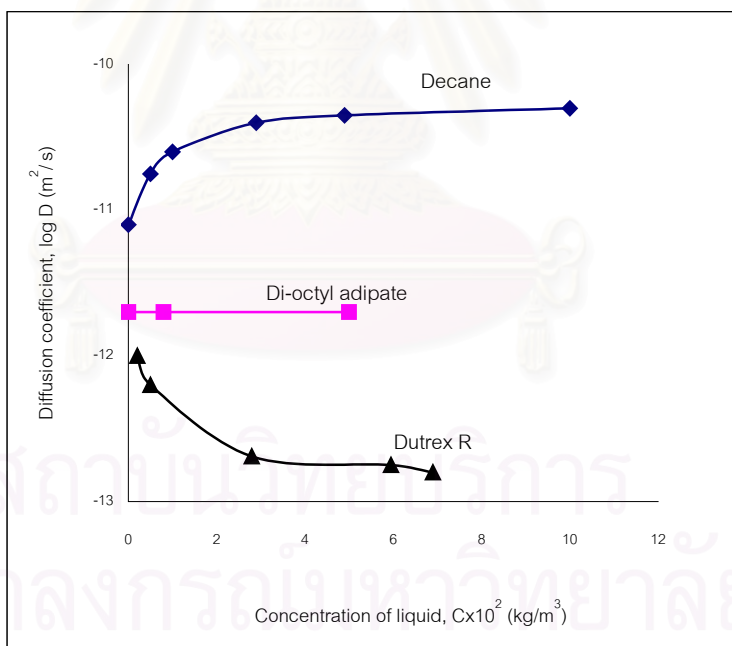
ของเหลว	x	ความหนืด ที่ 25 °C (Pas*10 <sup>-3</sup> )	v	v <sub>c</sub>	D	
					(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> * 10 <sup>-12</sup> )	
					ความเข้มข้น สูง	ความเข้มข้น ต่ำ
เฮกเซน	0.44	0.29	0.253	0.392	70	18.5
เอทิลอะซิเตท	0.79	0.43	0.56	0.595	66	-
โทลูอิน	0.37	0.56	0.213	0.345	85	12
เบนซีน	0.44	0.6	0.2	0.339	71	-
ไซโคลเฮกเซน	0.37	0.9	0.2	0.334	39	5.2
เอมิลแอลกอฮอล์	1.45	3.35	0.332	0.858	7.6	-
ออกทิลแอลกอฮอล์	0.97	6.35	0.692	0.752	4.7	-
น้ำมันเบอร์ 220	-	20	0.304	0.437	1.2	-
น้ำมันเบอร์ 219	-	424	0.373	0.504	0.26	-

ในกรณีความหนืดของของเหลวมีสูงผลของความหนืดของยางจะน้อยกว่า โมเลกุลการแพร่ของของเหลวซึ่งจะให้ผลตรงข้ามกับการเกิดพลาสติกไซเซชัน สังเกตได้จากรูปที่ 2.10 แสดงค่า D ในของเหลวที่มีค่าความหนืดต่างกันในยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับความเข้มข้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



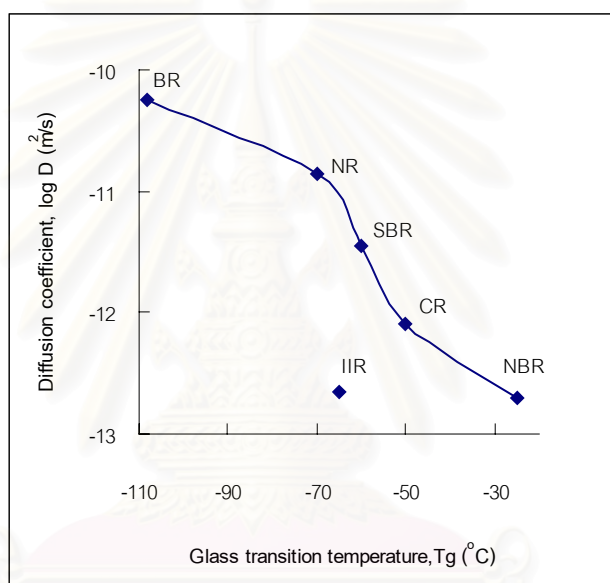
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และความหนืดของของเหลวในยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 25 °C<sup>(17)</sup>



รูปที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของของเหลวที่มีความหนืดและความเข้มข้นต่างกันยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 25 °C<sup>(17)</sup>

### ผลของธรรมชาติของยาง (Effect of natural of rubber)

ในการทดลองทั่วไปค่า D ของของเหลวในยางแต่ละชนิดจะเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางเพราะในส่วนของยาง (rubber segment) ที่เคลื่อนที่ได้ง่ายจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วกระบวนการแพร่ของโมเลกุล ดูได้จากรูปที่ 2.11 ที่อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางแตกต่างกันก็ทำให้ค่า D แตกต่างกันไป ยกเว้นยางบิวทิล ที่มีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเหมือนยางธรรมชาติ แต่ค่า D แตกต่างกันไปเพราะโครงสร้างโมเลกุลของยางบิวทิลนั้นมี steric hindrance เนื่องจาก methyl groups อาจเห็นได้ว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันมีอิทธิพลมากต่อค่า D แต่ก็ต้องดูสมบัติอื่นๆของยางด้วย เพราะอาจจะทำให้เกิดความแตกต่างออกไป



รูปที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-decane ในยางแต่ละชนิดที่มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันแตกต่างกัน<sup>(17)</sup>

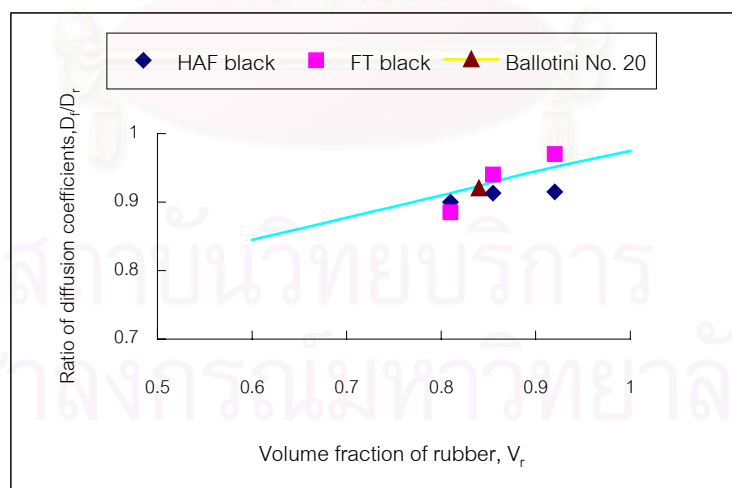
นอกจากนี้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันยังมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่า D ที่ขึ้นกับความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ผลของความเข้มข้นของ n- decane ต่อการแพร่ในยางแต่ละชนิด โดยให้  $v_1$  เป็นอัตราส่วนโดยปริมาตรซึ่งจะวัดที่ความเข้มข้นสูง และวัดที่ความเข้มข้นต่ำโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 0.04<sup>(17)</sup>

Rubber	Tg (°C)	D (m <sup>2</sup> /s x 10 <sup>-12</sup> )		$v_1$
		Low conc.	High conc.	
Polybutadiene (BR)	-108	62	63	0.45
Natural (NR)	-70	12	30	0.59
Butyl (IIR)	-65	0.13	15	0.55
Styrene-butadiene (SBR)	-61	3.5	15	0.47
Neoprene WRT (CR)	-49	0.78	5.2	0.22
Acrylonitrile-butadiene (NBR)	-24	0.2	-	-

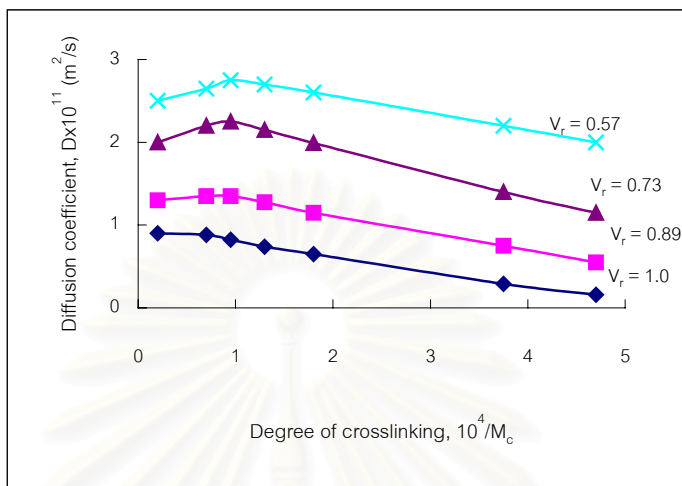
#### ผลของสารประกอบ (Effect of compounding)

ถ้าเป็นพวกสารอนินทรีย์เป็นสารเติมแต่ง ( filler ) เช่น carbon black, clay ซึ่งจะทำให้ลดค่า D ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Maxwell มีผลกระทบไม่มากดังรูปที่ 2.12 แต่จะมีผลมากต่อการแพร่ของแก๊สใน filler ที่เป็น mica



รูปที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-decane,  $D_f$  ในยางธรรมชาติที่ใส่สารเติมแต่งที่อัตราส่วนต่างๆ โดย  $D_f = 2Dr / (3 - V_r)$  และ  $Dr$  คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารเติมแต่ง<sup>(17)</sup>

นอกจากนี้อิทธิพลของระดับความเป็นผลึก(degree of crosslinking) ที่เกิดจากการเติมสารที่ทำให้ยางเกิดการคงรูปนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แสดงค่า D ของ n-decane ในยางธรรมชาติที่มีระดับความเป็นผลึกแตกต่างกัน



รูปที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ n-decane ในยางธรรมชาติที่มีระดับความเป็นผลึกในยางต่างกันโดย  $M_c$  คือน้ำหนักโมเลกุลของยางที่เกิดการเชื่อมโยง และ  $V_r$  คืออัตราส่วนโดยปริมาตรของยาง<sup>(17)</sup>

ในบางกรณีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอาจทำให้ D เปลี่ยนแปลงได้ด้วยเช่น การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่า D สูงขึ้นเพราะมีพลังงานความร้อนมาช่วย

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คัทเลีย ซะโรจน์บัวร<sup>(18)</sup> ได้ศึกษาการถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวช่วย พบว่าเมื่อความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติได้มากขึ้น และสารอินทรีย์ที่แทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนไป

ชุตินา โชติเวศย์ศิลป์<sup>(19)</sup> ได้ศึกษาการถ่ายโอนมวลสารไฮโดรคาร์บอนเหลวเข้าไปในยางธรรมชาติ ทำให้เกิดการพองตัวของยางธรรมชาติเนื่องจากยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนจึงมีสมบัติการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนได้และถ่านอินมวล์สารไฮโดรคาร์บอนเข้าสู่ยางธรรมชาติโดยการไ้ระบบทัศนภาพเข้ามาช่วยในการหาอัตราการพองตัวของยางที่เกิดขึ้น โดยวัดขนาดรัศมีของตัวอย่างยางรูปแผ่นวงกลมที่เปลี่ยนไปกับเวลา เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนแทรกซึมเข้าไปตามแนวรัศมี

พรพรรณ นิธิอุทัย<sup>(20)</sup> ได้ศึกษาการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ซึ่งพบว่า สามารถผสมยางธรรมชาติได้ในช่วงอัตราส่วนประมาณ 25-40 % ก็ไม่ทำให้สมบัติที่ดีของยางสังเคราะห์ที่มีราคาแพงลดลง จึงทำให้อุตสาหกรรมการผลิต และนอกจากนี้ยังมีการศึกษารวมกันระหว่างยางคลอโรพรีน (CR) และยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) พบว่า ในยางผสมต้องมีปริมาณยางคลอโรพรีนมากกว่า 60% เพราะถ้ามีปริมาณน้อยอาจทำให้ยางผสมขาดสมบัติที่ดีของยางคลอโรพรีนคือการคงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนและน้ำมัน

Taverdet, J.L., and Vergnaud, J.M.<sup>(21)</sup> ได้ศึกษาการถ่ายโอนมวลของของเหลวคือใช้สาร n-heptane เข้าสู่เนื้อ PVC โดยใช้วิธีระยะสั้น และระยะยาว เนื่องจากเวลาเพียงระยะสั้นค่าความเข้มข้นของสารจะมีค่าคงที่ และสามารถหาสมการที่ใช้อธิบายการถ่ายโอนมวลสารได้

Ismail, H., and Leong, H.C.<sup>(22)</sup> ได้ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางผสม ยางธรรมชาติ (NR) กับยางคลอโรพรีน (CR) และยางผสม อีพอกซีไดร์ซ์ยางธรรมชาติ (ENR50) กับยางคลอโรพรีน ที่อัตราส่วน ยางคลอโรพรีนในยางผสม 0, 25, 50, 75, 100% พบว่ายางผสมที่มียางธรรมชาติและ ENR50 อยู่ 25% จะมีค่า tensile modulus และ hardness มากที่สุด และยางผสมที่มียางธรรมชาติและ ENR50 อยู่ 75% จะมีค่า tensile strength มากที่สุด โดย ENR50/CR มีมากกว่า NR/CR เนื่องจาก CR และ ENR50 ทั้งสองชนิด



เป็นยางที่มีขี้ขี้ จึงผสมกันได้เป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่า จึงเห็นได้ว่าการผสมเข้ากันได้ดีของยางผสม จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมด้วย

Ismail, H., and Poh, B.T.<sup>(27)</sup> ได้ศึกษาลักษณะการคงรูปของยางผสมยางธรรมชาติ (NR) กับยางไนไตรล์ (NBR) เพื่อต้องการยางผสมคงรูปที่จะรวมสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งยางไนไตรล์จะทนต่อน้ำมันได้ดี และยางธรรมชาติมีสมบัติต้านทานแรงดึงได้ดี พบว่าที่ทุกอัตราส่วนคือ 0, 25, 50, 75, 100% ที่อุณหภูมิมากกว่า 140 °C เวลาเริ่มการคงรูป (Mooney scorch time) ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนผสมเพราะมีพลังงานความร้อน (Thermal energy) มากพอทำให้พลังงานกระตุ้น (Activation energy) กระบวนการวัลคาไนเซชันของยางผสมได้

Unnikrishnar, G., and Sabu thomus<sup>(24)</sup> ได้ศึกษาการดูดซับและการถ่ายโอนมวลสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน 4 ชนิดเข้าไปในยางธรรมชาติที่มีการวัลคาไนเซชันที่แตกต่างกัน (CV, EV, DCP, S+Peroxide) ที่อุณหภูมิ 28-60 °C พบว่ากลไกการถ่ายโอนมวลสารของของเหลวเบี่ยงเบนไปจากกฎของฟิคซึ่งเป็นลักษณะการดูดซับของของเหลวในยาง โดยการถ่ายโอนมวลสารขึ้นอยู่กับกระบวนการวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติ โดย DCP มีการดูดซับน้อยที่สุด นอกจากนี้การถ่ายโอนมวลสารยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน และอุณหภูมิเป็นตัวช่วยกระตุ้นการแพร่ โดย CV มีการตอบสนองได้ดีที่สุดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

