

การถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ช่วย



นางสาว คัทลียา ชะโรจน์บวร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-637-994-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

28 ส.ค. 2545

I 1407406x

**CARBON DIOXIDE ASSISTED TRANSFER OF ORGANIC COMPOUNDS
INTO NATURAL RUBBER**



Miss Cathaleeya Charoibowon

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
For the Degree of Master of Science in Chemical Technology
Department of Chemical Technology**

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1997


ISBN 974-637-994-1

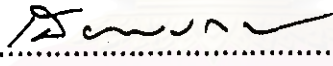
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์
ช่วย
โดย นางสาว คัทลียา ชะโรจน์บวร
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.เพ็ชรพรศ ทศคร


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

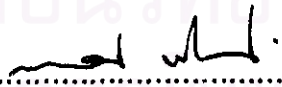

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภาวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.เพ็ชรพรศ ทศคร)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูชาติ บารมี)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงพันธ์ เปี่ยมสมบูรณ์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ศัทธิตยา ระโจจันมวร : การถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ช่วย
(CARBON DIOXIDE ASSISTED TRANSFER OF ORGANIC COMPOUNDS INTO NATURAL RUBBER)

อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. เพ็ญพรทศ ทศกร ; 136 หน้า. ISBN 974-637-994-1.

การศึกษากการถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวพา ผลการทดลองแสดงว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่แทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติไม่ทำให้โมเลกุลยางเปลี่ยนแปลง เมื่อบดยางโดยวิธีกลเป็นเวลาานาน 15 นาที ความหนืดของน้ำและน้ำหนักโมเลกุลลดลงร้อยละ 20 และ ร้อยละ 32 ของค่าเริ่มต้นตามลำดับ และทำให้ไซพาราฟินและโพรพิลีนไกลคอลสามารถแทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติได้มากขึ้น

ที่อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียสและความดัน 80 บาร์ พบว่าไซพาราฟินสามารถแทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารอื่นที่ใช้ในการทดลอง คิดเป็นสัดส่วน 47 phr เมื่อใช้เวลา 60 นาทีและทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 89 ของค่าเริ่มต้น ในขณะที่เดียวกันมีการยืดออกเมื่อขาดลดลงร้อยละ 82 ด้วย ในสภาวะเดียวกันโพรพิลีนไกลคอลสามารถแทรกซึมเข้าไปได้เพียง 1.4 phr และทำให้ยางมีการยืดออกเมื่อขาดเพิ่มขึ้นร้อยละ 60 ของค่าเริ่มต้น ในขณะที่ความต้านทานแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลง

การทดลองที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล เพราะโพรพิลีนไกลคอลเป็นโมเลกุลมีขนาดเล็ก ที่สามารถแทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติได้น้อยมากในสภาวะปกติ ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะเหนือจุดวิกฤตจึงเป็นตัวพาที่ดีที่สุดที่ช่วยให้โพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมเข้าไปได้มากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิสิต *ศัทธิตยา ระโจจันมวร*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *เพ็ญพรทศ ทศกร*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

3970202623

CHEMICAL TECHNOLOGY

#

: MAJOR

KEY WORD:

NATURAL RUBBER / SUPERCRITICAL / CARBON DIOXIDE / PENETRATION

CATHALEEYA CHAROJBOWON : CARBON DIOXIDE ASSISTED TRANSFER OF ORGANIC

COMPOUNDS INTO NATURAL RUBBER. THESIS ADVISOR : PIENPAK TASAKORN, Ph.D. 136 pp. ISBN

974-637-894-1.

Transportation of organic compounds into natural rubber by supercritical carbon dioxide indicates that the carbon dioxide has no effect on rubber molecules. When rubber is masticated mechanically for 15 minutes, its mooney viscosity and molecular weight is reduced by 20% and 32% from its initial value respectively. This facilitates penetration of paraffin wax and propylene glycol into natural rubber in a higher quantity.

At 59°C and 80 bar, paraffin wax penetrates into natural rubber at 47 phr, after 60 minutes, which is the highest when compares with other organic compounds. It also increases the green strength of natural rubber by 89% of its initial value and decreases the elongation at break by 82%. At the same condition, propylene glycol penetrates into natural rubber only at 1.4 phr, and the elongation at break of the rubber is increased by 60% without changing the green strength.

