สภาพให้แก๊สซึมได้ของเยื่อยางธรรมชาติ

นายปิยะธร ไตลังคะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543
ISBN 974-13-0780-2
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 20117632

# GAS PERMEABILITY OF NATURAL RUBBER MEMBRANE

Mr. Piyathorn Tailanga

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 2000

ISBN 974-13-0780-2

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | สภาพให้แก๊สซึมได้ของเยื่อยางธรรมชาติ |
| โดย | นายปิยะธร ไตลังคะ |
| สาขาวิชา | เคมีเทคนิค |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ดร. เพียรพรรค ทัศคร |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขันทอง สุนทราภา |

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. เพียรพรรค ทัศคร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขันทอง สุนทราภา)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

ปิยะธร ไตลังคะ : สภาพให้แก๊สซึมได้ของเยื่อยางธรรมชาติ. (GAS PERMEABILITY OF NATURAL RUBBER MEMBRANE) อ. ที่ปรึกษา : ดร. เพียรพรรค ทัศคร, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขันทอง สุนทราภา, 122 หน้า. ISBN 974-13-0780-2.

งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการถ่ายโอนแก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจน ผ่านเยื่อยางธรรมชาติ เยื่อยางธรรมชาติคงรูป และเยื่อยางธรรมชาติคงรูปผสมแนฟธาลีน โดยมีสมมุติฐานว่าแก๊สซึมผ่านไปตามช่องว่างที่เกิดขึ้นขณะเตรียมเยื่อ ศึกษาอิทธิพลของความดัน และอุณหภูมิ ต่อสภาพให้แก๊สซึมได้ และสภาพเลือกได้ จากผลการทดลองพบว่า ค่าความดันต่างไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพให้แก๊สซึมได้ และค่าสภาพเลือกได้ในเยื่อทุกชนิด แต่การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ค่าสภาพให้แก๊สซึมได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสภาพเลือกได้มีค่าลดลงเล็กน้อย การเติมแนฟธาลีนเพื่อสร้างรอยแยกในเยื่อ พบว่าที่ปริมาณ 10 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน จะทำให้สภาพให้แก๊สซึมได้มีค่าสูงสุด แต่สภาพเลือกได้ของแก๊สออกซิเจน / แก๊สไนโตรเจน ไม่ขึ้นกับปริมาณแนฟธาลีน และมีค่าประมาณ 2 - 3 สมบัติเชิงกลของเยื่อได้แก่ ค่าความทนแรงดึง และความเค้นดึง ของเยื่อยางที่ผ่านการคงรูป จะมีค่าใกล้เคียงกัน และสูงกว่าเยื่อที่ไม่ผ่านการคงรูปประมาณ 3 เท่า

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต ปิยะธร ไตลังคะ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## 4072314023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: GAS PERMEABILITY / NATURAL RUBBER

PIYATHORN TAILANGA : GAS PERMEABILITY OF NATURAL RUBBER MEMBRANE. THESIS ADVISOR : PIENPAK TASAKORN Ph.D., THESIS CO – ADVISOR : ASST.PROF. KHANTONG SOONTARAPA Ph.D., 122 pp. ISBN 974-13-0780-2.

This research is to investigate transportation of oxygen and nitrogen through natural rubber membrane, vulcanized rubber membrane and vulcanized rubber membrane mixed with naphthalene. The hypothesis is that gases permeate through pores formed during membrane preparation. The influences of pressure and temperature on permeability and selectivity have been studied. Results have shown that the pressure drop does not affect permeability and selectivity of membranes but the increase of temperature causes the increase of gas permeability and a slight decrease of selectivity. Naphthalene has been added to create small pores in the membrane. It appeared that at 10 phr of naphthalene the permeability is maximum but the selectivity of $O_2$ / $N_2$ was not affected by the quantity of naphthalene with an average value around 2 – 3. The mechanical properties of membrane, i.e. tensile strength and modulus of vulcanized rubber membrane stay nearly the same and these properties are 3 times higher than that of unvulcanized rubber.

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Acaemic year 2000

Student's signature .....

Advisor's signature .....

Co – advisor's signature .....

# กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบคุณ ดร.เพียรพรรค ทัศคร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขันทอง สุนทราภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือ

ขอกราบขอบพระคุณบริษัท เอ็น. วาย รับเบอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำยางข้น ขอกราบขอบพระคุณบริษัท อุทิศเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด และบริษัท ซันนี่เวิลด์ (1989) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการจนงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์พัฒนา และบริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสร้างเครื่องมือ ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค และน้องๆ สาขาวิชาปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้ ทำให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ มารดา บิดา ญาติพี่น้อง ที่ได้ให้กำลังใจ และการสนับสนุนแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ ..... 1
    1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ ..... 1
    1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ..... 2
    1.3 ขั้นตอนการวิจัย ..... 2
    1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 3

2. วารสารปริทรรศน์ ..... 4
    2.1 พืชที่ให้น้ำยาง ..... 4
    2.2 น้ำยางสด ..... 5
    2.3 ส่วนประกอบของน้ำยาง ..... 6
    2.4 น้ำยางข้น ..... 12
    2.5 การเก็บรักษาน้ำยาง ..... 13
    2.6 สารเคมีผสมน้ำยาง ..... 18
    2.7 การแยกด้วยเยื่อแผ่น ..... 25
    2.8 ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่น ..... 26
    2.9 ชนิดของเยื่อแผ่น ..... 27
    2.10 กระบวนการแยกแก๊ส ..... 29
    2.11 การถ่ายโอนแก๊สในเยื่อ ..... 30
    2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 37
    2.13 สมมุติฐานของงานวิจัย ..... 41

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. วิธีการทดลอง ..... 43
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ..... 43
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ..... 44
3.3 ขั้นตอนการทดลอง ..... 48

4. ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง ..... 55
4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำยางข้น ..... 55
4.2 ผลของความดันต่าง ต่อค่าสภาพให้แก๊สซึมได้ ..... 56
4.3 ผลของความดันต่าง ต่อค่าสภาพเลือกได้ ..... 60
4.4 ผลของอุณหภูมิ ต่อค่าสภาพให้แก๊สซึมได้ ..... 62
4.5 ผลของอุณหภูมิ ต่อค่าสภาพเลือกได้ ..... 68
4.6 ผลของปริมาณแนฟธาลีน ต่อค่าสภาพให้แก๊สซึมได้ ..... 70
4.7 ผลของปริมาณแนฟธาลีน ต่อค่าสภาพเลือกได้ ..... 73
4.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ..... 75
4.9 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพอื่น ..... 79

5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ ..... 81
5.1 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อค่าสภาพให้แก๊สซึมได้ ..... 81
5.2 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อค่าสภาพเลือกได้ ..... 81
5.3 สมบัติทางกายภาพอื่น ..... 82
5.4 ศักยภาพของเยื่อแผ่นจากยางธรรมชาติในการแยกแก๊ส ..... 82

รายการอ้างอิง ..... 83
ภาคผนวก ..... 86
ก. ข้อมูลสำหรับคำนวณอัตราการไหลของแก๊สที่ผ่านเยื่อ ..... 87
ข. ตัวอย่างการคำนวณค่าสภาพให้แก๊สซึมได้ และค่าสภาพเลือกได้ ..... 118
ประวัติผู้เขียน ..... 122

# สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ ..... 6

2.2 ส่วนประกอบของเนื้อยางแห้ง ..... 10

3.1 สูตรการเตรียมกำมะถัน ..... 49

3.2 สูตรการเตรียม ZDEC ..... 49

3.3 สูตรการเตรียมซิงค์ออกไซด์ ..... 49

3.4 สูตรการเตรียม BHT ..... 50

3.5 สูตรการเตรียมแนฟธาลีน ..... 50

3.6 สูตรการเตรียมเยื่อยางคงรูป ..... 51

4.1 สมบัติของน้ำยางข้นที่ใช้เตรียมเยื่อ ..... 55

4.2 สมบัติเชิงกลของเยื่อยางธรรมชาติ และเยื่อยางธรรมชาติคงรูปผสมแนฟธาลีน ..... 80

ก.1 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (NR) ..... 87

ก.2 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (NR) ..... 88

ก.3 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (NR) ..... 88

ก.4 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (NR) ..... 89

ก.5 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (NR) ..... 89

ก.6 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (NR) ..... 90

ก.7 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (NR) ..... 90

ก.8 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (NR) ..... 91

ก.9 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (NR) ..... 91

ก.10 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (NR) ..... 92

ก.11 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (NR) ..... 92

ก.12 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (NR) ..... 93

ก.13 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 93

ก.14 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 94

ก.15 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 94

ก.16 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 95

ก.17 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 95

# สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

ก.18 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 96
ก.19 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 96
ก.20 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 97
ก.21 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 97
ก.22 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 98
ก.23 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 98
ก.24 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR) ..... 99
ก.25 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ..... 99
ก.26 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 100
ก.27 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 100
ก.28 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 101
ก.29 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 101
ก.30 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 102
ก.31 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 102
ก.32 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 103
ก.33 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 103
ก.34 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 104
ก.35 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 104
ก.36 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.10) ... 105
ก.37 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 105
ก.38 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 106
ก.39 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 106
ก.40 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 107
ก.41 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 107
ก.42 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 108
ก.43 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 108
ก.44 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 109

# สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

ก.45 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 109
ก.46 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 110
ก.47 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 110
ก.48 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.20) ... 111
ก.49 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 111
ก.50 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 112
ก.51 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 112
ก.52 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 113
ก.53 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 113
ก.54 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 45 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 114
ก.55 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 114
ก.56 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 115
ก.57 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 60 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 115
ก.58 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 116
ก.59 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 116
ก.60 ข้อมูลการทดสอบที่ความดัน 75 psi, อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (Vul.NR+Nap.30) ... 117
ข.1 ค่าจากการวัดความหนา 5 ครั้ง ... 119
ข.2 เวลาของแก๊สขาออก ทดสอบที่ความดัน 30 psi, อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส ... 120

# สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

2.1 ลักษณะอนุภาคยางธรรมชาติ ..... 7

2.2 สูตรโครงสร้างแบบต่างๆ ของพอลิไอโซพรีน ..... 8

2.3 การเชื่อมโยงกันระหว่างโมเลกุล และภายในโมเลกุลเดียวกัน ..... 19

2.4 โครงสร้างโมเลกุลของไทยูแรมพอลิซัลไฟด์ ..... 19

2.5 โครงสร้างโมเลกุลของสารกลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต ..... 21

2.6 สภาพให้ซึมได้ขึ้นกับความดัน และอุณหภูมิ ..... 35

2.7 แสดงสมมุติฐานการเกิดฟิล์มยางธรรมชาติผสมสารเคมี ..... 42

3.1 ชุดอุปกรณ์ทำแผ่นเยื่อ ..... 45

3.2 อุปกรณ์ทดสอบสภาพให้แก๊สซึมได้ ..... 48

4.1 สภาพให้ไนโตรเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส ..... 56

4.2 สภาพให้ไนโตรเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ..... 57

4.3 สภาพให้ไนโตรเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ..... 57

4.4 สภาพให้ออกซิเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส ..... 58

4.5 สภาพให้ออกซิเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ..... 59

4.6 สภาพให้ออกซิเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ..... 59

4.7 สภาพเลือกได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส ..... 60

4.8 สภาพเลือกได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ..... 61

4.9 สภาพเลือกได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ..... 61

4.10 สภาพให้ไนโตรเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 30 psi ..... 63

4.11 สภาพให้ไนโตรเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 45 psi ..... 63

4.12 สภาพให้ไนโตรเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 60 psi ..... 64

4.13 สภาพให้ไนโตรเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 75 psi ..... 64

4.14 สภาพให้ออกซิเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 30 psi ..... 66

4.15 สภาพให้ออกซิเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 45 psi ..... 66

4.16 สภาพให้ออกซิเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 60 psi ..... 67

4.17 สภาพให้ออกซิเจนซึมได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 75 psi ..... 67

4.18 สภาพเลือกได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 30 psi ..... 68

# สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า
4.19 สภาพเลือกได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 45 psi 69
4.20 สภาพเลือกได้ของเยื่อชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 60 psi 69
4.21 สภาพเลือกได้ของเยือชนิดต่างๆ ที่ความดันต่าง 75 psi 70
4.22 สภาพให้ไนโตรเจนซึมได้เฉลี่ยจากความดันต่าง ที่อุณหภูมิต่างๆ 71
4.23 สภาพให้ออกซิเจนซึมได้เฉลี่ยจากความดันต่าง ที่อุณหภูมิต่างๆ 72
4.24 จำลองการระเหยของแนฟธาลีน 73
4.25 สภาพเลือกได้เฉลี่ยจากความดันต่าง ที่อุณหภูมิต่างๆ 74
4.26 ลักษณะพื้นผิวเยื่อ ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า 76
4.27 รู และรอยแยก ที่เกิดบริเวณพื้นผิวเยื่อ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า 77
4.28 ลักษณะภาคตัดขวางเยื่อ ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า 78
4.29 ภาคตัดขวางแสดงรูในเยื่อ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า 79