Shivaputrappa B. Harogoppad and Tajrai Aminabhav<sup>(26)</sup> ได้ศึกษาลักษณะการดูดซับและการแพร่ของยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) ยางไนไตรล์ (NBR) ยางนีโอพรีน (CR) ยางเอทิลีน-โพรพิลีน-มอนอเมอร์ (EPDM) และยางธรรมชาติ (NR) ในมอนอไซคลิก อะโรมาติก คือ chlorobenzene, bromobenzene, fluorobenzene, nitrobenzene และ aniline ที่อุณหภูมิ 25-60 °C พบว่าการถ่ายโอนตัวทำละลายเข้าไปในยางบางชนิดเบี่ยงเบนจากกฎการแพร่ของฟิคขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างหลังของยาง ชนิดของตัวทำละลาย และอุณหภูมิ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะบอกถึงความเหมาะสมของยางที่จะนำไปใช้งานที่ต้องสัมผัสกับตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ในอุณหภูมิต่างๆได้

Charamma, N.M., Mathew, N.M., and Thomus, E.V.<sup>(25)</sup> ได้ศึกษาสภาวะสำหรับกราฟต์โคพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนอะโรมาติกไนไตรล์มอนอเมอร์ (AN) บนยางธรรมชาติในรูปของน้ำยางโดยใช้  $\gamma$ -radiation เพื่อเปลี่ยนสมบัติยางธรรมชาติให้มีความต้านทานต่อตัวทำละลายและน้ำมัน ซึ่งทำการศึกษาอัตราส่วนอะโรมาติกไนไตรล์ในน้ำยางและทำการเปรียบเทียบสมบัติของยางที่เตรียม

ได้กับยางไนไตรล์พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนอะคริไลไนไตรล์แล้วค่า tensile modulus และ hardness ของยางที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า tensile strength, tear strength, elongation at break, resilience และ compression set resistance ลดลง ส่วนสมบัติต้านทานน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิห้องแช่นาน 70 ชั่วโมงพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนอะคริไลไนไตรล์ ความต้านทานต่อน้ำมันจะเพิ่มขึ้น แต่ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนอะคริไลไนไตรล์ ที่ 45% ยังมีความต้านทานต่ำกว่ายางไนไตรล์ที่มีอะคริไลไนไตรล์ 30%

Harogoppad, S.B., and Aminabhavi, T.M.<sup>(23)</sup> ได้ศึกษาผลของการแพร่และการดูดซับของตัวทำละลายอินทรีย์พวก n-alkane ของยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) ยางไนไตรล์ (NBR) ยางนีโอพรีน (CR) ยางเอทิลีน-โพรพิลีน-มอนอเมอร์ (EPDM) และยางธรรมชาติ (NR) ที่อุณหภูมิ 25-60 °C พบว่าผลของขนาดของโมเลกุลของของเหลวมีผลต่อการแพร่ และกลไกการแพร่ก็เป็นไปตามกฎการแพร่ของฟิค ซึ่งยางนีโอพรีนและยางไนไตรล์เป็นยางมีขั้วจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity, D) และ ค่าการดูดซับ (Sorption constant, S) มีค่าน้อยกว่ายางชนิดอื่นๆ และศึกษาการกระตุ้นกระบวนการแพร่ได้โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 25-60 °C

Chantippimarn, S.<sup>(28)</sup> ได้ศึกษายางผสมที่ได้จากการผสมยางธรรมชาติกับแป้งข้าวเหนียวพบว่า เมื่ออบผสมยางธรรมชาติที่เป็นยางแผ่นรมควันกับแป้งข้าวเหนียวกับสารคงรูปแต่ละชนิดด้วยเครื่องอบผสมสองลูกกลิ้งพบว่า ซัลเฟอร์เป็นสารคงรูปของยางผสม และอุณหภูมิในการขึ้นรูปคือ 160°C ทำให้ยางผสมแข็งแรงขึ้น ซึ่งยางผสมที่ได้จะมีการดูดซับน้ำมันได้ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งในยางผสม นอกจากนี้ยังพบว่า ยางผสมจะมีความหนาแน่น (density) ลดลงเมื่อปริมาณของแป้งในยางผสมเพิ่มขึ้น โดยที่มีแป้งในยางผสม 60%โดยน้ำหนักจะได้ยางผสมที่มีความหนาแน่นลดลงเป็น 4 เท่าของความหนาแน่นของยางธรรมชาติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

##### 3.1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ยางคลอโรพรีน เกรด W จากบริษัท Chemical Innovation Co.,Ltd

ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางคลอโรพรีน<sup>(29)</sup>

สมบัติ	ผลการทดสอบ
ส่วนประกอบ สีและลักษณะ สิ่งเจือปน	พอลิคลอโรพรีนที่ไม่มีส่วนของซัลเฟอร์ แผ่นหรือก้อนสีขาวครีมขนาดเล็ก
ปริมาณสิ่งระเหย (%)	-
ความหนืด (Mooney unit)	1.3, max.
ความถ่วงจำเพาะ	42-51
อัตราการตกผลึก	1.24
	ต่ำมาก

2. ยางอะครีโลไนไตรล์ จากบริษัท Chemical Innovation Co.,Ltd

ตารางที่ 3.2 สมบัติของยางอะครีโลไนไตรล์<sup>(30)</sup>

สมบัติ	ผลการทดสอบ
ชื่อทางการค้า	N220SH
% อะครีโลไนไตรล์	41
ความหนืด (ML(1+4)100 °C)	80
สีและลักษณะ	เป็นก้อนสีน้ำตาลอ่อน

3. ยางธรรมชาติ เป็นแผ่นยางรมควัน (Ribbed Smoked Sheet)
4. แป้งมันสำปะหลัง
5. น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant Oil ชนิด Multigrade, PTT)

ตารางที่ 3.3 สมบัติจำเพาะของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐาน API คือ API-SJ/CP<sup>(31)</sup>

สมบัติจำเพาะ	ค่าตามมาตรฐาน
เกรดความหนืด	SAE 20W-5
จุดวาบไฟ (coc), °C	237
ความหนืดที่ 100 °C, เซนติสโตกซ์	8.4
ความหนืดที่ -10 °C, เซนติสโตกซ์	3160
ดัชนีความหนืด	131
จุดไหลเท, °C	-24
สี	แดง

## 6. ตัวทำละลายอินทรีย์

ตารางที่ 3.4 สมบัติของตัวทำละลายอินทรีย์

ตัวทำละลายอินทรีย์	ชื่อทางการค้า	สูตรโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุล
Xylene	Xylol	$C_8H_{10}$	106
Heptane	n-Heptane	$C_7H_{16}$	100
n-Butyl Acetate	2-Methylpropyl Acetate	$C_6H_{12}O_2$	116.16
1-Octanol	n-Octyl Alcohol	$C_8H_{18}O$	130.23
Propylene Glycol	-	$C_3H_8O_2$	76.1

## 7. สารเคมีอื่นๆ

Stearic acid : COSAN (THAILAND) Co., Ltd.

Zinc oxide : S.R.LAB.Co., Ltd.

Magnesium oxide : S.R.LAB.Co., Ltd.

CBS : Bayer Thai Co., Ltd.

TBBS : Bayer Thai Co., Ltd.

ETU : บริษัท กิจไพบูลย์ จำกัด

Sulfur : S.R.LAB.Co., Ltd.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องบดผสมแบบเปิด ชนิด 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง x ความยาวลูกกลิ้งเป็น 8 x 12 นิ้ว
2. เครื่องอัดยางคงรูป (Hydraulic Press) ขนาดของแท่นอัด 20 x 20 นิ้ว แรงอัด 70 ตัน คือแรงอัดประมาณ 0.175 ตันต่อตารางนิ้ว
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องมือทดสอบหาเวลาและลักษณะการคงรูปของยาง (Rheometer) ชนิด moving die type : Monsanto Model MDR 2000
2. เครื่องมือทดสอบหาค่าความแข็งของยาง : Shore Instrument and MFG Co Model 716 Durometer Hardness System
3. เครื่องมือทดสอบแรงดึงของยาง (Tensile Tester) : Instron calibration laboratory

### 3.4 การเตรียมยางผสม

#### การบดยางให้นิ่ม<sup>(32),(33)</sup>

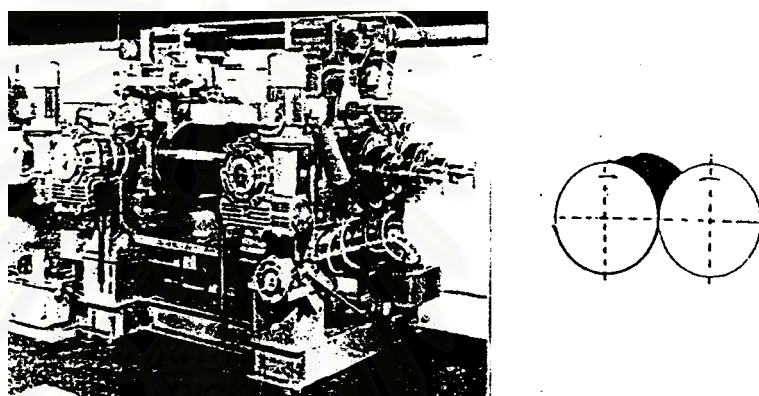
การบดยางให้นิ่มคือ การที่ทำให้ยางซึ่งเป็นพวกพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเกิดการฉีกขาดของสายโมเลกุลมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง

การบดยางให้นิ่ม เป็นวิธีสำคัญและมักใช้กับยางธรรมชาติ เพราะยางธรรมชาติมีความหนืดสูงหรือแข็งมากเกินไปที่จะให้สารเคมีต่างๆ กระจายเป็นเนื้อเดียวกันได้ นอกจากนี้ยังจำเป็นในด้านการผสมยางเข้าด้วยกัน (blending) เพื่อการปรับค่าความหนืด (mooney viscosity) ของยางที่นำมาผสมกันให้มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นการเพิ่มความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของยางผสม สามารถทำได้โดยการบดยางล่วงหน้าในตอนเริ่มแรกโดยไม่ผสมสารเคมีใดๆ

กลไกของการบดยางให้นิ่มคือ ขณะที่ทำการบดยาง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำการตัดสายโมเลกุลยางและเกิดเรดิคัล (radical) ที่ปลายสายโมเลกุลที่ขาดออก ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงและความหนืดจึงลดลงด้วย

#### การบดผสมยางกับสารเคมี<sup>(1),(13)</sup>

เครื่องมือที่ใช้ในการบดผสมยางกับสารเคมีคือ เครื่องบดผสมแบบเปิดนี้จะเป็นแบบสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูกที่มีขนาดเท่ากันวางในแนวนอนให้แกนของลูกกลิ้งขนาดกัน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องมือบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง<sup>(1)</sup>

การบดเริ่มด้วยการใส่ชิ้นยางเข้าไปในช่องว่างระหว่างสองลูกกลิ้งที่กำลังหมุนอยู่ปรับความกว้างของช่องเพื่อให้บีบยางขณะยางผ่านที่ช่องว่างระหว่างสองลูกกลิ้ง ในตอนแรกจะมียางร่วงตกลงมาบนถาดรองรับได้ลูกกลิ้งได้ เมื่อยางเกาะพันรอบลูกกลิ้งในตอนแรกจะมีลักษณะไม่เรียบทั่วผิวลูกกลิ้งคือ ยางที่พันรอบลูกกลิ้งจะมีช่องที่ขาดเป็นรูอยู่ทั่วไป เมื่อบดต่อไปยางที่พันลูกกลิ้งจะเริ่มเรียบขึ้น ขณะเดียวกันก็จะมีกองยางอยู่เหนือช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง และต้องให้ยางผ่านลูกกลิ้งซ้ำๆไปมาหลายครั้ง เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอทั่วเนื้อยาง ซึ่งทำได้โดยใช้มีดตัดยาง (roll knife) ตัดยางที่พันอยู่บนลูกกลิ้งตัดไปตามยาวประมาณสามในสี่ของความยาวลูกกลิ้ง ขณะเดียวกันใช้มืออีกข้างหนึ่งม้วนยางที่ถูกตัดเข้ามา โดยให้ม้วนยางยังคงทาบอยู่บนผิวลูกกลิ้งจนกว่ากองยางที่ยังค้างอยู่บนช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งใหม่

ในการใช้ลูกกลิ้งเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง ควรคำนึงถึง

- คุณภูมิของลูกกลิ้ง ควรปรับตั้งให้มีค่าเหมาะสมกับชนิดสารเคมีและสูตรยางที่จะบด
- ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง ควรปรับให้มีความเหมาะสมกับปริมาณยางที่จะบด

โดยในการทดลองจะผสมที่อุณหภูมิ 70°C ตาม ASTM D3184 และช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งประมาณ 2 มิลลิเมตร โดยสูตรยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับสารมีซั้วชนิดต่างๆแสดงในตารางที่ 3.5 แบ่งได้เป็น

- สูตรควบคุมยางธรรมชาติ (NR), ยางคลอโรพรีน (CR), ยางไนไตรล์ (NBR)
- สูตรควบคุมยางธรรมชาติผสมยางคลอโรพรีน (NR/CR)
- สูตรควบคุมยางธรรมชาติผสมยางไนไตรล์ (NR/NBR)
- สูตรควบคุมยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง (NR/starch)

### ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	NR	NR/CR	NR/NBR	NR/starch
ยางผสม	100	100	100	100
Stearic acid	2.0	1.0	2.0	2.0
ZnO	5.0	5.0	5.0	5.0
MgO	-	2.0	-	-
CBS	-	1.0	-	-
ETU	-	0.5	-	-
Sulfur	1.3	2.5	1.3	1.3
TBBS	1.3	-	1.3	1.3

หน่วยที่ใช้ในการผสมในตารางที่ 3.5 เป็นส่วนต่อ 100 ส่วนของยาง (phr) จะใช้อัตราส่วนผสม NR/CR, NR/NBR, NR/starch เป็น 70/30, 50/50, 30/70, 0/100 และ นั่นคือ

สารมีซั้ว 30% คือ CR30, NBR30, starch30

สารมีซั้ว 50% คือ CR50, NBR50, starch50

สารมีซั้ว 70% คือ CR70, NBR70, starch70

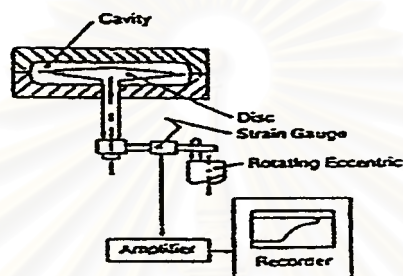
สารมีซั้ว 100% คือ CR, NBR, starch

### การทดสอบหาเวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูป

ซึ่งทดสอบตาม ISO 3417-1977 (E) Rubber measurement of vulcanization characteristic with the oscillating disc curemeter ต้องใช้ขึ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส



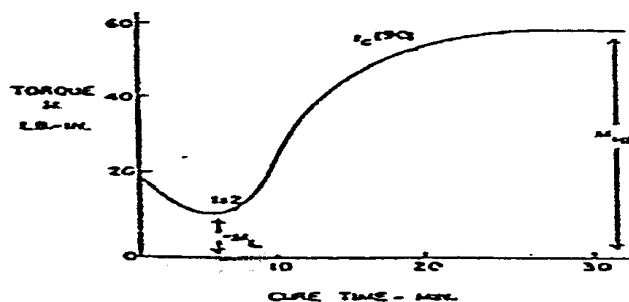
กว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ทดสอบที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาทีโดยที่ใช้เครื่อง Monsanto Oscillating Disk Rheometer, ODR ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นเครื่องมือสำหรับหาเวลาในการคงรูปของยางผสม ประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนไหวในลักษณะแกว่งกลับไปกลับมา (oscillating disk) ตามองศาที่กำหนด ( $1^{\circ}$   $3^{\circ}$  หรือ  $5^{\circ}$ ) และใช้อุณหภูมิในการทดสอบ  $160^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเครื่องนี้จะวัดแรงที่ต้องใช้ (torque) ในการแกว่งโรเตอร์ที่จมอยู่ในตัวอย่างยาง โดยยางจะถูกใส่ไว้ในช่องที่ถูกอัดด้วยแรงอัดสูงและมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามต้องการ การแกว่งของโรเตอร์นี้ไม่เป็นการทำลายตัวอย่างยาง