Experiments at various conditions indicated that the temperature had a slight effect on penetration of paraffin wax into natural rubber. On the contrary, the temperature and pressure showed profound effects on the penetration of propylene glycol. This is because the small polar molecules may penetrate into the natural rubber in a minute quantity at normal conditions. Thus, supercritical carbon dioxide acts as a good carrier that enhances the penetration of propylene glycol into the natural rubber.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค

สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา.....2540

ลายมือชื่อนิสิต.....อุทิศ ส.โคกนิเวศ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.เพียรพรรค ทศคร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การสอน คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือทุกอย่างให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดีทุกอย่าง
ขอบคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกเรื่องการใช้ห้องปฏิบัติการ การเบิกจ่ายเครื่องมือ สารเคมี การซ่อมสร้างอุปกรณ์ทดลอง ในการทำวิจัยครั้งนี้จนสามารถดำเนินการวิจัยได้ตีมาตลอด

ขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาชีวเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล สหสาขาวิชาปิโตรเคมีและพอลิเมอร์ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมีแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดลองเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่น้องชาวเคมีเทคนิค รวมทั้งผู้อยู่เบื้องหลังทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการทำวิจัยและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

	บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
	กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
	สารบัญตาราง.....	ญ
	สารบัญรูป.....	ฐ
	บทที่	
1	บทนำ.....	1
	1.1 วัตถุประสงค์.....	4
	1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	4
	1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	4
2	วารสารปริทรรศน์.....	5
	2.1 ของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤต.....	5
	2.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ.....	19
	2.3 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	22
	2.4 สมบัติของยางและการใช้งาน.....	24
	2.5 ยางผง.....	29
	2.6 งานวิจัยในอดีต.....	35
	2.7 การถ่ายเทมวล.....	37
3.	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	44
	3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	44
	3.2 เครื่องมือวัด.....	45
	3.3 ยางธรรมชาติและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	46
	3.4 การดำเนินการวิจัย.....	52
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	56
	4.1 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติพันธุ์ ต่างๆ.....	56

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

4.2	ผลของความดันและอุณหภูมิต่อสัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ น้ำหนักยางทั้งหมด.....	61
4.3	ผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	63
4.4	การบดยางด้วยเครื่องบดผลมยาง.....	65
4.5	การถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ สถานะเหนือจุดวิกฤต.....	67
4.6	ผลของความหนืดมูนี้ต่อปริมาณการแทรกซึมไฮทราฟีนและ โพรพิลีนไกลคอล.....	70
4.7	ไฮทราฟีน.....	73
4.8	โพรพิลีนไกลคอล.....	82
4.9	ผลของอายุตัวอย่างต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด.....	91
4.10	การทำให้ยางเป็นเม็ด.....	93
5	สรุปผลการทดลอง.....	94
5.1	น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ พันธุ์ต่างๆ.....	94
5.2	ผลของความดันและอุณหภูมิต่อสัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ น้ำหนักยางทั้งหมด.....	94
5.3	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	94
5.4	การบดยางด้วยเครื่องบดผลมยาง.....	95
5.5	การถ่ายโอนสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤต.....	95
5.6	ผลของความหนืดมูนี้ต่อปริมาณการแทรกซึมไฮทราฟีนและ โพรพิลีนไกลคอล.....	95
5.7	ไฮทราฟีน.....	96
5.8	โพรพิลีนไกลคอล.....	97

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	
5.9 ผลของอายุตัวอย่างต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด.....	98
5.10 การทำยางให้เป็นเม็ด.....	98
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของคาร์บอนไดออกไซด์.....	104
ภาคผนวก ข สมบัติทางฟิสิกส์ของสารอินทรีย์.....	107
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลอง.....	111
ภาคผนวก ง วิธีทดสอบ.....	129
ภาคผนวก จ ตัวอย่างการคำนวณ.....	134
ประวัติผู้เขียน.....	136

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่	
2.1	ข้อมูลสภาวะวิกฤตของสารชนิดต่างๆ.....6
2.2	สมบัติทางฟิสิกส์ของของไหลสภาวะเหนือจุดวิกฤตเปรียบเทียบกับแก๊ส และของเหลว.....7
2.3	ข้อกำหนดของคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับงานลัดสาร.....12
2.4	ผลของการลดโปรตีนต่อปริมาณแฉลและค่าความต้านทานแรงดึงของยาง.....20
2.5	แสดงการคำนวณน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย.....23
2.6	ผลของเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกลของยาง.....25
2.7	พลังงานจำเพาะที่เก็บสะสมในตัวของวัตถุ.....27
2.8	สมบัติของกายภาพของยางผลผสมสารเคมีที่ได้จากยางผง.....30
2.9	แสดงการกระจายขนาดอนุภาคเม็ดยาง.....31
3.1	พันธู์ยางตัวอย่างจากสวน.....46
4.1	แสดงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางพันธุ์ต่างๆ.....56
4.2	แสดงน้ำหนักโมเลกุลของยางที่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....63
4.3	แสดงค่าความหนืดมูนิและน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางบดที่เวลาต่างๆ.....65
4.4	น้ำหนักโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง.....67
4.5	แสดงความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาดของยางเมื่อเทียบกับ ยางธรรมชาติ.....68
4.6	ผลการคำนวณค่าคงที่ของการแทรกซึมไฮพาราฟินเข้าไปในยางธรรมชาติ.....78
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า $x/\sqrt{\alpha}$ ของการแทรกซึมไฮพาราฟิน.....78
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการแทรกซึมของไฮพาราฟิน เฉลี่ยที่ t_{oc}78
4.9	ผลการคำนวณค่าคงที่ของการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอลเข้าไปใน ยางธรรมชาติ.....87
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า $x/\sqrt{\alpha}$ ของการแทรกซึม โพรพิลีนไกลคอล.....87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการแทรกซึมของโพรพิลีนไกลคอล	
เฉลี่ยที่ ∞	78
ข.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของสารอินทรีย์.....	108
ข.2 สมบัติของไซพาราฟิน.....	110
ค.1 แสดงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากยางแผ่นธรรมชาติ.....	112
ค.2 แสดงผลการคำนวณสัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยาง	
ทั้งหมด.....	114
ค.3 ข้อมูลการทดลองการแทรกซึมไซพาราฟินและโพรพิลีนไกลคอลที่อุณหภูมิ 59	
องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ เวลา 60 นาที.....	116
ค.4 ความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาดของยางบดที่มีไซพาราฟินแทรก	
ซึมอยู่.....	116
ค.5 ความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาดของยางบดที่มี	
โพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมอยู่.....	116
ค.6 ข้อมูลการทดลองการขนถ่ายสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติที่	
อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส ความดัน 80 บาร์ เวลา 60 นาที.....	117
ค.7 ข้อมูลการทดลองผลของความดันต่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟิน	
ที่อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส เวลา 60 วินาที.....	117
ค.8 ข้อมูลการทดลองผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟิน	
ที่ความดัน 80 บาร์.....	118
ค.9 ข้อมูลการทดลองผลของปริมาณไซพาราฟินต่อความต้านทานแรงดึง	
และการยืดออกเมื่อขาดที่ความดัน 80 บาร์.....	119
ค.10 ข้อมูลการทดลองผลของปริมาณไซพาราฟินต่อความต้านทานแรงดึง	
และการยืดออกเมื่อขาดที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส.....	120
ค.11 ข้อมูลการทดลองผลของความดันต่อปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล	
ที่อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส เวลา 60 วินาที.....	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

ค.12 ข้อมูลการทดลองผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล ที่ความดัน 80 บาร์.....	121
ค.13 ข้อมูลการทดลองผลของปริมาณโพรพิลีนไกลคอลต่อความต้านทานแรงดึง และการยืดออกเมื่อขาดที่ความดัน 80 บาร์.....	122
ค.14 ข้อมูลการทดลองผลของปริมาณโพรพิลีนไกลคอลต่อความต้านทานแรงดึง และการยืดออกเมื่อขาดที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส.....	123
ค.15 ข้อมูลการทดลองผลของอายุตัวอย่างต่อความต้านทานแรงดึงของยาง ธรรมชาติเปรียบเทียบกับยางที่มีไซพาราฟินและโพรพิลีนไกลคอล แทรกซึมอยู่.....	124
ค.16 ข้อมูลการทดลองผลของอายุตัวอย่างต่อการยืดออกเมื่อขาดของยาง ธรรมชาติเปรียบเทียบกับยางที่มีไซพาราฟินและโพรพิลีนไกลคอล แทรกซึมอยู่.....	124
ค.17 ข้อมูลการทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 59 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที.....	125
ค.18 ข้อมูลการทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของยางธรรมชาติที่ความดัน 80 บาร์ เวลา 60 นาที.....	125
ค.19 เปรียบเทียบการแทรกซึมไซพาราฟินที่ได้จากการทดลองและจากการ คำนวณ.....	126
ค.20 เปรียบเทียบการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอลที่ได้จากการทดลองและจากการ คำนวณ.....	126
ง.1 แสดงค่า error function และฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง.....	133