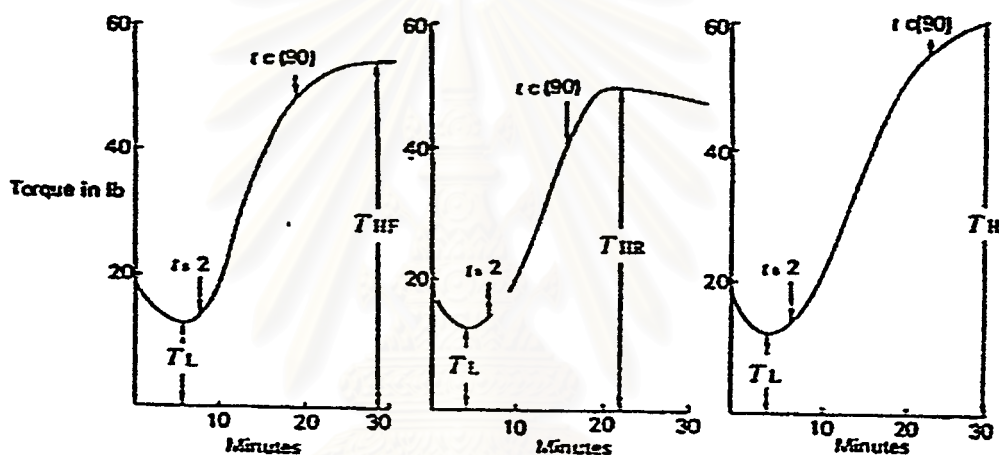
รูปที่ 3.2 เครื่อง Oscillating Disk Rheometer<sup>(34)</sup>

ขณะที่ปฏิบัติการคงรูปดำเนินไปนั้น แรงที่ต้องใช้เฉือนยางจะค่อยๆเพิ่มขึ้น และผลที่ได้จะถูกบันทึกลงเป็นกราฟ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.3 และจากกราฟแสดงให้เห็นถึงแรงต่ำสุด (minimum torque,  $M_L$ ) แรงสูงสุด (maximum torque,  $M_{HF}$ ) เวลาที่ยางเริ่มคงรูป (scorch time,  $t_{s2}$ ) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป 90% ( $t_{c90}$ )

ลักษณะของกราฟภายหลังการคงรูปเต็มที่แล้วมี 3 แบบ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งขึ้นกับชนิดของยางผสมคือ ยางผสมบางชนิดภายหลังจากคงรูปเต็มที่แล้ว จะมีลักษณะของ torque คงที่หรือสมดุลย์ ( $M_{HF}$ ) ส่วนยางธรรมชาติเมื่อผ่านการคงเต็มที่แล้วจะมี torque ลดลงจากค่าสูงสุด (reversion) ซึ่งมีผลทำให้สมบัติของยางเสียไป ส่วนลักษณะการคงรูปอีกแบบหนึ่งเป็นแบบที่ torque เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (marching) คือ ไม่ถึงจุดสมดุลย์หรือไม่ถึงจุดสูงสุด



รูปที่ 3.3 ลักษณะกราฟที่ได้จากเครื่อง ODR<sup>(1)</sup>

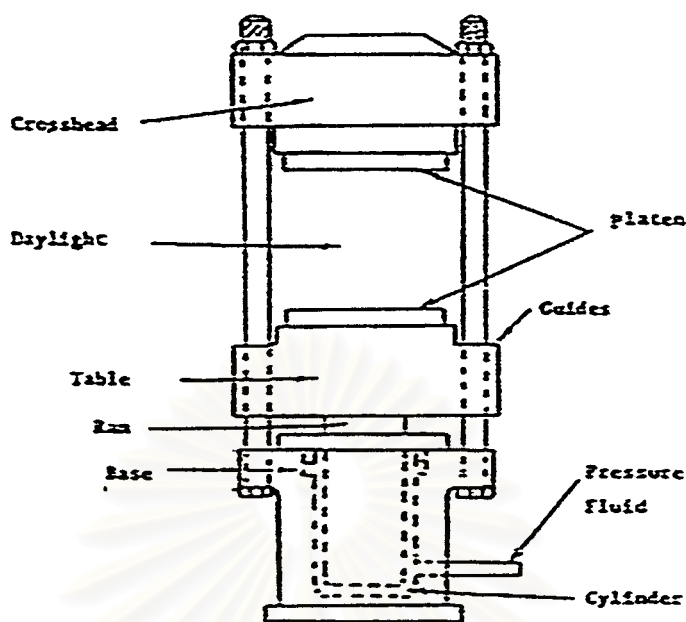


รูปที่ 3.4 ลักษณะของกราฟการคงรูปแบบต่างๆ<sup>(1)</sup>

- (1) ลักษณะการคงรูปคงที่ (2) ลักษณะการคงรูปที่ลดลง (3) ลักษณะการคงรูปที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

#### การขึ้นรูปยางทำให้ยางเกิดการคงรูป<sup>(1), (33)</sup>

โดยใช้เครื่องอัดยางคงรูป (Hydraulic press) โดยใช้แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  ซึ่งใช้เวลาในการคงรูปที่วัดได้จากเครื่อง Rheometer คือ  $t_{c90}$  เป็นเวลาในการคงรูป การทำให้ยางคงรูปโดยวิธีอัดเป็นวิธีที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางประเภทที่ต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป โดยวางแม่พิมพ์ที่บรรจุยางผสมลงบนแท่นของเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ดังรูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดยางแบบแท่นอัดยางเคลื่อนขึ้น (up-stroking press) ซึ่งแท่นอัดยางแท่นล่างเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ขึ้นด้วยแรงอัดไฮดรอลิก ช่องระหว่างแท่นอัดยาง เรียกว่า daylight



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดไฮดรอลิก<sup>(1)</sup>

เครื่องอัดยางมีได้หลายแท่นอัด ซึ่งจะเพิ่มจำนวนช่องว่าง (daylight) และทำให้อัดยางได้ครั้งละหลายๆชิ้น แท่นอัดอาจถูกทำให้ร้อนด้วยไอน้ำหรือน้ำมันหรือไฟฟ้า ซึ่งอุณหภูมิที่ต้องการจะถูกควบคุมโดยระบบอัตโนมัติ

### 3.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสม

เพื่อทดสอบหาความสามารถในการรักษาสภาพของยางเมื่อถูกแรงมากกระทำซึ่งโดยทั่วไปมีหลายวิธี ในที่นี้จะใช้วิธีดังต่อไปนี้

- Tensile strength หาแรงที่ใช้ในการดึงยางจนกระทั่งยางขาดออกจากกัน
- Elongation at break ความยืดเมื่อขาดหรือความยืดสูงสุด
- Hardness หาความต้านทานของยางต่อแรงกดเป็นรอยลึก

#### การเตรียมชิ้นทดสอบ

- ค่า Tensile strength และ Elongation at break

โดยชิ้นทดสอบนั้นต้องผ่านการขึ้นรูปทำให้ยางเกิดการคงรูปเป็นแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำแผ่นยางที่ได้มาตัดด้วยเครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม (compress air sample cutter) เป็นรูปดัมเบลล์ โดยจะตัดชิ้นงานทางด้านแนวเครื่องคือ ตัดชิ้นงานให้ตั้งตามแนวที่ยางถูกบดออกมา

- ค่า Hardness

โดยขึ้นทดสอบนั้นต้องผ่านการขึ้นรูปทำให้ยางเกิดการคงรูปมีความหนามากกว่า 6 มิลลิเมตร แต่ถ้าความหนาไม่ถึง 6 มิลลิเมตร จะต้องนำชิ้นงานมาซ้อนกันให้ได้ความหนาตามต้องการ ซึ่งอาจให้ผลที่คลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานด้วยกัน

การทดสอบสมบัติเชิงกล

- การหาค่า Tensile strength และ Elongation at break

ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37 โดยเครื่อง Instron calibration laboratory และมีเลเซอร์เครื่องคอยจับระยะของการยืดของยาง load cell ที่มีขนาด 500 นิวตัน ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้ขึ้นทดสอบแบบที่เป็นรูปดัมเบลล์ ปลายทั้งสองของขึ้นทดสอบถูกยึดเข้ากับหัวจับของเครื่องทดสอบ และใช้แรงดึงที่ทราบค่าดึงหัวจับทั้งสองให้เคลื่อนที่ออกจากกัน ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องทดสอบ

- การหาค่า Hardness

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยเครื่อง Lever Loader Model 917 สำหรับยางที่ใช้ในงานวิจัยใช้น้ำหนักถ่วง 1 กิโลกรัม และใช้ Shore A เป็นหัววัดที่ใช้ในการทดสอบ ก่อนทำการทดสอบต้องทำการตรวจสอบการอ่านค่าความแข็งจากยางมาตรฐานที่ใช้กับ Shore A ก่อน โดยมียางมาตรฐานดังนี้

A ความแข็ง 33.1	B ความแข็ง 41.9
C ความแข็ง 55.7	D ความแข็ง 63.2
E ความแข็ง 71.8	F ความแข็ง 80.5
G ความแข็ง 90.1	

การทดสอบยางมาตรฐานทำโดยปรับระยะห่างระหว่างหัวกับฐานรองรับขึ้นทดสอบได้ประมาณ 5 มิลลิเมตร วางตุ้มน้ำหนักถ่วงขนาด 1 กิโลกรัม บนแกนรองรับของหัววัด แล้วทำการทดสอบเครื่องด้วยยางมาตรฐานเป็นเวลา 1 วินาที เมื่อทดสอบกับยางมาตรฐานได้แล้วจึงนำขึ้นทดสอบมาทำการทดสอบเป็นเวลา 15 วินาที

### 3.6 ศึกษาการดูดซับและการแพร่

โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้<sup>(24),(26)</sup>

- นำยางผสมที่ได้มาตอกให้เป็นแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.94 เซนติเมตร
- นำยางไว้ในดิสซิเคเตอร์ทิ้งไว้ 1 คืน

- วัดความหนาของยางด้วยไมโครมิเตอร์ และชั่งน้ำหนักยางก่อนแช่
- นำมาแช่ในตัวทำละลายอินทรีย์ที่อุณหภูมิต่างๆ
- นำยางขึ้นมาซับเอาตัวทำละลายอินทรีย์ออกจากผิวยาง แล้วชั่งน้ำหนักยางหลังแช่ที่  
ช่วงเวลาต่างๆ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

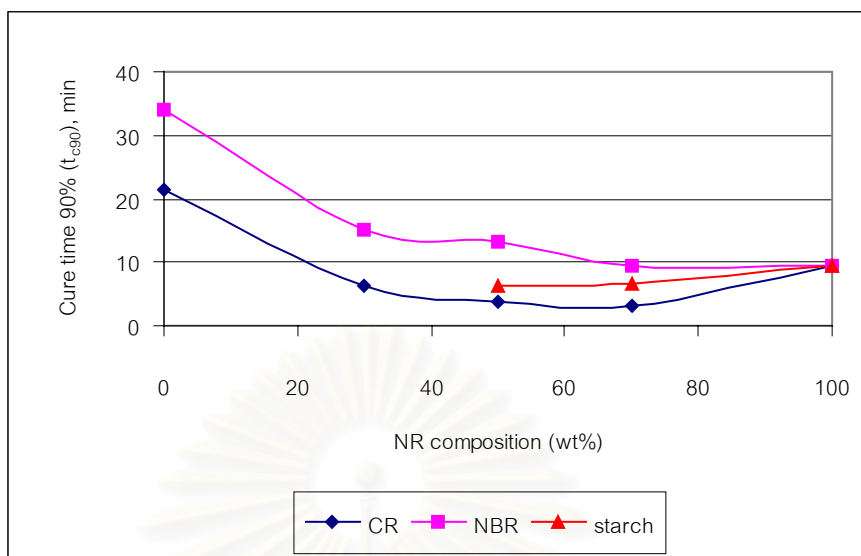
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับและการถ่ายโอนตัวทำละลายอินทรีย์ 5 ชนิดคือ ไชลีน เฮปแทน บิวทิลอะซิเตท ออกทานอล โฟฟอสีนไกลคอล และน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในยางธรรมชาติที่ผสมสารมีขั้ว สารมีขั้วคือ ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ และแป้งมันสำปะหลัง โดยเริ่มจากการเตรียมยางแผ่นที่จะใช้ในการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์มาทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางผสมก่อน จากนั้นก็ศึกษาอิทธิพลของสารมีขั้ว ตัวทำละลายอินทรีย์ และอุณหภูมิของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อการดูดซับและการแพร่ของยางผสมโดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึ่งเป็นไปตามกฎการแพร่ของฟิค ค่าการดูดซับ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของยางผสม รวมทั้งใช้ความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสเพื่อหาค่าพลังกระตุ้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายโอนสารนี้

#### 4.1 เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยาง

เมื่อผสมยางระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับสารมีขั้วคือ ยางคลอโรพรีน (CR) ยางไนไตรล์ (NBR) แป้งมันสำปะหลัง (starch) และสารเคมีอื่นๆในอัตราส่วนต่างๆด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งแล้วจึงนำยางผสมมาหาเวลาที่ใช้ในการคงรูป (Optimum cure time,  $t_{c90}$ ) ด้วยเครื่อง Rheometer โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C จากรูปที่ 4.1 แสดงเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมแต่ละชนิดในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งพบว่ายางธรรมชาติจะเกิดการคงรูปได้เร็วกว่ายางคลอโรพรีนและยางไนไตรล์ โดยใช้เวลาในการคงรูปน้อยกว่านั่นเอง เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างแบบไม่อ้อมตัวคือ มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างที่เหมาะสมและว่องไวต่อการเกิดการคงรูปมากกว่ายางคลอโรพรีนและยางไนไตรล์ เพราะยางธรรมชาติมีหมู่เมทิล (methyl group) อยู่ติดกับพันธะคู่ซึ่งหมู่เมทิลนี้ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงทำให้สารวัลคาไนซ์เข้าไปทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาได้เลย ในขณะที่ยางคลอโรพรีนมีคลอรีนอะตอมและยางไนไตรล์มีหมู่ไซยาไนด์ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากใกล้กับพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุล ดังนั้นจึงทำให้เกิดการคงรูปช้ากว่ายางธรรมชาติ ดังนั้น NR/CR และ NR/NBR ที่มีอัตราส่วนผสมของยางธรรมชาติมากขึ้น จะทำให้ยางผสมใช้เวลาในการคงรูปมีแนวโน้มลดลง แต่ NR/starch เมื่อปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมมีมากขึ้นเวลาในการคงรูปของยางผสมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและที่มีปริมาณแป้ง 70% ในยางผสมไม่สามารถทำให้ยางผสมคงรูปออกมาเป็นแผ่นยางได้เนื่องจากมีปริมาณแป้งมากเกินไปทำให้ได้ยางแตกร้าวไม่เป็นแผ่น

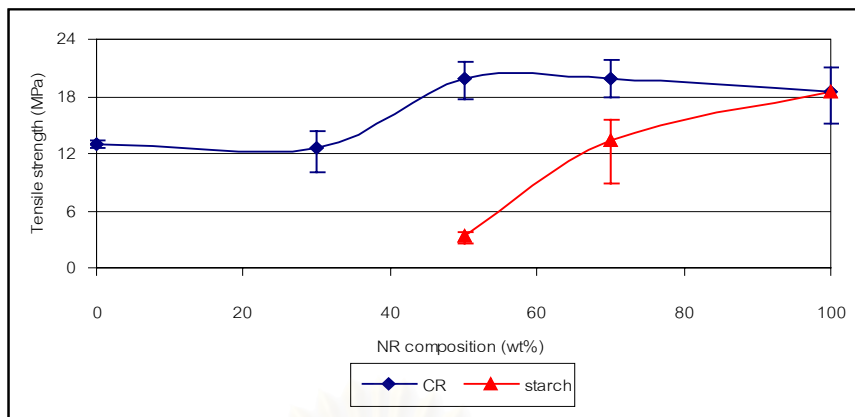


รูปที่ 4.1 เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางผสมแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ

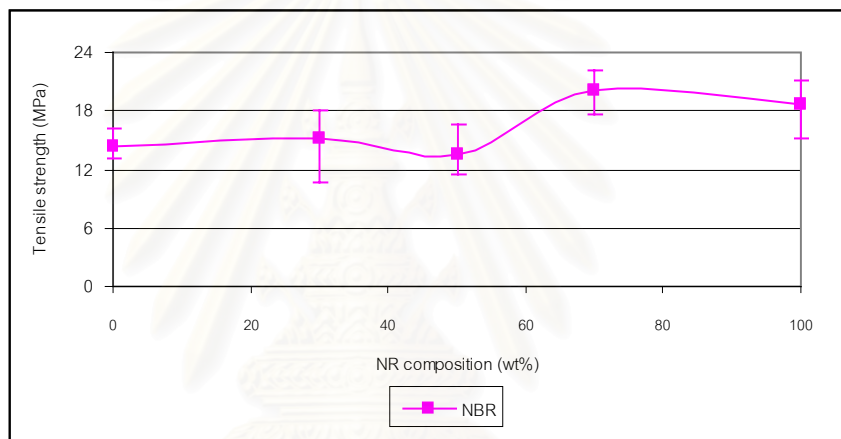
นอกจากอัตราส่วนผสมในยางผสมที่มีต่อเวลาในการคงรูปแล้วยังมีชนิดของสารมีขี้ผึ้งที่มีผลต่อเวลาในการคงรูปของยางผสม ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนเดียวกัน NR/CR มีเวลาในการคงรูปน้อยที่สุด รองลงมาเป็น NR/starch และ NR/NBR ตามลำดับ ซึ่งทราบกันดีแล้วว่าความไม่เข้ากันของยางธรรมชาติซึ่งเป็นสารไม่มีขี้ผึ้ง กับยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ และแป้ง ซึ่งเป็นสารมีขี้ผึ้ง โดยที่ยางธรรมชาติมีพารามิเตอร์การละลาย (Solubility parameter) เท่ากับ 17 ส่วนของยางคลอโรพรีนและยางไนไตรล์ เท่ากับ 18.5 และ 21 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์การละลายของยางธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกับยางคลอโรพรีน ทำให้ NR/CR เข้าผสมกันได้ดีกว่า NR/NBR ดังนั้น NR/CR จึงเกิดการคงรูปได้เร็วกว่า NR/NBR ที่อัตราส่วนเดียวกัน

#### 4.2 สมบัติเชิงกลของยางผสม

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) พบว่า NR/CR และ NR/NBR มีค่า tensile strength มากที่สุดที่มีปริมาณยางธรรมชาติในยางผสม 50% และ 70% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สำหรับ NR/starch นั้นมีค่า tensile strength น้อยกว่า NR/CR และ NR/NBR และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของแป้งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.2 ค่าความต้านทานแรงดึงของ NR/CR และ NR/starch ที่อัตราส่วนต่างๆ

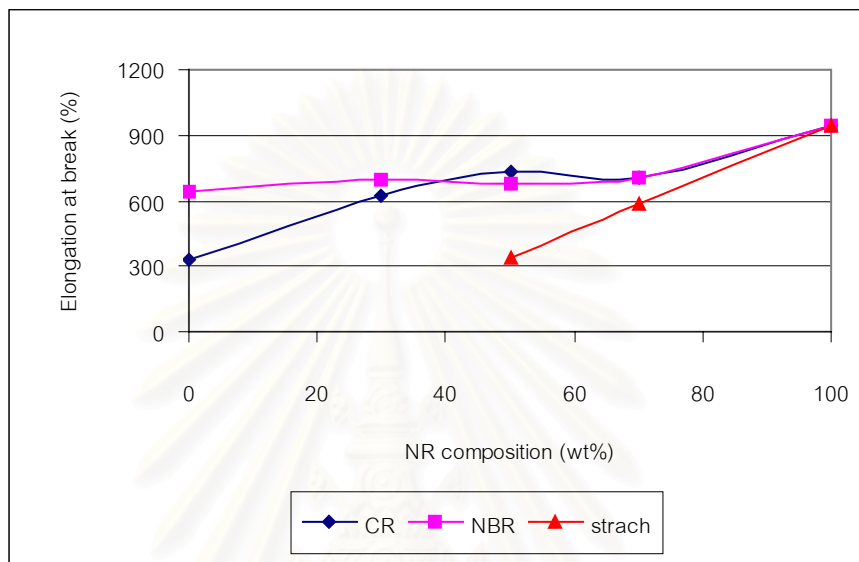


รูปที่ 4.3 ค่าความต้านทานแรงดึงของ NR/NBR ที่อัตราส่วนต่างๆ

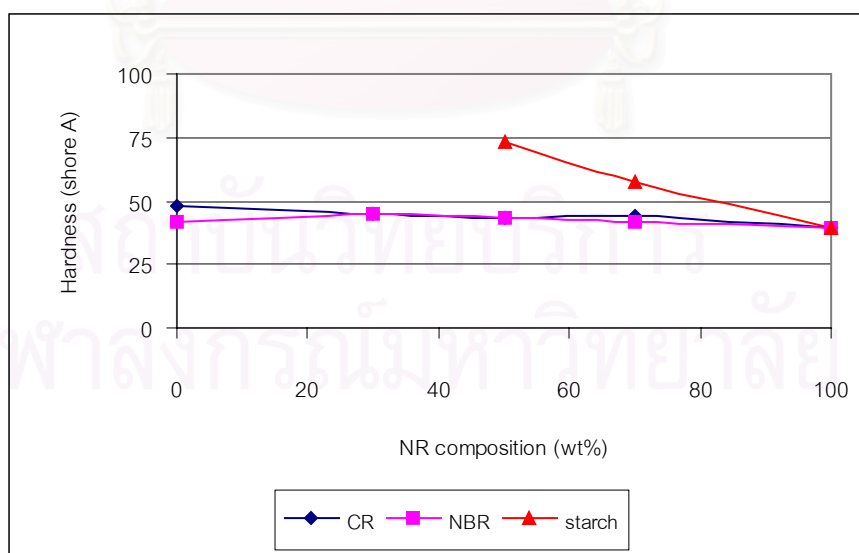
จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าความยืดเมื่อขาด (Elongation at break) พบว่าค่าความยืดเมื่อขาดของยางผสมมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมีปริมาณสารมีขี้ผึ้งในยางผสมเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนเดียวกัน NR/NBR มีค่าความยืดเมื่อขาดมากกว่า NR/CR ที่มีปริมาณยางธรรมชาติในยางผสม 0 และ 30% โดยน้ำหนัก โดย NR/starch มีค่าความยืดเมื่อขาดน้อยที่สุด และนอกจากการเพิ่มสารมีขี้ผึ้งในยางธรรมชาติทำให้ค่าความยืดเมื่อขาดของยางมีการเปลี่ยนแปลงแล้วยังส่งผลทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) ของยางผสมเปลี่ยนแปลง จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์เข้าผสมกับยางธรรมชาติมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งมีค่าค่อนข้างคงที่และมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการเพิ่มปริมาณแป้งมากขึ้นค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและมากกว่า NR/CR และ NR/NBR ที่อัตราส่วนเดียวกัน เนื่องจากแป้งเป็นของแข็งที่มีอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อนำไปผสมกับยางธรรมชาติจึงไปเพิ่มความแข็งให้กับยางผสม



จากการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของยางผสมจะสังเกตได้ว่ายางผสมมีความต้านทานแรงดึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารมีขี้วัวเข้าไปในยางธรรมชาติ อาจเนื่องมาจากการผสมเข้ากันไม่ได้ไม่ค่อยดีของยางธรรมชาติที่เป็นสารไม่มีขี้วัวกับสารมีขี้วัว จึงส่งผลทำให้สมบัติความต้านทานแรงดึงของยางผสมลดลง



รูปที่ 4.4 ค่าความยืดเมื่อขาดของยางผสมแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ



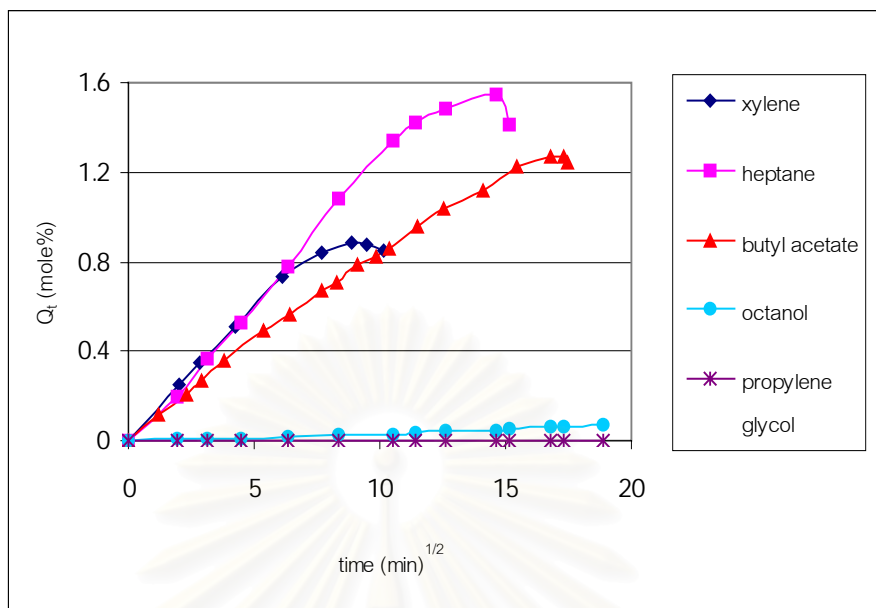
รูปที่ 4.5 ค่าความแข็งของยางผสมแต่ละชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ

### 4.3 การดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันในยาง

#### 4.3.1 ผลของการทำให้ยางคงรูปต่อการดูดซับของยาง

รูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นกราฟการดูดซับที่แสดงค่าระหว่างจำนวนโมลของตัวทำละลายอินทรีย์ที่ถูกดูดซับต่อ 100 กรัมของยางกับ (เวลา)<sup>1/2</sup> ที่อุณหภูมิ 30°C โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ 5 ชนิดคือ ไชลีน เฮปเทน บิวทิลอะซิเตท ออกทานอล และไฟโพลีนไกลคอล ซึ่งจากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟการดูดซับของยางธรรมชาติที่ไม่คงรูปที่อุณหภูมิ 30°C พบว่าในช่วงต้นของการแช่นั้นยางธรรมชาติที่ไม่คงรูปจะมีการดูดซับไชลีน เฮปเทนและบิวทิลอะซิเตทเข้าไปในยางอย่างรวดเร็วและเมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่งก็จะมีการดูดซับช้าลงและในที่สุดก็เกิดการละลายเช่นเดียวกับการละลายของยางธรรมชาติในน้ำมันที่อุณหภูมิ 30°C ส่วนในออกทานอลจะเกิดการดูดซับอย่างช้าๆและน้อยมาก ซึ่งค่าการดูดซับของยางผสมที่ยังไม่คงรูปแต่ละชนิดในตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยที่ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการดูดซับของยางที่ไม่คงรูปแต่ละชนิดในน้ำมันที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 30°C ยางคลอโรพรีน และยางไนไตรล์ไม่คงรูปจะละลายในไชลีนและบิวทิลอะซิเตท ส่วนในออกทานอลจะมีการดูดซับเล็กน้อย โดยยางคลอโรพรีนในน้ำมันและเฮปเทนจะมีการดูดซับเล็กน้อยแต่ยางไนไตรล์ไม่มีการดูดซับ

และจากรูปที่ 4.7 เป็นกราฟการดูดซับของยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วที่อุณหภูมิ 30°C พบว่าช่วงเริ่มต้นของการแช่ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้ว จะมีการดูดซับไชลีน เฮปเทน และบิวทิลอะซิเตทเข้าไปในยางธรรมชาติอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะดูดซับได้มากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่คงรูป และเมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่งการดูดซับจะเกิดการคงที่ไม่เกิดการละลายเช่นเดียวกับในน้ำมันด้วยส่วนในออกทานอลจะดูดซับได้เล็กน้อย โดยการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ของยางคงรูปแต่ละชนิดในอุณหภูมิต่างๆแสดงในตารางที่ 4.2 โดยที่ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการดูดซับน้ำมันของยางคงรูปแต่ละชนิดในอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งที่อุณหภูมิ 30°C ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ ที่คงรูปแล้วก็จะไม่เกิดการละลายในตัวทำละลายเช่นเดียวกัน แต่จะมีการดูดซับเท่าที่น้อยยกเว้นยางไนไตรล์จะไม่มีการดูดซับเฮปเทนและน้ำมัน และยางคลอโรพรีนจะไม่มีการดูดซับน้ำมัน นี่จึงแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 30°C ยางไนไตรล์มีความต้านทานต่อน้ำมันและเฮปเทนได้ดี ส่วนยางคลอโรพรีนก็มีความต้านทานต่อน้ำมันได้ดีเหมือนกัน

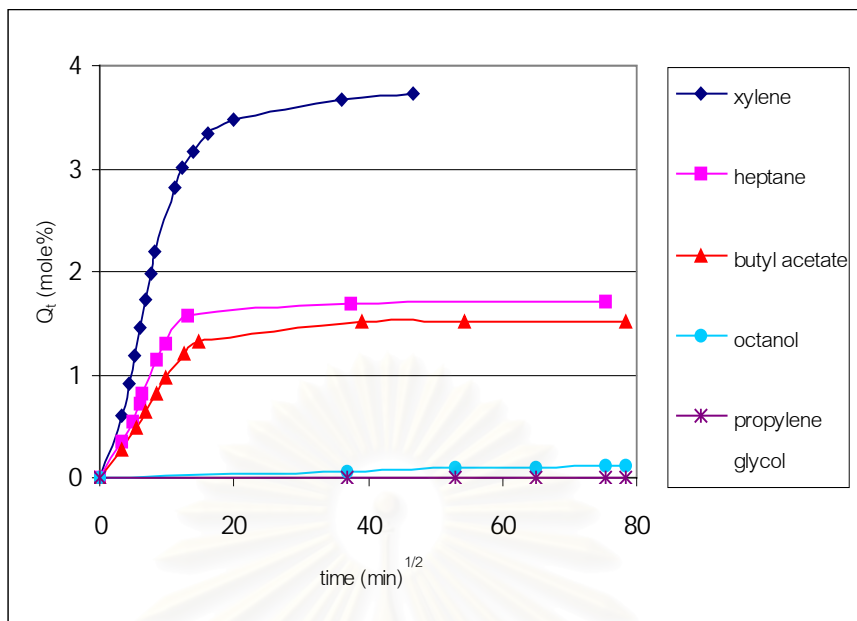


รูปที่ 4.6 การดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ของยางธรรมชาติที่ยังไม่คงรูปที่อุณหภูมิ 30°C