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์.....	15
2.2 ประสิทธิภาพของการสกัดด้วยของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตในการสกัด น้ำมันถั่วเหลืองเมื่อใช้ผงเมล็ดถั่วเหลืองที่มีขนาดต่างๆ กัน.....	15
2.3 ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของ naphthalene ในคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความหนาแน่นคงที่ต่างๆ กัน.....	16
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนาแน่น และความดันในรูปของตัว แปรลดทอน.....	16
2.5 ความหนาแน่นเท่ากัน ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ของคาร์บอนไดออก ไซด์ โดยแสดงเป็นสามมิติของเฟสไดอะแกรม.....	17
2.6 แก๊สโครมาโตแกรมของสารจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติซึ่งสามารถสกัดได้ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤตที่สภาวะต่างๆ.....	17
2.7 พลังการทำละลายของของไหลสถานะเหนือจุดวิกฤตและตัวทำละลาย ปกติในรูปของ Hildebrand solubility parameter.....	18
2.8 การลดโปรตีนและการเกิดพรีนาเอสเทอร์ฟิเคชันในยางธรรมชาติ.....	21
2.9 Turbo-rapid mixer.....	34
2.10 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เวลาสั้นๆ สองจุด.....	42
2.11 ความคล้ายคลึงกันเมื่อเปลี่ยนตัวแปร.....	42
2.12-2.15 ภาพแสดงการถ่ายเทมวลสารเข้าไปในอนุภาคยางธรรมชาติ.....	43
3.1 แสดงแผนผังอุปกรณ์ทดลองการขนถ่ายสารเข้าไปในยางธรรมชาติโดยใช้ คาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือจุดวิกฤต.....	48
3.2 เครื่องปฏิกรณ์เคมี.....	49
3.3 เครื่องทำความเย็น.....	49
3.4 ถังพักคาร์บอนไดออกไซด์.....	50
3.5 เครื่องสูบแรงดึงดูดสูง.....	50
3.6 เครื่องตัดยางเม็ด.....	51
3.7 การใส่ตัวอย่างยางขณะทดลอง.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

4.1 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางพันธุ์ต่างๆ.....	57
4.2 ผลของความดันต่อสัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 57 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที.....	62
4.3 ผลของอุณหภูมิต่อสัดส่วนน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางทั้งหมด ที่ความดัน 80 บาร์ เวลา 60 นาที.....	62
4.4 ผลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางพันธุ์ BPM24.....	64
4.5 ลักษณะการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางพันธุ์ BPM24 ที่ผ่านการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์.....	64
4.6 ผลของเวลาที่ใช้บดยางต่อการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางพันธุ์ BPM24	66
4.7 การเปรียบเทียบปริมาณการแทรกซึมสารอินทรีย์เข้าไปในยางธรรมชาติ.....	69
4.8 ผลของความหนืดมูนนี้ต่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟิน.....	71
4.9 ผลของความหนืดมูนนี้ต่อปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล.....	71
4.10 ผลของความดันต่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟิน.....	76
4.11 ผลของความดันต่อความต้านทานแรงดึงของยางที่มีไซพาราฟินแทรกซึมอยู่.....	76
4.12 ผลของความดันต่อการยืดออกเมื่อขาดของยางที่มีไซพาราฟินแทรกซึมอยู่.....	77
4.13 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟิน.....	77
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\sqrt{4t}$ และ $x/\sqrt{4Dt}$ ที่อุณหภูมิต่างๆของการแทรกซึม ไซพาราฟิน.....	79
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการแทรกซึมของไซพาราฟินเฉลี่ย ที่ t_{oc}	80
4.16 ผลของปริมาณไซพาราฟินต่อความต้านทานแรงดึง.....	81
4.17 ผลของปริมาณไซพาราฟินต่อการยืดออกเมื่อขาด.....	81
4.18 ผลของความดันต่อปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล.....	85
4.19 ผลของความดันต่อความต้านทานแรงดึงของยางที่มีโพรพิลีนไกลคอล แทรกซึมอยู่.....	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

4.20 ผลของความดันต่อการยืดออกเมื่อขาดของยางที่มีโพรพิลีนไกลคอลแทรกซึมอยู่.....	86
4.21 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล.....	86
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/\sqrt{4t}$ และ $x/\sqrt{4Dt}$ ที่อุณหภูมิต่างๆของการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอล.....	88
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณการแทรกซึมของโพรพิลีนไกลคอลเฉลี่ยที่ t_{∞}	89
4.24 ผลของปริมาณโพรพิลีนไกลคอลต่อความต้านทานแรงดึง.....	90
4.25 ผลของปริมาณโพรพิลีนไกลคอลต่อการยืดออกเมื่อขาด.....	90
4.26 ผลของอายุตัวอย่างต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกเมื่อขาด.....	92
4.27 เม็ดยางจากตัวอย่างยางที่มีไซพาราฟินแทรกซึมอยู่.....	93
ก.1 แผนผังวิภาคของคาร์บอนไดออกไซด์.....	104
ก.2 แสดงผลของความดันที่มีต่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณวิกฤต.....	104
ก.3 แผนผัง compressibility ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความดันต่ำ.....	105
ก.4 แผนผัง compressibility ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความดันปานกลาง.....	106
ค.1 เปรียบเทียบปริมาณการแทรกซึมไซพาราฟินที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ.....	127
ค.2 เปรียบเทียบปริมาณการแทรกซึมโพรพิลีนไกลคอลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ.....	128
ง.1 ขนาดขึ้นทลอบรูปดัมเบล.....	132
ง.2 การวิเคราะห์ขนาดด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐาน.....	132