นอกจากนี้ยังพบว่าทั้งยางที่ยังไม่คงรูปและที่คงรูปแล้วทุกชนิดจะไม่มี การดูดซับในโพลีเอทิลีนไกลคอลในอุณหภูมิ 30°C

ที่เป็นเช่นนี้เพราะโดยทั่วไปการละลายจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวทำละลายอินทรีย์ และตัวถูกละลายเข้ากันได้ดี (compatible) และอยู่ร่วมกัน (co-exist) โดยไม่มีแนวโน้มที่จะแยกออกจากกัน โดยโมเลกุลต่างชนิดกันจะอยู่ร่วมกันได้ เมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน<sup>(12)</sup>

แต่ยางที่ผ่านการคงรูปแล้วจะมีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ หากไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเสียก่อน แต่จะเกิดการพองตัวในตัวทำละลายที่มีพารามิเตอร์การละลายใกล้เคียงกัน และหากมีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลหลายๆการพองตัวก็จะลดลง



รูปที่ 4.7 แสดงการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ของยางธรรมชาติที่คงรูปที่อุณหภูมิ 30°C

#### 4.3.2 ผลของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อการดูดซับของยาง

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าการดูดซับตัวทำละลายของยางผสมที่คงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วพบว่าที่อุณหภูมิ 30°C ยางธรรมชาติจะดูดซับไซลีนมากที่สุด รองลงมาก็เป็นเฮปเทน บิวทิลอะซิเตทและออกทานอลตามลำดับ ส่วนในยางคลอโรพรีนจะดูดซับไซลีนมากที่สุด รองลงมาเป็น บิวทิลอะซิเตท เฮปเทนและออกทานอลตามลำดับ สำหรับยางไนไตรล์จะดูดซับบิวทิลอะซิเตทมากที่สุดรองลงมาเป็นไซลีนและออกทานอลตามลำดับ และไม่เกิดการดูดซับในเฮปเทน โดยที่ยางทั้งสามชนิดจะไม่เกิดการดูดซับโพลีเอทิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิ 30°C และจากตารางที่ 4.4 แสดงค่าการดูดซับน้ำมันของยางผสมที่คงรูปแล้วที่อุณหภูมิต่างๆพบว่าที่อุณหภูมิ 30°C น้ำมันซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่จึงทำให้ยางธรรมชาติมีการดูดซับมากที่สุด โดยที่ยางคลอโรพรีนและยางไนไตรล์ไม่เกิดการดูดซับ

จะเห็นได้ว่ายางชนิดเดียวกันจะมีการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิดต่างกัน เนื่องจากสมบัติของตัวทำละลายอินทรีย์แตกต่างกัน โดยในที่นี้สามารถแบ่งตัวทำละลายอินทรีย์ออกได้เป็นดังนี้คือ

ตัวทำละลายชนิดที่ไม่มีขั้วคือ ไซลีน และเฮปเทน ซึ่งรวมไปถึงน้ำมันหล่อลื่น โดยจะผสมเข้ากันได้ดีกับยางที่ไม่มีขั้วที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอยู่ในโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่อย่างเช่น ยางธรรมชาติ และนอกจากจะสังเกตได้จากสภาพการมีขั้วของสารแล้วยังสังเกตได้จากลักษณะโครงสร้างของตัวทำละลายเช่น ยางธรรมชาติจะดูดซับไซลีนได้มากกว่าเฮปเทน เนื่องจากเฮปเทน

มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นสายโซ่ยาวจึงมีความเกาะเกาะมากกว่าตัวทำละลายที่มีโครงสร้างแบบอะโรมาติกของโซลีนั่นเอง

ตัวทำละลายชนิดมีขั้วคือ บิวทิลอะซิเตท ออกทานอล และโพไพลีนไกลคอล ซึ่งโพไพลีนไกลคอลจะมีสภาพการมีขั้วมากที่สุดเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่ และมีค่า dielectric constant สูงคือ 32 โดยที่ออกทานอลจะมีสภาพการมีขั้วมากกว่าบิวทิลอะซิเตท โดยมีหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่และมีค่า dielectric constant เท่ากับ 10.34 โดยที่บิวทิลอะซิเตทมีค่า dielectric constant เท่ากับ 5.01 เท่านั้น ซึ่งค่า dielectric constant ของตัวทำละลายอินทรีย์แสดงอยู่ในตารางที่ ค.1 โดยแสดงสมบัติทางกายภาพของตัวทำละลายอินทรีย์ไว้ ซึ่งตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วนี้จะเข้ากันได้ดีกับยางที่มีขั้วเช่น ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ เพราะยางคลอโรพรีนมีคลอรีนอะตอมอยู่ในโครงสร้างหลักและยางไนไตรล์ก็มีหมู่ไนไตรล์อยู่ในโครงสร้างหลักนั่นเอง แต่เนื่องจากโพไพลีนไกลคอลมีความหนืดสูงมาก (56 cp) จึงเกิดการดูดซับได้ยาก ส่วนออกทานอลนั้นแม้จะมีขั้วแต่มิมีน้ำหนักโมเลกุลสูงการดูดซับเนื่องจากผลของการมีหมู่ที่มีขั้วในโครงสร้างหลักจะถูกปิดบังจากผลของการมีไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ในโครงสร้างโมเลกุล และมีความหนืดสูง (6.125 cp) จึงทำให้ถูกดูดซับด้วยยางที่มีขั้วคือยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ได้น้อยกว่าบิวทิลอะซิเตทซึ่งมีค่าความหนืด (0.734 cp) ต่ำกว่ามาก และเป็นผลทำให้ยางธรรมชาติที่เป็นยางไม่มีขั้วมีการดูดซับออกทานอลและบิวทิลอะซิเตทได้เนื่องจากการมีไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ในโครงสร้างโมเลกุลนั่นเอง นอกจากนี้ผลของการดูดซับนี้ยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายอินทรีย์และของยางด้วย ถ้ามีค่าใกล้เคียงกันโอกาสที่จะเกิดการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์เข้าไปในยางก็เป็นไปได้สูง

#### 4.3.3 ผลของสารมีขั้วต่อการดูดซับของยาง

นอกจากสมบัติของตัวทำละลายที่มีผลต่อการดูดซับแล้ว การดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันยังขึ้นอยู่กับการผสมด้วย จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 30°C ยางธรรมชาติจะดูดซับตัวทำละลายทั้ง 5 ชนิดได้มากที่สุดและมีแนวโน้มส่วนใหญ่ที่จะลดลงเมื่อยางผสมมีปริมาณสารมีขั้วคือ ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ และแป้ง ในยางผสมเพิ่มขึ้น โดยที่โพไพลีน และบิวทิลอะซิเตท ยางผสมที่อัตราส่วนผสมเดียวกันทำให้ NR/starch จะมีค่าการดูดซับน้อยที่สุดรองลงมาเป็น NR/NBR และ NR/CR ตามลำดับ ส่วนในออกทานอล ยางผสมที่อัตราส่วนเดียวกันทำให้การดูดซับของ NR/starch จะน้อยที่สุดรองลงมาเป็น NR/CR และ NR/NBR ตามลำดับ แต่ใน เฮปแทน ยางผสมที่อัตราส่วนเดียวกันจะมีค่าการดูดซับของยางผสมทั้งสามชนิดใกล้เคียงกัน ในกรณีของค่าการดูดซับน้ำมันในยางคงรูปที่อุณหภูมิ 30°C แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ายางธรรมชาติมีค่าการดูดซับมากที่สุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารมีขั้วใน

ยางผสมมากขึ้น โดยที่ในน้ำมันยางผสมที่มีปริมาณสารมีซัวในอัตราส่วนผสมเดียวกันค่าการดูดซับของยางผสมทั้งสามชนิดใกล้เคียงกันยกเว้นที่ปริมาณสารมีซัวในยางผสม 30% โดยน้ำหนัก NR/starch มีค่าการดูดซับน้อยกว่า NR/CR และ NR/NBR ตามลำดับ

#### 4.3.4 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของยาง

จากตารางที่ 4.1 และ 4.3 แสดงค่าการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันของยางผสมไม่คงรูปที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 60 °C จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของตัวทำละลายเพิ่มขึ้นยางผสมส่วนใหญ่จะมีการดูดซับเพิ่มขึ้นและเกิดการละลาย โดยสังเกตได้ถึงแม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมัน เฮปเทน ยางคลอโรพรีนจะไม่เกิดการละลายเหมือนยางผสมชนิดอื่นๆแต่จะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นเท่านั้น โดยยางไนไตรล์จะไม่เกิดการดูดซับเลย ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายางสังเคราะห์ที่ยังไม่คงรูปเช่น ยางไนไตรล์และยางคลอโรพรีนมีความทนทานต่อน้ำมัน และเฮปเทนได้ดี โดยยางไนไตรล์จะมีความทนทานดีที่สุด

จากตารางที่ 4.2 และ 4.4 แสดงค่าการดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันของยางผสมคงรูปที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 60 °C จะเห็นได้ว่า ยางธรรมชาติจะมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันและตัวทำละลายอินทรีย์ยกเว้นใน ไสลีน ส่วนยางคลอโรพรีนจะมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของเฮปเทน ออกทานอล และน้ำมันเพิ่มขึ้น ส่วนในยางไนไตรล์จะมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของออกทานอลเพิ่มขึ้น แต่ไม่เกิดการดูดซับเมื่ออุณหภูมิของเฮปเทนและน้ำมันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ายางไนไตรล์มีความทนทานต่อน้ำมันและสารไฮโดรคาร์บอนได้สูง และยางคลอโรพรีนชนิดเดียวที่จะเกิดการดูดซับโพลีเอทิลีนไกลคอลได้ที่อุณหภูมิ 60 °C

โดยเมื่ออุณหภูมิของออกทานอลและน้ำมันเพิ่มขึ้น ยางผสม NR/CR, NR/NBR และ NR/starch ทุกอัตราส่วนผสม จะมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้น ยกเว้น NR/starch ที่มีปริมาณแบ่งในยางผสม 30% โดยน้ำหนักมีค่าการดูดซับค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมัน และที่ปริมาณแบ่งในยางผสม 50% โดยน้ำหนักค่าการดูดซับลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในน้ำมัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของไซลีน ยางผสมทั้ง 3 ชนิดที่ทุกอัตราส่วนผสมจะมีค่าการดูดซับลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเฮปเทนทำให้ NR/CR ทุกอัตราส่วนผสมและNR/starch ที่มีปริมาณแบ่งในยางผสม 50% โดยน้ำหนักจะมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นโดยยางผสมนอกจากนี้จะมีค่าการดูดซับลดลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของบิวทิลอะซิเตททำให้ NR/starch ทุกอัตราส่วนผสมและ NR/NBR, NR/CR ที่มีปริมาณ CR, NBR ในยางผสม 30% โดยน้ำหนักจะมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นโดยยางผสมนอกจากนี้จะมีค่าการดูดซับลดลง ยางผสม NR/CR ทุกอัตราส่วนผสมจะเกิดการดูดซับในโพลีเอทิลีนไกลคอลได้ที่อุณหภูมิ 60 °C

การที่มีการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันเนื่องจากภายในยางอาจจะมีช่องว่าง (free volume) มากขึ้นและความหนืดของตัวทำละลายอินทรีย์และ

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยการดูดซับ ( $S \cdot 10^2$  โมล/กรัม) ตัวทำละลายอินทรีย์ของยางผสมไม่คงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ

Solvent	Temp. (°C)	NR/Polar compound blends											
		NR	CR	NBR	CR30	CR50	CR70	NBR30	NBR50	NBR70	Starch30	Starch50	Starch70
Xylene	30	0.88	0.68	1.38	1.33	1.28	0.91	0.8	0.75	1.37	0.96	0.76	0.53
Heptane	30	1.55	0.2	0	2.9	1.72	0.93	0.73	0.56	0.33	1.8	1.26	0.78
	40	-	0.23	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60	-	0.24	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Butyl acetate	30	1.27	0.55	0.73	1.43	1.2	0.91	0.76	0.7	0.7	1.4	1.12	0.56
Octanol	30	0.34	0.07	0.13	0.45	0.19	0.13	0.26	0.22	0.19	0.26	0.27	0.15
	40	0.41	0.13	0.12	0.4	0.3	0.2	0.42	0.32	0.23	0.27	0.18	0.16
	60	-	0.42	0.23	0.57	0.55	0.24	-	-	0.28	-	-	-
PG	60	0.15	0.8	0.35	0.34	0.32	0.43	0.4	0.53	0.52	0	0	0

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยการดูดซับ ( $S \cdot 10^2$  มิล/กรัม) ตัวทำละลายอินทรีย์ของยางผสมคั่งรูปที่อุณหภูมิต่างๆ

Solvent	Temp. (°C)	NR/Polar compound blends										
		NR	CR	NBR	CR30	CR50	CR70	NBR30	NBR50	NBR70	Starch30	Starch50
Xylene	30	3.73	2.02	1.02	3.09	3.04	2.66	2.69	2.07	1.58	2.65	1.85
	40	3.47	1.9	0.98	2.85	2.76	2.4	2.52	2.05	1.49	2.43	1.85
	60	3.464	1.88	0.97	2.84	2.74	2.37	2.5	2.04	1.48	2.42	1.84
Heptane	30	1.73	0.15	0	0.99	0.69	0.43	1.05	0.65	0.35	1.07	0.64
	40	1.65	0.16	0	0.94	0.68	0.42	0.96	0.63	0.32	0.9	0.54
	60	1.75	0.17	0	1	0.74	0.46	0.95	0.58	0.32	0.97	0.71
Butyl acetate	30	1.57	1.15	1.3	1.43	1.49	1.4	1.28	1.29	1.34	1	0.64
	40	1.61	1.07	1.11	1.37	1.37	1.28	1.36	1.26	1.14	0.89	0.56
	60	1.85	1	1.01	1.5	1.45	1.37	1.51	1.27	1.15	1.13	0.7
Octanol	30	0.18	0.039	0.056	0.14	0.11	0.079	0.15	0.13	0.095	0.11	0.083
	40	0.25	0.07	0.075	0.17	0.13	0.091	0.19	0.16	0.11	0.14	0.077
	60	0.69	0.1	0.16	0.59	0.37	0.29	0.42	0.33	0.24	0.33	0.24
PG	60	0	0.25	0	0.23	0.32	0.29	0	0	0	0	0



**ตารางที่ 4.3** ค่าเฉลี่ยการดูดซับ (S กรัม/กรัม) น้ำมันหล่อลื่นของยางผสมไม่คงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ

Temp. (°C)	NR/Polar compound blends											
	NR	CR	NBR	CR30	CR50	CR70	NBR30	NBR50	NBR70	Starch30	Starch50	Starch70
30	77.44	15.95	0	118	70.32	32.06	140.7	127.4	91.91	55.71	52.92	38.21
40	-	17.14	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	35.5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**ตารางที่ 4.4** ค่าการดูดซับ (S กรัม/กรัม) น้ำมันหล่อลื่นของยางผสมคงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ

Temp. (°C)	NR/Polar compound blends											
	NR	CR	NBR	CR30	CR50	CR70	NBR30	NBR50	NBR70	Starch30	Starch50	
30	142.1	0	0	81.21	53.4	31.52	91.5	55.35	30.97	76.93	57.82	
40	141.6	14.51	0	79.34	48.59	35.72	82.78	53.82	29.8	72.78	43.62	
60	165.3	21.64	0	90.46	69.3	42.23	100.3	67.59	36.36	76.01	47.43	

น้ำมันลดลงทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันเคลื่อนที่เข้าไปได้อย่างสะดวกและมากขึ้น แต่ในกรณีที่มีการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิของตัวทำละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลมาจากกรณีที่อาจมีการเกิดโครงสร้างผลึก (stress-induced crystallinity) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่หนาแน่นขึ้น ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างผลึกที่หนาแน่นและเสถียรได้ยากขึ้น<sup>(26)</sup> แต่ในกรณี NR/starch นั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมัน แบ่งในยางธรรมชาติอาจเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีน้ำหลุดออกมาในช่องว่างของยางผสมจึงทำให้ตัวทำละลายที่มีขั้วถูกดูดซับได้มากขึ้น แต่ตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วและน้ำมันจะถูกดูดซับได้น้อยลง อย่างไรก็ตามการหาค่าการดูดซับในช่วงที่นำกระดาษมาซับตัวทำละลายบนผิวของยางออก ซึ่งอาจกดทับด้วยแรงไม่เท่ากันทำให้การซึมน้ำหนักของยางในแต่ละครั้งอาจเกิดการคลาดเคลื่อนได้

#### 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันในยาง

โดยทั่วไปแล้วการเคลื่อนที่ของของเหลวที่เป็นการแพร่หรือความเร็วของการเคลื่อนที่นี้จะแสดงออกมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) ซึ่งการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นี้สามารถอาศัยกฎการแพร่ของฟิค ได้ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$D = \pi \left[ \frac{h\theta}{4Q_\infty} \right]^2$$

โดยที่ h คือความหนาของแผ่นยาง

$\theta$  คือความชันของกราฟการดูดซับในช่วงเริ่มต้นที่เป็น เส้นตรง

$Q_\infty$  คือจำนวนโมลของตัวทำละลายที่ถูกดูดซับต่อยาง 100 กรัม ที่สภาวะสมดุล

##### 4.4.1 ผลของการทำให้ยางคงรูปต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยาง

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมที่ยังไม่คงรูปในตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันที่อุณหภูมิต่างๆเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมที่คงรูปที่อุณหภูมิต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 30°C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมที่คงรูปแล้วจะมีค่าต่ำกว่ายางผสมที่ไม่คงรูป ดังนั้นการทำให้ยางคงรูปนั้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางลดลง



ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D \cdot 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) ตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันหล่อลื่นของยางผสมคั่งรูปที่อุณหภูมิต่างๆ

Solvent	Temp. (°C)	NR/Polar compound blends										
		NR	CR	NBR	CR30	CR50	CR70	NBR30	NBR50	NBR70	Starch30	Starch50
Xylene	30	5.48	3.89	2.64	4.48	4.4	4.39	4.94	4.82	4.32	3.84	4.63
	40	6.5	5.59	3.76	6.42	6.3	5.71	6.41	6.1	5.13	5.24	5.81
	60	8.88	7.74	7.33	8.25	8.14	7.78	8.74	7.9	7.75	7.68	9.67
Heptane	30	5.2	1.75	0	4.89	4.65	3.76	6.74	7.11	4.46	5.3	6.15
	40	7.67	2.96	0	7.51	6.59	4.3	8.21	8.51	6.59	7.71	7.59
	60	8.23	5.62	0	8.65	7.34	6.96	9.99	10.59	8.61	8.4	7.83
Butyl acetate	30	3.4	2.38	1.55	3.07	2.72	2.57	2.74	2.82	1.97	3.42	3.71
	40	4.84	3.52	2.35	4.52	4.11	3.78	4.23	3.83	3.36	5.17	5.26
	60	5.73	5.34	4.01	6.1	5.67	4.25	5.7	5.47	4.61	5.4	5.87
Octanol	30	0.38	0.063	0.055	0.18	0.16	0.09	0.2	0.21	0.082	0.28	0.28
	40	0.46	0.27	0.22	0.44	0.35	0.3	0.4	0.35	0.29	0.35	0.45
	60	0.9	2.18	1.15	0.46	0.55	0.6	1.39	1.47	1.17	0.87	0.92
PG	60	0	0.01	0	0.005	0.0077	0.0097	0	0	0	0	0
Lubricating oil	30	0.069	0	0	0.055	0.05	0.048	0.066	0.059	0.053	0.064	0.068
	40	0.101	0.023	0	0.14	0.13	0.049	0.11	0.095	0.078	0.12	0.13
	60	0.63	0.16	0	0.37	0.24	0.18	0.53	0.5	0.4	0.67	0.83

#### 4.4.2 ผลของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยาง

จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมที่คงรูปแล้วที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิ 30°C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันไป เนื่องจากสมบัติทางด้านเคมีและทางกายภาพของตัวทำละลายอินทรีย์ที่แสดงในตารางที่ ค.1 แต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิ 30°C ยางธรรมชาติจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในไซลีนมากที่สุด รองลงมาเป็นเฮปเทน บิวทิลอะซิเตท ออกทานอลและน้ำมัน ตามลำดับ แต่ของยางคลอโรพรีนมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในไซลีนมากที่สุด รองลงมาเป็นบิวทิลอะซิเตท เฮปเทน ออกทานอล ตามลำดับ แต่ยางคลอโรพรีนในน้ำมันไม่เกิดการแพร่ ส่วนยางไนไตรล์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในไซลีนมากที่สุดรองลงมาเป็นบิวทิลอะซิเตท และออกทานอลตามลำดับ แต่ยางไนไตรล์ในเฮปเทนและน้ำมันจะไม่เกิดการแพร่ และจะเห็นได้ว่ายางทั้งสามชนิดไม่เกิดการแพร่ในโพไพลีนไกลคอลเลยที่อุณหภูมิ 30°C เพราะมีความมีขั้วสูง และความหนืดสูงนั่นเอง

#### 4.4.3 ผลของสารมีขั้วต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยาง

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของยางผสมที่ไม่คงรูปและคงรูปแล้วในตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันที่อุณหภูมิต่างๆ ทำให้ทราบว่า ที่อุณหภูมิ 30°C ยางธรรมชาติมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในตัวทำละลายอินทรีย์ไม่มีขั้วสูงกว่ายางคลอโรพรีน และยางไนไตรล์ที่มีโครงสร้างทางเคมีที่มีขั้ว เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ มีสมบัติไม่มีขั้วจึงทำให้ไม่ทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว และจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมที่คงรูปแล้วในตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันที่อุณหภูมิต่างๆ ในตารางที่ 4.6 พบว่า เมื่อนำสารมีขั้วคือยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ แบ่งมาผสมเข้ากับยางธรรมชาติแล้ว ที่อุณหภูมิ 30°C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมในตัวทำละลายอินทรีย์มีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารมีขั้วในยางผสมเพิ่มขึ้น ยกเว้น NR/starch ในเฮปเทน ไซลีน และ NR/NBR ที่มีปริมาณ NBR ในยางผสม 30 และ 50% โดยน้ำหนัก ในเฮปเทนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นโดยที่ในไซลีนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำที่สุดคือ NR/starch มีปริมาณแบ่งในยางผสม 30% โดยน้ำหนัก ในเฮปเทนและน้ำมันค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำที่สุดคือ NR/CR ที่มีปริมาณ CR ในยางผสม 70% โดยน้ำหนัก และในบิวทิลอะซิเตทและออกทานอลค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำที่สุดคือ NR/NBR ที่มีปริมาณ NBR ในยางผสม 70% โดยน้ำหนัก แต่ในอัตราส่วนผสมอื่นๆที่อัตราส่วนเดียวแล้วค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในไซลีน เฮปเทน ออกทานอล และน้ำมัน ของ NR/CR ต่ำกว่า NR/NBR และ NR/starch ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ใน บิวทิลอะซิเตท ของ NR/NBR ต่ำกว่า NR/CR และ NR/starch ตามลำดับ

#### 4.4.4 ผลของอุณหภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยาง

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมที่ไม่คงรูปในตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 60°C พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมัน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมเพิ่มขึ้นด้วย เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมที่คงรูปแล้วในตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 60°C ในตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมัน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมเพิ่มขึ้นด้วย และทำให้ยางผสมบางชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่ายางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 30°C แต่กลับมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติเมื่ออุณหภูมิของตัวทำละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้น นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิของเฮปเทนเพิ่มขึ้นเป็น 60°C ทำให้ NR/CR และ NR/NBR ที่มีปริมาณ CR, NBR ในยางผสม 30 และ 70% โดยน้ำหนักตามลำดับมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่ายางธรรมชาติ และเมื่ออุณหภูมิของบิวทิลอะซิเตทเพิ่มขึ้นเป็น 60°C ทำให้ NR/CR ที่มีปริมาณ CR ในยางผสม 30% โดยน้ำหนักมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่ายางธรรมชาติ และเมื่ออุณหภูมิของออกทานอลเพิ่มขึ้นเป็น 60°C ทำให้ยางคลอโรพรีนมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มากที่สุดรองลงมาเป็นยางไนไตรล์และยางธรรมชาติตามลำดับ และที่อัตราส่วนผสมเดียวกัน NR/NBR มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มากที่สุดรองลงมาเป็น NR/starch และ NR/CR ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น 40°C NR/CR ที่มีปริมาณ CR ในยางผสม 30 และ 50% โดยน้ำหนักและ NR/NBR ที่มีปริมาณ NBR ในยางผสม 30% โดยน้ำหนักมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่ายางธรรมชาติ และยางที่คงรูปแล้วคือ CR และ NR/CR ทุกอัตราส่วนผสมจะเกิดการแพร่ในโพลีเอทิลีนไกลคอลที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 60°C

#### 4.5 ค่าพารามิเตอร์อาร์เรเนียส

ผลของการเพิ่มของอุณหภูมิต่อการดูดซับและการแพร่สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น (Activation energy) จากความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius) ดังนี้

$$\log X = \log X_0 - \frac{E_x}{2.303RT}$$

โดยที่ X คือ D (Diffusion coefficient), P (Permeation coefficient)

คำนวณหาค่า Permeation coefficient คือ

$$P = DS \quad (S \text{ คือ ค่าการดูดซับ})$$

โดยค่า P แสดงในตารางที่ 4.7

$X_0$  คือ ค่าคงที่

$E_x$  คือ พลังงานกระตุ้นโดย  $E_D, E_p, \Delta H_s$  คือ พารามิเตอร์พลังงานกระตุ้นของ  
 อาริเนียสในกระบวนการแพร่ และการซึมผ่าน ตามลำดับ

โดยที่  $\Delta H_s = E_p - E_D$  (Heat of sorption)

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ค่าพารามิเตอร์พลังงานกระตุ้นของยางผสมที่คงรูปในตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมัน ได้แสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งจะมีค่าพลังงานกระตุ้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของยางและสมบัติของตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อมีพลังงานกระตุ้นของการแพร่ ( $E_D$ ) สูงนั้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ นั่นคือจะมีความไว (sensitive) ต่อการแพร่ได้ดีที่อุณหภูมิสูงๆ สังเกตได้จากค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ในออกทานอลและน้ำมันของยางผสมมีค่าสูงเมื่อเทียบกับตัวทำละลายอื่นๆ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางผสมในออกทานอล น้ำมันต่ำกว่าตัวทำละลายอื่นๆ ซึ่งพบว่า  $E_D$  ของยางธรรมชาติในตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันมีค่าต่ำกว่ายางคลอโรพรีนและยางไนไตรล์ นั่นคือมีโอกาสเกิดการแพร่ได้มากกว่ายางคลอโรพรีนและยางไนไตรล์ เมื่อนำยางธรรมชาติมาผสมกับสารมีขั้วแล้วพบว่า ในไซลีนและน้ำมัน NR/starch ที่มีปริมาณแบ่งในยางผสม 50% มี  $E_D$  มากที่สุด ในเฮปเทน NR/CR ที่มีปริมาณ CR ในยางผสม 70% มี  $E_D$  มากที่สุด ส่วนในบิวทิลอะซิเตทและออกทานอล NR/NBR ที่มีปริมาณ NBR ในยางผสม 70% มี  $E_D$  มากที่สุด

สำหรับค่าความร้อนในการดูดซับ ( $\Delta H_s$ ) พบว่าถ้า  $\Delta H_s$  เป็นลบแสดงว่าการดูดซับในระบบนั้นเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic process) แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการดูดซับนี้จะมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นมาซึ่งพบที่ยางผสมทุกชนิดในไซลีน และ NR/starch ที่มีปริมาณแบ่งอยู่ในยางผสม 30% โดยน้ำหนัก NR/NBR ทุกอัตราส่วนผสมใน เฮปเทน และยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ ยางผสม NR/CR NR/NBR ที่มีปริมาณ CR และ NBR ในยางผสม 50 และ 70% โดยน้ำหนักในบิวทิลอะซิเตท และ NR/starch ที่มีปริมาณแบ่งในยางผสม 30 และ 50% โดยน้ำหนักในน้ำมัน นอกจากนี้แล้วจะมีค่า  $\Delta H_s$  เป็นบวกซึ่งแสดงว่าการดูดซับในระบบนั้นเป็นกระบวนการดูดความร้อน (Endothermic process) แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการดูดซับนี้ต้องใช้พลังงานความร้อนเข้ามาช่วยทำให้เกิดการดูดซับ

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $P \cdot 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) ตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันหล่อลื่นของยางผสมคกรูปที่อุณหภูมิต่างๆ

Solvent	Temp. (°C)	NR/Polar compound blends										
		NR	CR	NBR	CR30	CR50	CR70	NBR30	NBR50	NBR70	Starch30	Starch50
Xylene	30	21.69	9.4	2.84	14.67	14.17	10.95	14.07	10.6	7.24	10.8	9.08
	40	23.91	11.28	3.92	19.39	18.43	14.55	17.09	13.26	8.11	13.52	11.37
	60	32.59	15.4	7.6	24.82	23.69	19.52	23.14	17.05	12.16	19.66	18.84
Heptane	30	9	0.27	0	4.82	3.23	1.61	7.05	4.63	1.55	5.66	3.91
	40	12.63	0.48	0	7.02	4.5	1.82	8.59	5.32	2.09	6.9	4.11
	60	14.39	0.97	0	8.62	5.73	3.22	9.46	6.11	2.74	8.13	5.58
Butyl acetate	30	6.19	3.17	2.34	5.09	4.69	4.17	4.08	4.23	3.05	3.98	2.77
	40	9.05	4.38	3.04	7.17	6.54	5.63	6.67	5.62	4.45	5.35	3.44
	60	12.31	6.17	4.71	10.62	9.5	5.84	10.02	8.04	6.17	7.06	4.78
Octanol	30	0.09	0.003	0.004	0.03	0.02	0.009	0.04	0.03	0.01	0.04	0.03
	40	0.15	0.02	0.02	0.1	0.059	0.04	0.1	0.07	0.04	0.06	0.04
	60	0.82	0.29	0.24	0.36	0.27	0.23	0.76	0.63	0.28	0.37	0.29
PG	60	0	0.0019	0	0.0008	0.0019	0.0021	0	0	0	0	0
Lubricating oil	30	0.1	0	0	0.04	0.03	0.015	0.06	0.03	0.016	0.05	0.04
	40	0.14	0.002	0	0.11	0.063	0.018	0.09	0.05	0.023	0.09	0.06
	60	1.05	0.03	0	0.33	0.17	0.07	0.53	0.34	0.15	0.51	0.39



ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์พลังงานกระตุ้น ( $E_D$ ,  $E_p$ ,  $\Delta H_s$  kJ/mol) ตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำมันหล่อลื่นของยางผสมคงรูป

Solvent	Parameter	NR/Polar compound blends										
		NR	CR	NBR	CR30	CR50	CR70	NBR30	NBR50	NBR70	Starch30	Starch50
Xylene	$E_D$	13.46	15.7	28.58	16.3	16.52	18.65	15.6	13.53	16.54	19.04	21.57
	$E_p$	11.64	13.81	27.71	14.25	14.07	15.74	13.81	13.03	14.86	16.74	20.59
	$\Delta H_s$	-1.82	-1.89	-0.87	-2.05	-2.45	-2.91	-1.79	-0.5	-1.68	-2.3	-0.98
Heptane	$E_D$	11.74	32.04	-	14.77	11.83	17.71	10.65	10.94	17.59	11.76	6.11
	$E_p$	12.23	35.17	-	15.4	15.36	20.04	7.75	7.52	15.46	9.74	10.38
	$\Delta H_s$	0.49	3.13	-	0.63	3.53	2.33	-2.9	-3.42	-2.13	-2.02	4.27
Butyl acetate	$E_D$	13.73	21.98	26.11	18.44	19.75	13.02	19.57	18.17	22.61	11.5	11.83
	$E_p$	18.47	18.16	19.5	20.11	19.33	8.44	24.21	17.66	19.03	15.55	15.13
	$\Delta H_s$	4.74	-3.82	-6.61	1.67	-0.42	-4.58	4.64	-0.51	-3.58	4.05	3.3
Octanol	$E_D$	24.81	98.07	83.39	23.08	32.99	50.36	54.1	55.85	72.58	32.72	33.44
	$E_p$	63.27	126.38	113.68	67.79	71.93	88.88	83.05	86.37	92.11	64.24	66.16
	$\Delta H_s$	38.46	28.31	30.29	44.71	38.94	38.52	28.95	30.52	19.53	31.52	32.72
Lubricating oil	$E_D$	64.26	-	-	53.07	43.6	35.73	60.18	61.9	58.15	67.66	71.02
	$E_p$	68.38	-	-	57.68	44.82	45.01	62.86	69.73	64.87	66.23	65.82
	$\Delta H_s$	4.12	-	-	4.61	1.22	9.28	2.68	7.83	6.72	-1.43	-5.2

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

การศึกษาการดูดซับและการแพร่ของตัวทำละลายอินทรีย์ 5 ชนิดและน้ำมันหล่อลื่นเข้าไปในยางธรรมชาติที่ผสมสารมีซัว โดยสารมีซัวคือ ยางคลอโรพรีน ยางไนไตรล์ และแป้งมันสำปะหลัง ก่อนและหลังการคงรูปของยาง ซึ่งอิทธิพลของตัวแปรต่างๆคือ ตัวทำละลายอินทรีย์ สารมีซัว และอุณหภูมิ ที่มีต่อค่าการดูดซับ สัมประสิทธิ์การแพร่ และพลังงานกระตุ้น อีกทั้งสมบัติทางกายภาพของยางผสมที่เตรียมได้ สามารถสรุปได้ดังนี้

สารมีซัวทำให้เกิดความต้านทานในการถ่ายโอนตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีซัวได้ และการทำให้ยางคงรูปจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง และเป็นการป้องกันไม่ให้ง่ายเกิดการละลายได้

การดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แต่ในโพลีโพลีไกลคอลซึ่งเป็นสารที่มีซัวสูงและมีความหนืดสูงมากทำให้ไม่สามารถเกิดการถ่ายโอนมวลสารได้ที่อุณหภูมิที่ 30 และ 40°C

ค่า  $E_D$  ของยางผสมในน้ำมันและออกทานอลจะมีความมากกว่าในตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ แสดงให้เห็นว่าการถ่ายโอนมวลสารนี้เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง

สารมีซัวมีผลทำให้สมบัติทางกายภาพของยางผสมเปลี่ยนแปลง

#### ข้อเสนอแนะ

ปรับปรุงวัสดุยางผสมที่ทำมาจากยางธรรมชาติผสมกับวัสดุอื่นๆให้มีสมบัติต้านทานน้ำมันและตัวทำละลายไม่มีซัวให้ดีขึ้นได้ด้วยการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบต่างๆในวัสดุยางผสม แล้วทำการพิจารณาจากการถ่ายโอนสารเข้าไปในวัสดุยางผสม และเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของวัสดุยางผสมก่อนและหลังการแช่

## รายการอ้างอิง

1. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. เทคโนโลยียาง. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
2. Roberts, A.D. Natural rubber Science and Technology. Brickendonbury: Oxford University Press, 1988.
3. Stem, H.J. Rubber: Natural and Synthetic. 2nd ed. Palmerton Publishing, 1967.
4. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. เทคโนโลยียางสังเคราะห์. เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรเทคโนโลยียางธรรมชาติ สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2542.
5. พลชิต บัวแก้ว. เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรเทคโนโลยียางแห้ง. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2542.
6. พายัพ นามประเสริฐ. Introduction to Rubber technology. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2535.
7. Murray, R.M., and Thompson. The Neoprene. E.I. DuPont de Nemours & Co., 1963.
8. Werner Hofmann. Rubber technology Handbook. New York: Hanser, 1980.
9. Morton, M. Rubber Technology. New York: Van Nostrand, 1973.
10. กล้าณรงค์ ศรีรอด. เทคโนโลยีแป้ง. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.
11. Nagdi, K. Rubber as Engineer Material: Guideline for Users. Munich: Hanser, 1933.
12. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร. สมบัติของพอลิเมอร์. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
13. Awcock, G.J., and Thomus, R. Applied image processing. International edition. New York: McGraw-Hill, 1996.
14. Robert, C., and Weast. CRS Handbook of Chemistry and Physics. 68th ed. Florida: CRS Press, 1996.
15. Jame, E., and Mark. Physical Properties of Polymers Handbook. New York: AIP Press. 1996.
16. รัตนา จิระรัตนานนท์. การถ่ายภาพ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี: กรุงเทพฯ, 2538.
17. Bennett, C.D., and Myers, J.E. Mass transfer with turbulent flow. Momentum heat and Mass transfer. 3rd ed. McGraw-Hill, 1982.

18. คัทลียา ชะโรจน์บวรน์. การถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ช่วย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิคบัณฑิตวิทยาลัย, 2539.
19. ชุติมา โชติเวชย์ศิลป์. กระบวนการทัศนภาพเพื่อการประเมินการถ่ายโอนไฮโดรคาร์บอนเหลวเข้าไปในยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิคบัณฑิตวิทยาลัย, 2541.
20. พรพรรณ นิธิอุทัย. ยาง: เทคนิคการออกสูตรยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย: ปัตตานี, 2538.
21. Taverdet, J.L., and Vergnaud, J.M. Study of transfer process of liquid into and plasticizer out of plasticized PVC by using short tests. J. of applied polymer science. 29 (1984): 3391-3400.
22. Ismail, H., and Leong, H.C. Curing characteristics and mechanical properties of NR/CR and epoxidized NR/CR blends. Polymer Testing. 20(2000): 509-516.
23. Harogoppad, S.B. and Aminabhavi, T.M. Diffusion and sorption of organic liquids through polymer membranes II Neoprene, SBR, EPDE, NBR and NR versus n-alkane. J. of applied polymer science. 42(1991)2329-2336.
24. Unnikrishnar, G., and Sabu Tomas. Sorption and diffusion of aliphatic hydrocarbons into crosslinked natural rubber. J. of polymer science B: Polymer physic. 35(1997)725-734.
25. Claramma, N.M., Mathew, N.M., and Thomas, E.V. Radiation induce graft copolymerization of acrylonitrile on natural rubber. Radiation physics and chemistry. 33(1989): 87-89.
26. Shivaputrappa B. Harogoppad and Tejrj Aminabbhavi. Sorption of organic liquids through polymer membranes VIII. elastomers versus monocyclic aromatic liquids. J. of applied polymer science. 46(1992)725-732.
27. Ismail, H., and Poh, B.T. Curing characteristics of NBR/NR blends. Polymer-Plastic Technology and Engineering. 40(2001)451-462.
28. Chantippimarn, S. Composite material from natural rubber and stick rice flour. Master's thesis, Program of Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of science, Chulalongkorn University, 2001.
29. Du Pont. Engineering properties of Du Pont: Neoprene.
30. PI Industry. Produce data of PI Industry: N220SH.

31. การปีโตรเลียมแห่งประเทศไทย. น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซิน. ผลิตภัณฑ์แห่งสหรัษฎวรรษ, 2543.
32. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร. เอกสารฉบับที่ 135. 2530.
33. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. การออกสูตรยางและกระบวนการการผลิต. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรเทคโนโลยียาง(ยางสังเคราะห์) ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2542.
34. Mark, J.E., Erman, B. and Eirich, F.R. Science and Technology of Rubber. 2nd ed. Sandiago. Academic Press, 1994.
35. นุชนาถ ฅ ระนอง. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยาง. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรเทคโนโลยียางธรรมชาติ สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2542.
36. ปรีชา ป็องภัย. การทดสอบยางและผลิตภัณฑ์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวิทยาลัย: ปีตธานี, 2534.
37. Brandrup, J., Immergut, E.H., and Grulke, E.A. Polymer Handbook. 4th ed. John Wiley & Sons, 1999.
38. John A. Denn. Lange's handbook of chemistry. 20th ed. McGraw-Hill, 1979.
39. นิตส์น จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

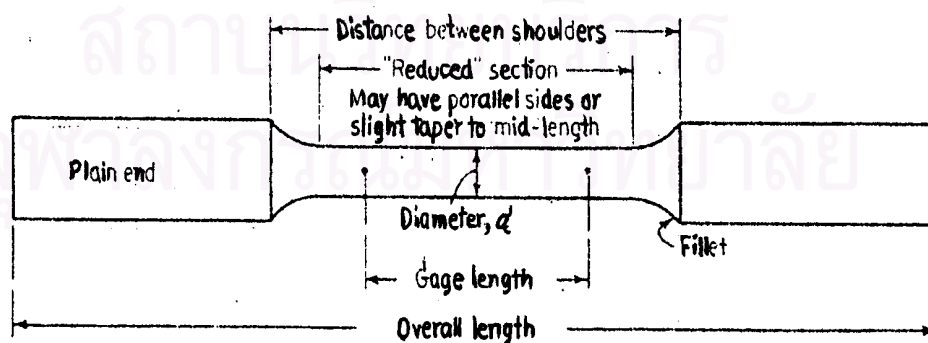
### การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

#### 1. ความต้านทานแรงดึง<sup>(35),(36)</sup>

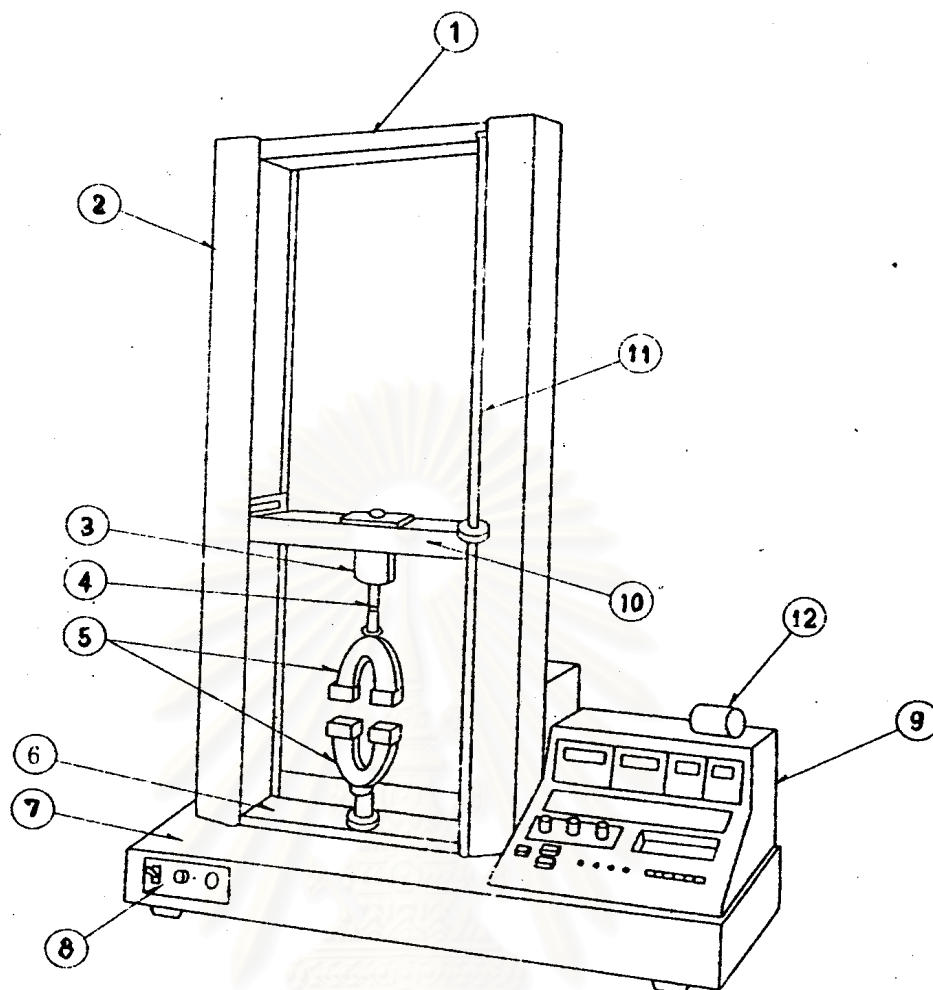
การทดสอบยางโดยการดึงให้ยืดออก เป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายและนิยมใช้กันมากเพราะผลที่ได้สามารถบอกถึงสมบัติเชิงกลพื้นฐานของยางเช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความเหนียว ความเปราะและลักษณะการแตกหัก หรือฉีกขาดของยาง

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น (sheet curve) มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำแผ่นยางที่ได้มาตัดด้วยเครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม (compress air sample cutter) ให้เป็นรูปดัมเบลล์ดังแสดงในรูปที่ ก.1 โดยจะตัดชิ้นงานทางด้านแนวเครื่องคือ ตัดชิ้นงานให้ดึงตามแนวที่ยางถูกบดออกมา จากนั้นนำมาทดสอบหาสมบัติความต้านทานแรงดึงโดยใช้ Load cell ขนาด 500 นิวตัน โดยมีเลเซอร์เป็นอุปกรณ์วัดความยืดของยาง ชุดเครื่องดังแสดงในรูปที่ ก.2 ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกผลการทดสอบและสามารถพิมพ์ผลการทดสอบลงบนเครื่องพิมพ์ได้

ก่อนทำการทดสอบชิ้นงานจะต้องวัดความหนาโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่สามารถวัดได้ละเอียด  $\pm 0.005$  มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานมายึดจับด้วยหัวจับ (grip) ลักษณะของชิ้นงาน การจับ และการยืดออกแสดงดังรูป ก.3 เมื่อเริ่มทดสอบ หัวจับด้านบนจะเลื่อนขึ้น ขณะที่หัวจับด้านล่างอยู่กับที่ แรงที่ใช้ดึงชิ้นงานตลอดระยะยืดออกจะถูกบันทึกไว้จนยางถูกยืดจนขาด



รูปที่ ก.1 การเรียกชื่อส่วนต่างๆ ของชิ้นทดสอบความทนแรงดึง<sup>(39)</sup>



- |                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| 1. Crossyoke              | 7. Beep          |
| 2. Column                 | 8. Power switch  |
| 3. Load cell              | 9. Controller    |
| 4. Universal joint (U.J.) | 10. Crosshead    |
| 5. Chuck                  | 11. Limit SW rod |
| 6. Table                  | 12. Printer      |

รูปที่ ก.2 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบความทนแรงดึงแบบหนึ่ง<sup>(39)</sup>

พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุส่วนมากขึ้นกับเวลา ดังนั้นต้องคำนึงถึงความเร็วที่ให้ความเค้นด้วยเช่น ถ้าดึงวัสดุอย่างรวดเร็วทันทีทันใด อาจทำให้วัสดุขาดออกได้ แต่ถ้าใช้แรงเท่ากันนั้นดึงช้าๆอาจทำให้วัสดุเพียงแต่ยืดออกเท่านั้น ความต้านทานต่อการขาดสูงขึ้น



ความเค้นดึง (tensile stress) หมายถึง แรงดึงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เดิมของชิ้นทดสอบ

$$S = F/A$$

โดย S เป็นความเค้นดึง (MPa หรือ N/mm<sup>2</sup>)

F เป็นแรงดึง (N, นิวตัน)

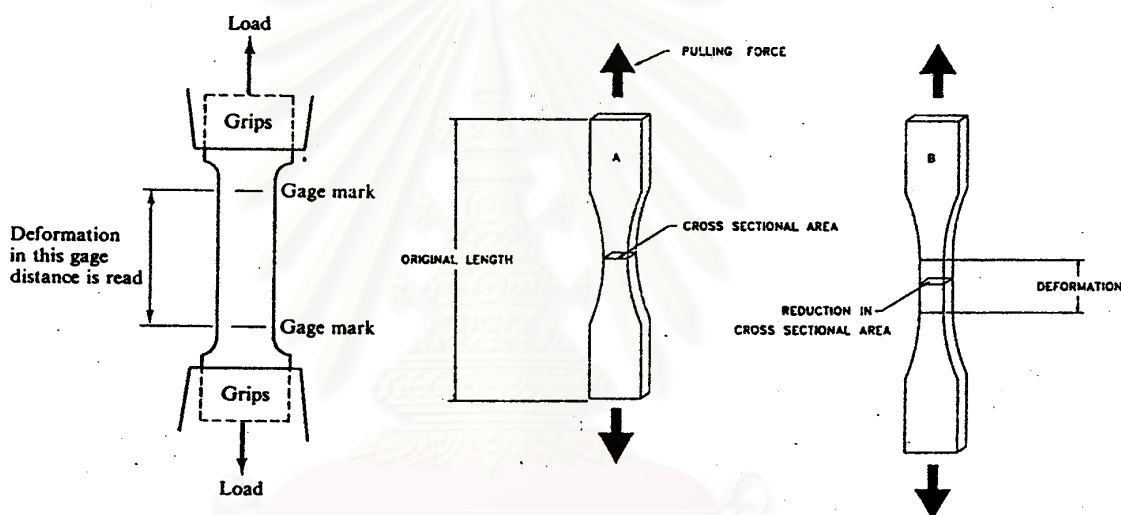
A เป็นพื้นที่หน้าตัดเดิม (mm<sup>2</sup>, ตารางมิลลิเมตร)

โมดูลัส (modulus) หมายถึง ความเค้นดึงที่ความยืดที่กำหนด

เช่น โมดูลัส 300% คือ ความเค้นที่ความยืด 300%

$$\text{โมดูลัส } 300\% = F_m/A$$

เมื่อ  $F_m$  เป็นแรงดึงที่ทำให้ยางยืดออก 300% (N)

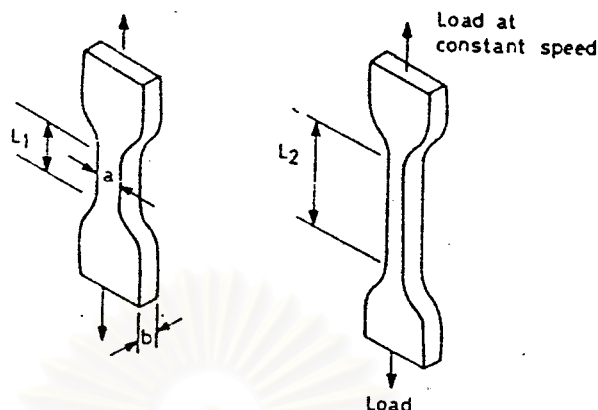


รูปที่ ก.3 ลักษณะของชิ้นงาน การจับ และการยืดออก<sup>(39)</sup>

ดังนั้น การหาความทนแรงดึงหาได้จากความเค้นที่จุดขาดของชิ้นทดสอบ ซึ่งเท่ากับแรงหารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางเริ่มต้น  $a \times b$  ตามรูปที่ ก.4

ความยืดเมื่อขาดหรือความยืดสูงสุด (elongation at break) หมายถึง ส่วนยืดเมื่อขาดหรือส่วนยืดสูงสุด ซึ่งการหาเปอร์เซ็นต์การยืดได้จาก (ความยาวที่เพิ่มขึ้น/ความยาวเดิม) $\times 100$  หรือ

$(L_2 - L_1) \times 100 / L_1$  ตามขนาดที่แสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 ขนาดต่างๆของชิ้นงานเมื่อมีการทดสอบความทนแรงดึง<sup>(39)</sup>

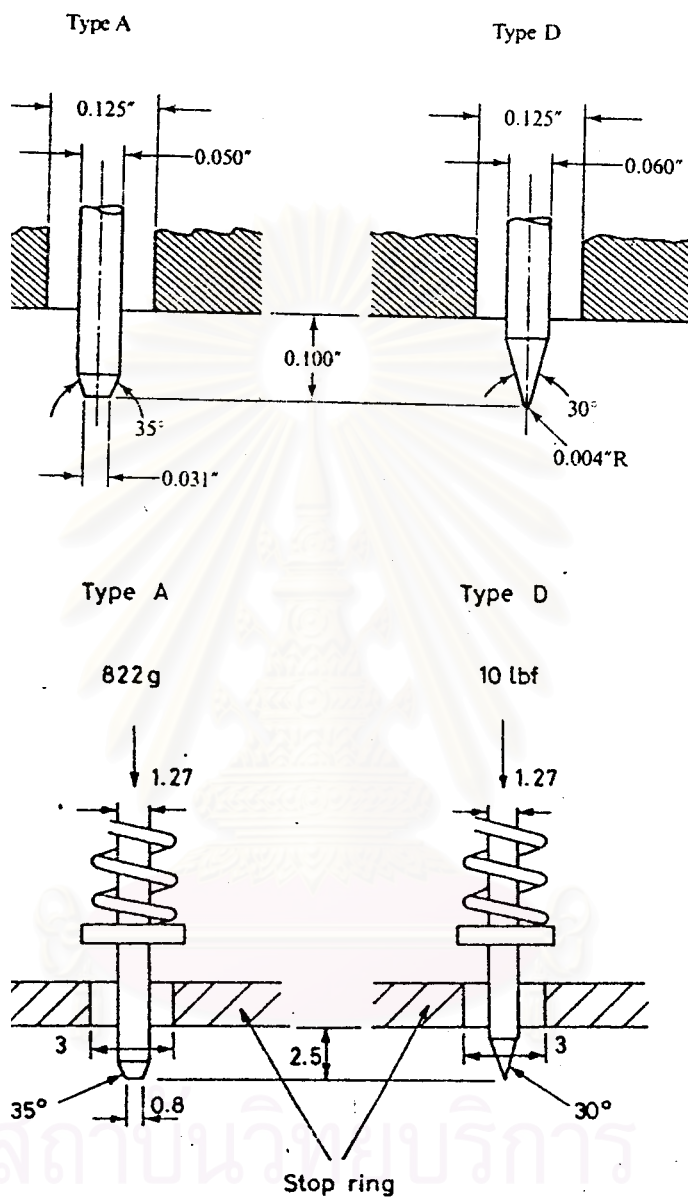
## 2. ความแข็ง (Hardness)<sup>(39)</sup>

การทดสอบความแข็งโดยใช้เครื่องกดแบบชอร์ (Shore durometer) ซึ่งมี 2 แบบ คือ แบบ A และแบบ D ซึ่งมีขนาดส่วนต่างๆของหัวกด ดังรูปที่ ก.5

แบบ A ใช้สำหรับยางและพลาสติกอ่อน แบบ D ใช้สำหรับพลาสติกแข็ง หัวกดทั้งสองแบบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน แต่รูปร่างส่วนปลายหัวกดแตกต่างกัน หัวกดจะถูกกดเข้ากับพื้นผิวของวัสดุต้านกับความต้านทานของสปริงที่ให้แรงกดมากที่สุด 822 กรัม สำหรับแบบ A และ 10 ปอนด์สำหรับแบบ D

เครื่องกดแบบชอร์มีลักษณะคล้ายนาฬิกาจับเวลา ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงประมาณ 2.5 นิ้ว มีเข็มและสเกลความแข็งชอร์บนหน้าปัด เมื่อกดหัวกดเข้ากับวัสดุสามารถอ่านค่าความแข็งได้ทันทีบนหน้าปัด ยางรถยนต์มีค่าความแข็งชอร์แบบ A ประมาณ 70 ยางที่แข็งมากกว่ายางรถยนต์ใช้เครื่องกดชอร์แบบ D วัด ในงานวิจัยนี้ใช้ชอร์แบบ A

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.5 หัวกัดแบบ A และ D สำหรับเครื่องกัดแบบซอริ<sup>(39)</sup>

## ภาคผนวก ข

## สมบัติทางฟิสิกส์ของพอลิเมอร์

ตาราง ข.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของยางไนไตรล์ ที่อุณหภูมิ 25°C 1 atm<sup>(37)</sup>

Property	Unit	Unvulcanized	Pure-gum vulcanizate
Density	kg/m <sup>3</sup>	-	0.95 (20%) 1.02 (45%)
Temperature glasstransition, Tg	°C	-	-85+A(20-40%) A=(AN%)
Solubility parameter	MPa <sup>1/2</sup>	18.5-21.0 (18-39%)	-
Refractive index	N <sub>D</sub>	-	1.519 (20%) 1.521 (45%)
Dielectric constant (10 <sup>6</sup> Hz)	-	-	5.5 (27%) 4.8 (40%)

ตาราง ข.2 สมบัติทางฟิสิกส์ของยางคลอโรพรีน ที่อุณหภูมิ 25°C 1 atm<sup>(37)</sup>

Property	Unit	Unvulcanized	Pure-gum vulcanizate
Density	kg/m <sup>3</sup>	1230	1320
Temperature glasstransition, Tg	°C	-45	-45
Solubility parameter	MPa <sup>1/2</sup>	18.5	-
Refractive index	N <sub>D</sub>	1.558	-
Dielectric constant (10 <sup>6</sup> Hz)	-	-	6.5-8.1

ตาราง ข.3 สมบัติทางฟิสิกส์ของยางธรรมชาติ ที่อุณหภูมิ 25°C 1 atm.<sup>(37)</sup>

Property	Unit	Unvulcanized	Pure-gum vulcanizate
Density	kg/m <sup>3</sup>	913	970
Temperature glasstransition, Tg	°C	-72	-63
Solubility parameter	MPa <sup>1/2</sup>	17	-
Refractive index	N <sub>D</sub> K <sup>-1</sup>	1.5191	1.5264
Dielectric constant (1 kHz)	-	2.37-2.45	2.68

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

## สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวทำละลายอินทรีย์

ตาราง ค.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของตัวทำละลายอินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 20°C<sup>(38)</sup>

Substance	Density (g mL <sup>-3</sup> )	Refractive index (N <sub>D</sub> )	Viscosity (mN.s.m <sup>-2</sup> )	Dielectric constant	Dipole moment D
1-Heptane	0.697	1.3999	0.35	2.07	0.34
Butyl acetate	0.8813	1.3941	0.734	5.01	1.84
1- octanol	0.8258	1.4296	6.125 <sup>30</sup>	10.34	1.68
1,2 Propanediol	1.0364	1.4329	56	32	2.25
o-xylene	0.8802	1.5054	0.809	2.57	0.65
m-xylene	0.8642	1.4972	0.617	2.37	0.37
p-xylene	0.8611	1.4958	0.644	2.27	0

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และการซึมผ่าน ค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการแพร่และการซึมผ่าน และค่าความร้อนในการดูดซับ

ข้อมูลที่นำมาเป็นตัวอย่างนี้เป็นข้อมูลจากการทดสอบการดูดซับและการแพร่ของยางธรรมชาติที่ผ่านการคงรูปแล้วในเฮปแทน ที่อุณหภูมิ 30°C

#### 1. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D)

อาศัยกฎการแพร่ของฟิค โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$D = \pi \left[ \frac{h\theta}{4Q_\infty} \right]^2$$

โดยที่  $h$  คือความหนาของแผ่นยาง (มิลลิเมตร)

$\theta$  คือความชันของกราฟการดูดซับซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลตัวทำละลายอินทรีย์ที่ถูกดูดซับในยาง 100 กรัมกับ (เวลา)<sup>1/2</sup> ในช่วงเริ่มต้นที่เป็นเส้นตรง (โมล/(นาที่)<sup>1/2</sup>)

$Q_\infty$  คือจำนวนโมลของตัวทำละลายที่ถูกดูดซับต่อยาง

100 กรัม ที่สภาวะสมดุล (โมล)

แทนค่า

$$D = \pi \left[ \frac{(1.8)(0.12)}{(4)(1.73)} \right]^2$$

$$= 3.12 \cdot 10^{-3} \text{ มิลลิเมตร}^2 / \text{นาที่}$$

หรือ

$$= 5.20 \cdot 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}^2 / \text{วินาที}$$

## 2. การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P)

หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P = DS$$

โดยที่ D คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ( เซนติเมตร<sup>2</sup>/วินาที)

S คือน้ำหนักตัวทำละลายอินทรีย์ที่ถูกดูดซับ(กรัม)ต่อยาง 1 กรัม

แทนค่า 
$$P = (5.2 \times 10^{-7})(1.73) \left[ \frac{(100)}{(100)} \right]$$
 น้ำหนักโมเลกุลของเฮปเทนคือ 100

$$P = 9.00 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}^2/\text{วินาที}$$

## 3. การคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการแพร่( $E_D$ )และการซึมผ่าน( $E_p$ )

จากความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius) ดังนี้

$$\log X = \log X_0 - \frac{E_x}{2.303RT}$$

โดยที่ X คือ D (Diffusion coefficient), P (Permeation coefficient)

$X_0$  คือ ค่าคงที่

$E_x$  คือ พลังงานกระตุ้นโดย  $E_D, E_p$  คือพารามิเตอร์พลังงานกระตุ้นของ

อาร์เรเนียสในกระบวนการแพร่ และการซึมผ่าน ตามลำดับ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

จากสมการนี้สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log D$  และ  $1/T$  จึงสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการแพร่ได้เป็น

$$E_D = 11.74 \text{ กิโลจูล/โมล}$$



และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log P$  และ  $1/T$  จึงสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการซึมผ่านได้เป็น

$$E_p = 12.23 \text{ กิโลจูล/โมล}$$

#### 4. การคำนวณหาค่าความร้อนในการดูดซับ ( $\Delta H_s$ )

โดยที่

$$\Delta H_s = E_p - E_D$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \Delta H_s &= 12.23 - 1.74 \\ &= 0.49 \text{ กิโลจูล/โมล} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปิยดา ยศสุนทร เกิดวันที่ 4 เมษายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ที่ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย