

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การศึกษาการบวมตัวของยางสังเคราะห์เอทิลีนโพรพิลีนไดอินโมโนเมอร์และ  
ยางเหลวพอลิบิวตาไดอินด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็น  
ที่สภาวะเหนือวิกฤต



T119200

ชิตพล ตามประดิษฐ์  
ปรีทัศน์ เหมือนจันทร์  
เพิ่มวิทย์ เหล่าพิรุพห์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **119200**  
วัน,เดือน,ปี... - 6 S.ค. 2554

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON THE SWELLING OF  
ETHYLENE PROPYLENE DIENE MONOMER RUBBER AND  
LIQUID POLYBUTADIENE RUBBER WITH SUPERCRITICAL  
CARBON DIOXIDE AND REFRIGERANT**

**CHITAPOL TAMPRADIS  
PARITAT MUANCHAN  
PERMWIT LAOPIROON**

**THIS THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT**

**OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF**

**BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปฏิญานิพนธ์

การศึกษาการบวมตัวของยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอิน โมโนเมอร์และ  
ยางเหลวพอลิบิวตาไดอินด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และสารเพิ่มความเย็น  
ที่สภาวะเหนือวิกฤต

โดย

นายจิตพล ตามประดิษฐ์ รหัสนักศึกษา 50011377  
นายปริทัศน์ เหมือนจันทร์ รหัสนักศึกษา 50010927  
นายเพิ่มวิทย์ เหล่าพิรุพห์ รหัสนักศึกษา 50011140

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปฏิญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปฏิญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

.....กรรมการ

(ผศ.รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ)

.....กรรมการ

(ดร.วลัยรัตน์ จันทอัมพร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                    |   |              |
|--------------------|---|--------------|
| หัวข้อปริญญานิพนธ์ | การศึกษาการบวมตัวของยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน โมนอเมอร์และยางเหลวพอลิบิวตาไดอีนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และสารทำความเย็นที่สถานะเหนือวิกฤต |              |
| โดย                | นายชิตพล  | ตามประดิษฐ์  |
|                    | นายปรีทศน์  | เหมือนจันทร์ |
|                    | นายเพิ่มวิทย์   | เหล่าพิรุพห์ |
| ปริญญา             | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต   |              |
| สาขาวิชา           | วิศวกรรมเคมี  |              |
| ปีการศึกษา         | 2553  |              |
| อาจารย์ที่ปรึกษา   | ผศ.ดร.สุรัตน์   | อารีรัตน์    |

## บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบอย่างชัดเจนว่าคาร์บอนไดออกไซด์สถานะเหนือวิกฤตเป็นสารเติมแต่งพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานและพอลิเมอร์เหลว ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์หลายกระบวนการสามารถพัฒนาประสิทธิภาพให้ดีขึ้นได้ เช่น การใช้ตัวทำละลายที่ระเหยง่ายเป็นสารเคลือบชิ้นงานพอลิเมอร์ วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์นี้คือการศึกษาพฤติกรรมของการบวมตัวของยางเอทิลีน โพรพิลีน ไดอีน โมนอเมอร์ (EPDM) และยางเหลวพอลิบิวตาไดอีน (PB) ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์กับสารทำความเย็น R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤต โดยสามารถอธิบายการบวมตัวได้ว่ามาจากการลดความหนืดและแรงตึงผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลโดยตรงกับกระบวนการเคลือบผิวพอลิเมอร์ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางสังเคราะห์ทั้งยาง EPDM และยางเหลว PB ทราบได้จากการสังเกตการบวมตัวจากกล้องวิดีโอกับเวลาที่เปลี่ยนไป สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวมี 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ (40 - 60 °C) ความดัน (80 - 120 bar) และปริมาณของสารทำความเย็น (50 และ 100 mL) จากผลการทดลองพบว่าการบวมตัวของยาง EPDM มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประมาณ  $1.33 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  และมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวเท่ากับ 5% ส่วนยางเหลว PB มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประมาณ  $8.60 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  และมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวเท่ากับ 30%

**Report Title** Study On The Swelling Of Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber And Liquid Polybutadiene Rubber With Supercritical Carbon Dioxide And Refrigerant

**By** Mr. Chitapol Tampradis  
Mr. Paritat Muanchan  
Mr. Permwit Laopiroon

**Degree** Bachelor of Engineering

**Programme** Chemical Engineering

**Year** 2010

**Advisor** Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

## ABSTRACT

The objective of this research is to study the swelling behavior of ethylene propylene diene monomer rubber (EPDM) and liquid 1,3-polybutadiene rubber (PB) in the presence of supercritical carbon dioxide (sc-CO<sub>2</sub>) and refrigerant. The degree of swelling can be described reduction of viscosity and surface tension which directly related to the polymer coating process. As well as, a diffusion coefficient of carbon dioxide into both rubber can be determined by observing degree of swelling as a function of soaking time. The swelling of EPDM and liquid PB was observed by using optical microscope video camera. This research studied three key parameters of the swelling process, temperature ranging from 40 up to 60°C, pressure ranging from 80 up to 120 bar and volume of refrigerant of 50 and 100 ml. From experimental results, the swelling behavior of EPDM illustrated that the diffusion coefficient of sc-CO<sub>2</sub> in EPDM was  $1.33 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , and EPDM could be swollen about 5% and PB illustrated that the diffusion coefficient of sc-CO<sub>2</sub>/refrigerant in liquid PB was  $8.60 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , and liquid PB could be swollen about 30%.

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ทางคณะผู้จัดทำใคร่ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้

ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ รวมทั้งความรู้ และประสบการณ์ในการทำงาน

รศ.ดร.ชาคริต สิริสิงห์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้การสนับสนุนตัวอย่าง ยางเหลวพอลิบิวตาไดอิน

คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกฝ่ายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความรู้และคำแนะนำตลอดการทำปริญญานิพนธ์

พี่และเพื่อนในภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจ ให้การทำปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือ กำลังใจ และการสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ชิตพล ตามประดิษฐ์  
ปรีทศน์ เหมือนจันทร์  
เพิ่มวิทย์ เหล่าพิรุฬห์

# สารบัญ

หน้า

|   |      |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                              | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                           | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....                              | III  |
| สารบัญ.....                                       | IV   |
| สารบัญตาราง.....                                  | VIII |
| สารบัญรูป.....                                    | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                 | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....         | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์.....                             | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ.....                         | 3    |
| 1.4 วิธีการดำเนินการ.....                         | 3    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....                   | 4    |
| 2.1 โฟม (Foam).....                               | 4    |
| 2.2 กระบวนการผลิตโฟมแบบกะ.....                    | 5    |
| 2.3 สารเกิดฟอง (Blowing Agents).....              | 5    |
| 2.3.1 สารเกิดฟองทางกายภาพ.....                    | 6    |
| 2.3.2 สารเกิดฟองทางเคมี.....                      | 6    |
| 2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....       | 8    |
| 2.4.1 Ethylene-Propylene Diene Rubber : EPDM..... | 8    |
| 2.4.2 ยางเหลือง PB (Polybutadiene).....           | 11   |
| 2.5 สมบัติของสารเกิดฟองที่ใช้ในการทดลอง.....      | 11   |
| 2.5.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide).....      | 11   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| 2.5.2 สารทำความเย็น (Refrigerant) .....  | 12 |
| 2.6 การแพร่และการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ .....   | 14 |
| 2.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับความหนืดของ<br>สารละลาย ตามสมการของ Stokes – Einstein .....        | 14 |
| 2.6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สในพอลิเมอร์อย่างง่าย .....  | 15 |
| 2.6.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สในพอลิเมอร์ตามแบบจำลองของ<br>Vrentas และ Duda .....                          | 17 |
| 2.6.4 การวัดค่าการแพร่ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการวัดค่า การบวมตัว<br>ของพอลิเมอร์ .....                            | 17 |
| 2.7 ค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ .....  | 18 |
| 2.7.1 ค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์อย่างง่าย .....   | 18 |
| 2.7.2 สมดุลไอและของเหลวของสารละลายจริง .....   | 21 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....  | 22 |
| บทที่ 3 การทดลอง .....   | 24 |
| 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....  | 24 |
| 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....  | 24 |
| 3.3 วิธีการทดลอง .....   | 24 |
| 3.3.1 การสังเกตการบวมตัวของยาง EPDM เนื่องจาก<br>คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต .....                                    | 24 |
| 3.3.2 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจาก<br>คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต .....                                  | 25 |
| 3.3.3 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากตัวทำละลายร่วม<br>คาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤต ..... | 25 |
| 3.3.4 การชั่งน้ำหนักแก๊ส R-134a .....  | 26 |

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

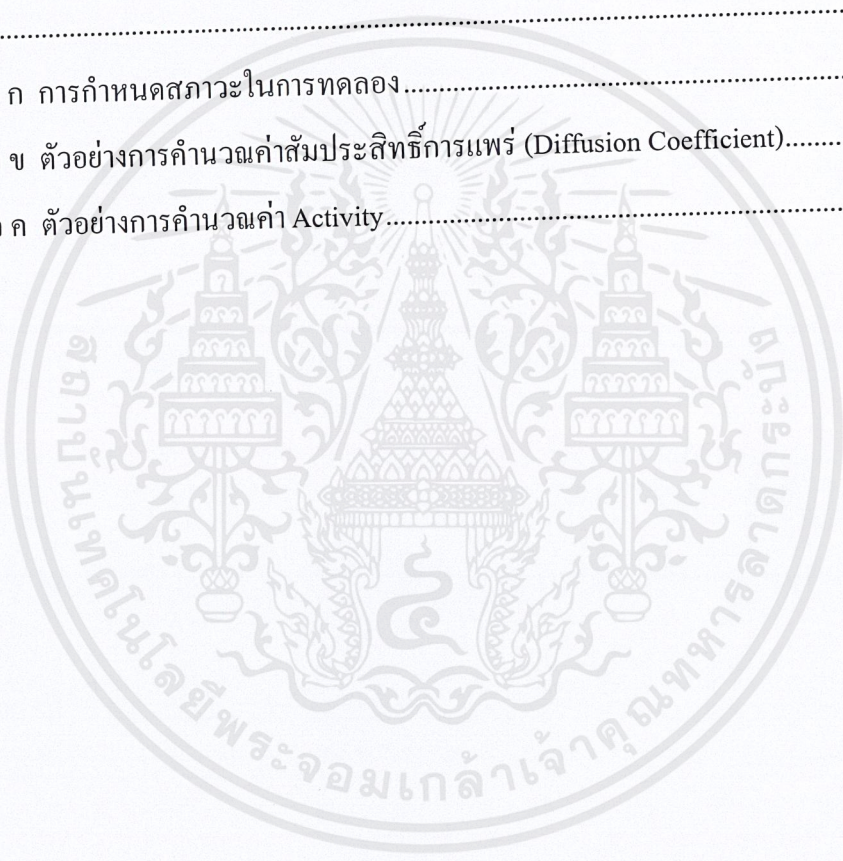
|   |    |
|---|----|
| 3.3.5 การชั่งน้ำหนักแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....  | 26 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....  | 27 |
| 4.1 การสังเกตการบวมตัวของยาง EPDM เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ เหนือวิกฤต.....   | 27 |
| 4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการบวมตัวของยาง EDPM .....   | 28 |
| 4.1.2 อิทธิพลของความดันต่อการบวมตัวของยาง EDPM.....   | 30 |
| 4.1.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต<br>ในยางEPDM.....   | 30 |
| 4.2 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ เหนือวิกฤต.....   | 32 |
| 4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการบวมตัวของยางเหลว PB .....   | 32 |
| 4.2.2 อิทธิพลของความดันต่อการบวมตัวของยางเหลว PB.....   | 33 |
| 4.2.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต<br>ในยางเหลว PB .....  | 34 |
| 4.3 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากตัวทำละลายร่วมระหว่าง<br>คาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤต.....  | 35 |
| 4.3.1 อิทธิพลของตัวทำละลายร่วมต่อการบวมตัวของยางเหลว PB .....   | 35 |
| 4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายร่วมในยางเหลว PB.....   | 40 |
| 4.4 การวิเคราะห์ผลค่า Activity .....  | 41 |
| 4.4.1 ค่า Activity ในการศึกษาการบวมตัวของยาง EPDM โดยใช้<br>คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต .....  | 41 |
| 4.4.2 ค่า Activity ในการศึกษาการบวมตัวของยางเหลว PB โดยใช้<br>คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และตัวทำละลายร่วม<br>คาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤต ..... | 42 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....   | 44 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

|   |    |
|---|----|
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....   | 44 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....  | 45 |
| เอกสารอ้างอิง.....  | 47 |
| ภาคผนวก .....   | 49 |
| ภาคผนวก ก การกำหนดสถานะในการทดลอง.....  | 50 |
| ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)..... | 53 |
| ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณค่า Activity.....                                   | 64 |



# สารบัญตาราง

หน้า

|   |    |
|---|----|
| ตารางที่ 2.1 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D$ , $10^{-6}$ cm <sup>2</sup> /s) และค่าพลังงานกระตุ้นการแพร่ ( $E_D/R_g$ , $10^3$ K) สำหรับแก๊สที่อุณหภูมิคงที่ 298 K.....                    | 16 |
| ตารางที่ 2.2 ค่าการละลาย ( $S$ , $10^{-6}$ cm <sup>3</sup> (STP)/cm <sup>3</sup> .Pa) และค่าพลังงานความร้อนของการดูดซึม ( $\Delta H_s/R_g$ , $10^3$ K) สำหรับแก๊สที่อุณหภูมิ 298 K..... | 20 |
| ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM.....  | 31 |
| ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB.....  | 35 |
| ตารางที่ 4.3 ผลของสัดส่วนสารผสมต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤตในยางเหลว.....   | 41 |
| ตารางที่ ก -1 การกำหนดสถานะในการทดลองการสังเกตการบวมตัวของยาง EPDM.....   | 50 |
| ตารางที่ ก -2 การกำหนดสถานะในการทดลองการสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB.....   | 51 |
| ตารางที่ ก -3 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิคงที่ 60°C.....   | 52 |
| ตารางที่ ข -1 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยางสังเคราะห์ EPDM ที่ความดัน 80 100 และ 120 bar และอุณหภูมิคงที่ 40 °C.....  | 53 |
| ตารางที่ ข-2 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยาง EPDM ที่ความดัน 80 100 และ 120 bar และอุณหภูมิคงที่ 50°C.....  | 55 |
| ตารางที่ ข-3 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยางเหลว PB ที่ความดัน 80 90 และ 100 bar อุณหภูมิคงที่ 60 °C และปริมาณ R-134a เป็นศูนย์.....                                      | 57 |
| ตารางที่ ข-4 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยางเหลว PB ที่ความดัน 80 90 และ 100 bar อุณหภูมิคงที่ 60 °C และปริมาณ R-134a 50 ml.....  | 59 |
| ตารางที่ ข-5 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยางเหลว PB ที่ความดัน 80 90 และ 100 bar อุณหภูมิคงที่ 60 °C และปริมาณ R-134a 100 ml.....   | 61 |

# สารบัญรูป

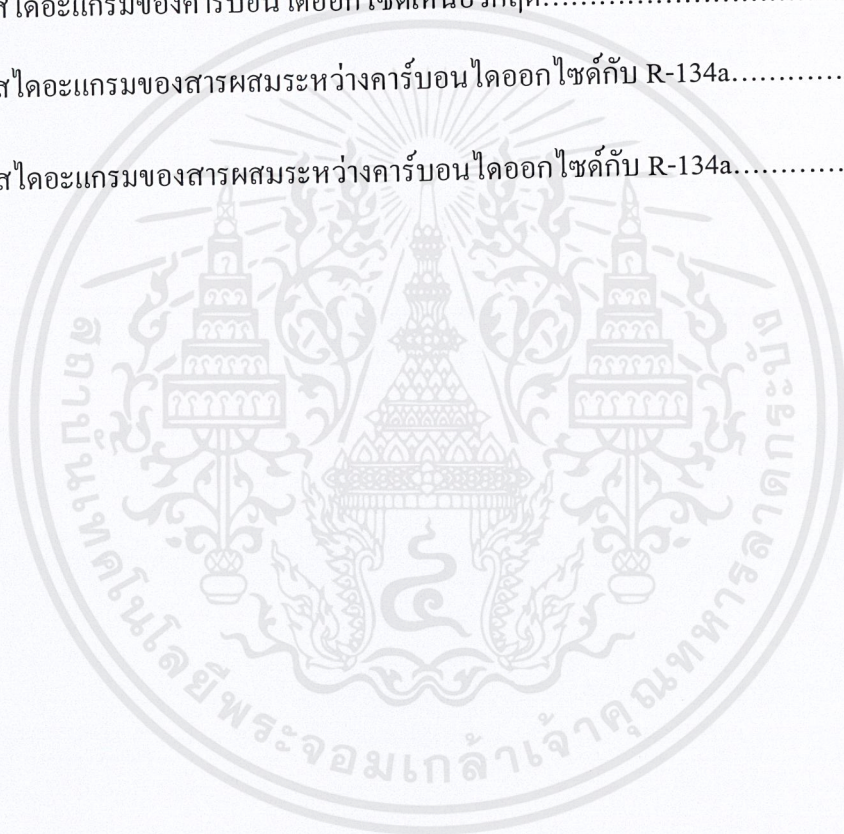
หน้า

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 2.1 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของโฟม.....  | 4  |
| รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโฟมกับขั้นตอนการเกิดโฟม.....  | 5  |
| รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์.....  | 12 |
| รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของ R-134a.....   | 14 |
| รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องปฏิบัติการความดันสูง.....  | 25 |
| รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการบวมตัวของยาง EPDM ที่อุณหภูมิ 40 °C ความดัน 120 bar.....  | 28 |
| รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยาง EPDM<br>กับ Time (min) ที่ความดันคงที่ 120 bar .....  | 29 |
| รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยาง EPDM<br>กับ Time (min) ที่อุณหภูมิกคงที่ 40 °C .....  | 30 |
| รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left\{ \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1} \right] \right\}$<br>กับ Time (min) ของยาง EPDM ที่อุณหภูมิ 40 °C ความดัน 100 bar ..... | 31 |
| รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการบวมตัวของยางเหลว PB ที่อุณหภูมิ 40 °C ความดัน 120 bar.....  | 32 |
| รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB กับ Time (min)<br>ที่ความดันคงที่ 120 bar.....   | 33 |
| รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB กับ Time (min)<br>ที่อุณหภูมิกคงที่ 40 °C .....  | 34 |
| รูปที่ 4.8 เฟสไดอะแกรมของสารผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a .....  | 36 |
| รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการบวมตัวของยางเหลว PB ที่อุณหภูมิ 60 °C ความดันคงที่ 90 bar<br>ด้วยปริมาณ R-134a 100 ml.....  | 37 |
| รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB กับ Time (min)<br>อุณหภูมิ 60 °C ความดันคงที่ 90 bar.....   | 38 |
| รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB<br>กับ Time – Time lag (min) อุณหภูมิ 60 °C ความดันคงที่ 90 bar.....  | 39 |
| รูปที่ 4.12 แสดงกระบวนการบวมตัวของยางเหลว PB.....   | 40 |

# สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta L/L_0$ (%) กับ Activity of $\text{CO}_2$ [ $f^{\text{a}}$ (P,T)]<br>ของยาง EPDM.....                                       | 41 |
| รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Activity กับ $\Delta L/L_0$ ที่อุณหภูมิคงที่ 60 °C<br>ของยางเหลว PB เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a<br>ที่สถานะเหนือวิกฤต..... | 42 |
| รูปที่ ก-1 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต.....   | 50 |
| รูปที่ ก-2 เฟสไดอะแกรมของสารผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a.....  | 51 |
| รูปที่ ข-1 เฟสไดอะแกรมของสารผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a.....  | 63 |



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

การแพร่และการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกำหนดสถานะของกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี เช่น กระบวนการผลิตโฟม กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน เป็นต้น รวมทั้งมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น ความหนาแน่นและความหนืด ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ซึ่งส่วนใหญ่ในระหว่างกระบวนการจะอยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนืดสูง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนคุณสมบัติของพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการด้วยการลดความหนืด การลดความหนืดของพอลิเมอร์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ การใช้ตัวทำละลาย เป็นต้น โดยการใช้ตัวทำละลายในการลดความหนืดของพอลิเมอร์ เช่น การใช้ตัวทำละลายของเหลวที่มีผลทำให้พอลิเมอร์เจือจางลงเนื่องจากการผสมกันทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง หรือใช้แก๊สที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการบวมตัว ซึ่งโมเลกุลของพอลิเมอร์อยู่ห่างกันมากขึ้น เป็นผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง

อุตสาหกรรมสำคัญที่มีความเกี่ยวเนื่องกับกระบวนการแพร่และการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ คือ กระบวนการผลิตโฟม อันเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากโฟมเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความคงทนในระดับหนึ่ง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งด้านการอุปโภคในครัวเรือนและเครื่องใช้ประเภทต่างๆ จึงเกี่ยวข้องต่อการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีสารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ประเภทต่างๆ เช่น พลาสติกและยาง โดยในขั้นตอนการผลิตจะต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ สารเติมแต่ง ที่มีประโยชน์ต่างๆ ดังนี้ คือ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิต ช่วยลดการใช้พอลิเมอร์ที่เป็นสารตั้งต้นราคาสูง และเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของโฟม ได้แก่ การเพิ่มสีสันทของโฟม การยืดอายุการใช้งาน และการเพิ่มการเกิดฟอง เป็นต้น โดยวิธีหนึ่งที่มีความสำคัญที่ช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพคือ การใช้สารเกิดฟอง (Blowing Agents)

สารเกิดฟองเป็นสารเติมแต่งที่มีหน้าที่ช่วยในการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ อันเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์นั้น ได้แก่ การบวมตัวของพอลิเมอร์ เป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ จากการที่สารเกิดฟองแพร่เข้าไปสู่เนื้อของพอลิเมอร์ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรวมของพอลิเมอร์เนื่องจากสารเกิดฟองที่เพิ่มเข้าไป ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะเป็นการทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีความหนาแน่นลดลง เพราะสารเกิดฟองที่เติมเข้าไปจะช่วยในการเพิ่มปริมาตรของพอลิเมอร์ ในขณะที่น้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย

จึงมีประโยชน์ในกระบวนการผลิตโฟมที่ต้องการให้เม็ดโฟมฟูและมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังเป็น การลดความหนืดของพอลิเมอร์ ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับสารอื่น ได้ง่ายขึ้น

สำหรับในกระบวนการบวมตัวของพอลิเมอร์ แก๊สที่เติมเข้าไปเพื่อทำหน้าที่เป็น สารเกิดฟอง มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องสองปัจจัย คือ การละลายของแก๊สและการแพร่ของแก๊สเข้าไปใน พอลิเมอร์ ทั้งนี้การละลายของแก๊สมีผลต่อคุณสมบัติของโฟมที่ได้จากกระบวนการ ในขณะที่ การแพร่นั้นส่งผลต่อเวลาในการอิมตัวของแก๊สที่ละลายเข้าไปในพอลิเมอร์ ซึ่งเวลาเป็นอีกปัจจัย หนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการผลิตโฟมแบบกะ จึงทำให้โครงการนี้เป็นการศึกษาสัมประสิทธิ์ การแพร่ของแก๊สเข้าไปในพอลิเมอร์ โดยอาศัยหลักการบวมตัวของพอลิเมอร์ โดยได้ทำการทดลอง โดยใช้พอลิเมอร์สองชนิด คือ ยาง EPDM (Ethylene propylene diene Monomer rubber) และ ยางเหลว PB (1,3 Polybutadiene) และแก๊สที่ใช้ในการทดลองนี้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ เหนือวิกฤตและตัวทำละลายร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a (1,1,1,2-Tetrafluoroethane) ที่สภาวะเหนือวิกฤต (ความดันมากกว่า 73.8 bar และอุณหภูมิมากกว่า 252.95 K) โดยการทดลองส่วนที่หนึ่งเป็นการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM การทดลองส่วนที่สองเป็นการทดลองเพื่อหา ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB และการทดลอง สุดท้ายส่วนที่สามเป็นการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายร่วมระหว่าง คาร์บอนไดออกไซด์ กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤตในยางเหลว PB

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมการแพร่และการละลายของของไหลเหนือวิกฤตในยาง EPDM ที่สภาวะความดันและอุณหภูมิต่างๆ

1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมการแพร่และการละลายของของไหลเหนือวิกฤตในยางเหลว PB ที่สภาวะความดัน อุณหภูมิ และสัดส่วนของตัวทำละลายร่วม (คาร์บอนไดออกไซด์ กับ R-134a)

1.2.3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ใน ยาง EPDM และยางเหลว PB จากสมการของ Ohshima และคณะ[1]

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษากระบวนการเกิดโฟม และการบวมตัวของยาง EDPM และยางเหลว PB เนื่องจากสารเกิดฟอง ในช่วงอุณหภูมิ 40 – 60 °C ความดัน 80 – 120 bar และสัดส่วนของตัวทำละลายร่วมที่ทำการเปลี่ยนแปลงที่ปริมาณ R-134a ระหว่าง 0 – 100 ml

### 1.4 วิธีการดำเนินการ

ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดโฟมและการบวมตัวของพอลิเมอร์ก่อนทำการทดลองจริงโดยใช้ยาง EPDM เป็นสารตั้งต้นภายใต้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติที่สภาวะต่างๆ และใช้ยางเหลว PB เป็นสารตั้งต้นภายใต้ตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a เหนือวิกฤติที่สภาวะต่างๆ แล้วจึงนำผลที่ได้มารวบรวมและนำไปทำการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการทดลอง จากนั้นจะสามารถเปรียบเทียบและเลือกสภาวะที่เหมาะสมได้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในการเกิดโฟมของยาง EPDM ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ

1.5.2 เข้าใจพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของการเกิดโฟมของยางเหลว PB ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤติ และตัวทำละลายร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤติ

1.5.3 ทราบถึงปัจจัยสำคัญต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเกิดโฟมและการบวมตัวของยาง EPDM และยางเหลว PB อันเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม

1.5.4 เป็นการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตโฟมจากยาง EPDM และยางเหลว PB อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการให้น้อยลงได้ในระดับหนึ่งคือ มีการดำเนินการทดลองที่สภาวะความดันและอุณหภูมิไม่สูงมาก รวมถึงลดเวลาที่ใช้ในการทดลองได้

1.5.5 สร้างความรู้เกี่ยวกับการทดลอง รวมถึงเทคโนโลยีและประสบการณ์ที่สามารถนำไปสู่การวิจัยอย่างต่อเนื่องและใช้ได้จริงในอนาคตต่อไป

## บทที่ 2

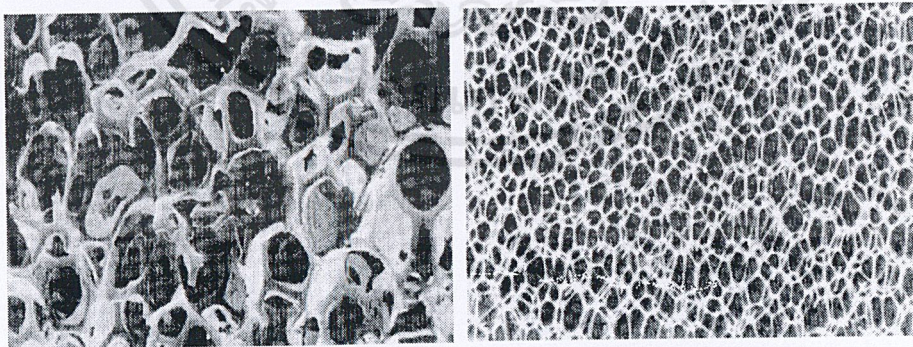
## ทฤษฎี

### 2.1 โฟม (Foam) [2]

โฟมมีส่วนประกอบอย่างน้อย 2 ภูมิภาค ได้แก่ ภูมิภาคที่เป็นของแข็งหรือของเหลว และแก๊ส ซึ่งภูมิภาคแก๊สจะแทรกตัวอยู่ในของแข็งหรือของเหลว โดยแก๊สที่ได้จากสารเกิดฟองทำหน้าที่ลดความหนาแน่นของพลาสติกได้ เช่น เพนเทน (Pentane) เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene Chloride) ทำให้คุณสมบัติของพลาสติกนั้นเปลี่ยนไป เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงเชิงกล ความเป็นฉนวน

พอลิเมอร์ส่วนที่เป็นโฟมนั้น ส่วนที่เป็นของแข็งอาจจะประกอบด้วยพอลิเมอร์หนึ่งชนิดหรือมากกว่าหนึ่งชนิด เช่น ในกรณีที่ผสมพอลิเมอร์สองชนิดเข้าด้วยกัน จากนั้นนำไปขึ้นรูปโฟม การผสมพอลิเมอร์ทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนไป เช่น ความหนาแน่น อุณหภูมิการหลอมตัว

โฟมที่มีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์เปิดดังรูปที่ 2.1(a) แต่ละเซลล์จะมีการเชื่อมถึงกันทั้งหมด โดยภูมิภาคของแก๊สที่อยู่ภายในจะเป็นช่องว่าง ส่วนโฟมที่มีโครงสร้างเป็นแบบเซลล์ปิดดังรูปที่ 2.1(b) แต่ละเซลล์จะถูกแยกด้วยผนังที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ ชนิดของแก๊สที่อยู่ภายในแต่ละเซลล์จะขึ้นอยู่กับชนิดสารเกิดฟองที่ใช้ โดยโครงสร้างของเซลล์นั้นจะเป็นสิ่งกำหนดสมบัติและการใช้งานของโฟม



(a) เซลล์เปิด

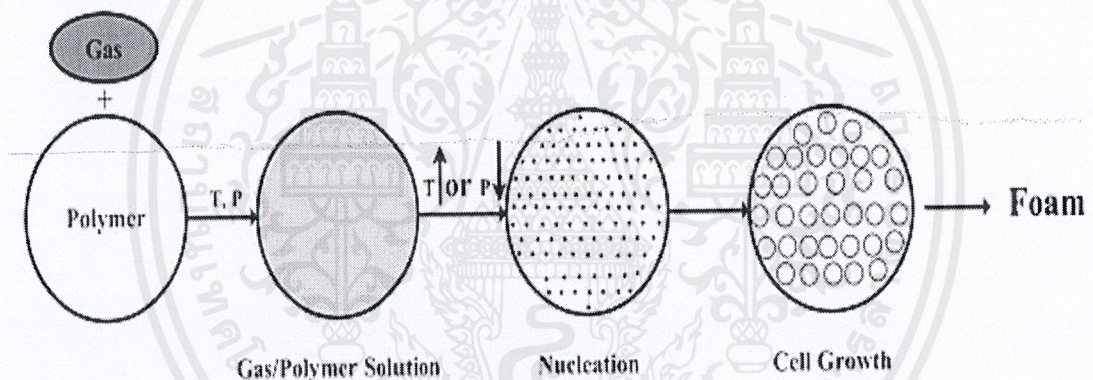
(b) เซลล์ปิด

รูปที่ 2.1 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างของโฟม

## 2.2 กระบวนการผลิตโฟมแบบกะ [3]

กระบวนการผลิตโฟมโดยทั่วไปมี 4 ขั้นตอนคือ

- การละลายของแก๊ส (Gas dissolution) แก๊สละลายในพอลิเมอร์เกิดเป็นสารละลายของแก๊สและพอลิเมอร์
- การเกิดนิวเคลียสของเซลล์ (Cell nucleation) เกิดจากความไม่เสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยเกิดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิหรือการลดลงของความดันทำให้เกิดการแยกตัวภาคของแก๊สและพอลิเมอร์เป็นนิวเคลียส
- การเจริญเติบโตของเซลล์ (Cell growth) เป็นผลจากการถ่ายเทมวลและความร้อน
- การคงสภาพของเซลล์ (Cell stabilization) เซลล์จะหยุดการเจริญเติบโตเองโดยธรรมชาติหรือเกิดจากการกำหนดการหยุดการเจริญเติบโตจากแรงขับในการเจริญเติบโตของเซลล์ เช่น อุณหภูมิและความดัน



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตโฟม

## 2.3 สารเกิดฟอง (Blowing Agents) [4], [5]

สารเกิดฟอง คือสารที่ใช้ในการทำให้พลาสติกมีโครงสร้างแบบโฟม โดยสารเกิดฟองนั้นสามารถเป็นได้ทั้งแก๊สหรือสารเคมีที่จะเกิดการสลายตัวในพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างกระบวนการผลิต โดยแก๊สที่เกิดขึ้นจากสารเกิดฟองทั้งสองแบบจะกระจายตัวและเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์หลอมเหลวภายใต้ความดันในกระบวนการผลิต เมื่อความดันของกระบวนการผลิตลดลงจะเกิดการขยายตัวของแก๊ส ทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นเซลล์ขึ้นในพลาสติก ซึ่งสารเกิดฟองสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ สารเกิดฟองทางกายภาพ (Physical Blowing Agents) และสารเกิดฟองทางเคมี (Chemical Blowing Agents) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 สารเกิดฟองทางกายภาพ

สารเกิดฟองทางกายภาพเป็นแก๊สหรือสารประกอบที่ทำให้เกิดเป็นแก๊ส โดยเกิดกระบวนการระเหย (Evaporation) การทำให้ตัวที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับ (Desorption) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือความดันลดลง สารเกิดฟองทางกายภาพเป็นสารที่มีจุดเดือดต่ำที่กระจายในวัสดุโฟม สมบัติที่เกี่ยวข้องกับสารเกิดฟองทางกายภาพ มีดังนี้

- (1) ไม่มีผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของพอลิเมอร์หรือสารประกอบในการเกิดโฟม
- (2) มีการละลายและการผสมกับส่วนผสมอื่นในการเกิดโฟมได้ดี
- (3) มีความเสถียรต่อความร้อนและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในรูปของแก๊ส
- (4) มีความดันไอต่ำที่อุณหภูมิห้อง
- (5) มีความสามารถในการระเหยสูงเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก หรือความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาคายความร้อน มีค่าความจุความร้อนและค่าความร้อนแฝงต่ำ

สารเกิดฟองทางกายภาพโดยทั่วไปมีราคาสูง ไม่มีของแข็งตกค้าง ซึ่งมีผลต่อสีและสมบัติของพอลิเมอร์ แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษ เช่น ถังเก็บ ปัม เครื่องอัด และเครื่องมือวัดที่จำเป็น ซึ่งมีความสำคัญกับผลิตภัณฑ์โฟม สารเกิดฟองทางกายภาพสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดดังนี้

1. สารเกิดฟองทางกายภาพที่เป็นของเหลวระเหยง่าย (Volatile Liquid) เช่น สารประกอบฟรอนส์ (Freons) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับฮาโลเจน (Halogenated Hydrocarbon) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบเส้น (Aliphatic Hydrocarbon) เป็นต้น
2. สารเกิดฟองทางกายภาพที่เป็นของแข็ง (Solid Blowing Agent) เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ดินเหนียว (Clays) และ ซิลิกาเจล (Silica Gel)

### 2.3.2 สารเกิดฟองทางเคมี

สารเกิดฟองทางเคมีเป็นสารประกอบที่มีลักษณะเฉพาะหรือสารผสมที่ทำให้เกิดแก๊สแก๊สที่เกิดขึ้นนี้ได้จากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี คือเกิดจากการสลายตัวของสารประกอบที่อุณหภูมิการสลายตัว (Thermal Decomposition) สารเกิดฟองทางเคมีมีข้อดีคือเป็นสารเกิดฟองที่รวมตัวได้ง่ายกับพอลิเมอร์ในการเกิดโฟม สมบัติที่เกี่ยวข้องกับสารเกิดฟองทางเคมี มีดังนี้

- (1) อุณหภูมิการสลายตัวของสารเกิดฟองทางเคมีต้องสามารถดำเนินการกับกระบวนการเกิดโฟมได้ เช่น จุดหลอมเหลว
- (2) แก๊สต้องถูกปลดปล่อย (Liberate) ในช่วงอุณหภูมิที่แคบ
- (3) อัตราการปลดปล่อยของแก๊ส (Rate of gas liberation) ต้องมีค่าสูงพอและถูกควบคุมโดยอุณหภูมิ ความดัน และส่วนประกอบของตัวถูกระงับ

(4) สารเกิดฟองทางเคมีและแก๊สที่ถูกปลดปล่อยจะต้องกระจายและละลายในพอลิเมอร์เหลวได้ดี

(5) การสลายตัวของสารเกิดฟองทางเคมีต้องไม่ใช่พลังงานสูงเพราะจะทำให้พอลิเมอร์ถูกทำลายด้วยความร้อน

(6) การสลายตัวของสารเกิดฟองทางเคมีและผลิตภัณฑ์ต้องไม่มีผลกับปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ หรือเกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์

(7) อัตราการปลดปล่อยแก๊สและความดันภายในระบบต้องไม่ลดลงระหว่างกระบวนการสลายตัวของสารเกิดฟองทางเคมี

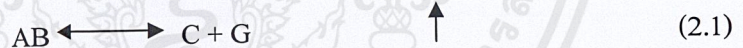
สารเกิดฟองทางเคมีส่วนมากจะอยู่ในรูปของแข็ง สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1. Exothermic chemical blowing agents เป็นสารเกิดฟองทางเคมีที่จะคายความร้อนออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี

2. Endothermic chemical blowing agents เป็นสารเกิดฟองทางเคมีที่จะดูดความร้อนเข้าไปในการเกิดปฏิกิริยาเคมี

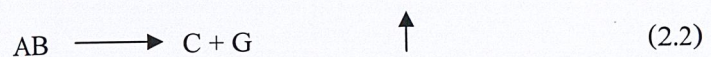
โดยสารเกิดฟองทางเคมีทั้งสองแบบที่นิยมใช้กันมากสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

- สารประกอบที่ปลดปล่อยแก๊สออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวของความร้อนที่ผันกลับได้ โดยสารเกิดฟองทางเคมีที่จัดอยู่ในชนิดนี้ได้แก่ สารประกอบจำพวกเกลืออุมิเนียมของกรดอินทรีย์และของกรดอนินทรีย์ และสารประกอบของ Bicarbonates และ Carbonates ของ Alkaline และ Alkaline earth metals



จากสมการที่ (2.1) G คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวของความร้อน จากสมการเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ที่จะทำให้ปริมาณของแก๊สลดลงซึ่งส่งผลให้แรงดันภายในเซลล์ของโฟมมีค่าลดลงส่งผลให้วัสดุเกิดการหดตัวได้

- สารประกอบที่ปลดปล่อยแก๊สออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวของความร้อนแบบผันกลับไม่ได้ เช่น สารประกอบจำพวก Aromatic, Aliphatic-aromatic, Aliphatic-azo, Diazo และ Diazoamides และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆจะเกิดการสลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังสมการที่ (2.2)



ส่วนมากแก๊สที่ได้จะเป็น  $N_2$ ,  $CO_2$  และ  $NH_3$  โดยปฏิกิริยาสลายตัวของความร้อน ดังสมการที่ (2.2) มักจะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบผันกลับไม่ได้

- สารเกิดฟองทางเคมีที่อยู่ในรูปของผสมที่จะปลดปล่อยแก๊สออกมาเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแต่ละองค์ประกอบ โดยปฏิกิริยาการปลดปล่อยแก๊สของของผสมแสดงในสมการที่ (2.3)



ตัวอย่างสารเกิดฟองทางเคมีชนิดนี้คือ ปฏิกิริยาระหว่าง Sodium nitrile กับ Ammonium chloride และปฏิกิริยาระหว่าง Acids ทั้งที่เป็น Organics เช่น Stearic และ Oleic และ Inorganics เช่น Hydrochloric sulfuric และ Orthophosphoric กับ Carbonates หรือกับโลหะหมู่ 2 และ 3 ในตารางธาตุ

## 2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง [6]

### 2.4.1 Ethylene-Propylene Diene Rubber : EPDM

ยาง EPDM เป็นยางสังเคราะห์ที่พัฒนามาจากยาง EPM (Ethylene-Propylene Rubber) โดยเติมมอนอเมอร์ตัวที่สาม คือ ไดอีน (Diene) ประเภท non-conjugated diene ลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ทำให้ยางที่ได้มีส่วนที่ไม่อิ่มตัว (พันธะคู่) อยู่ในสายโซ่โมเลกุล ยางชนิดนี้จึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน แต่ไดอีนที่เติมลงไปไม่ได้ไปแทรกอยู่ที่สายโซ่หลักของโมเลกุลแต่ไปอยู่ที่โซ่กิ่ง (Branch Chain) ดังนั้นสายโซ่หลักยังคงเหมือนเดิมหรือไม่มีผลต่อสายโซ่หลักมากนัก จึงทำให้ยาง EPDM ยังคงมีสมบัติเด่นในเรื่องการทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน แสงแดด ออกซิเจน โอโซน สารเคมี กรด ด่าง ได้ดีมาก และมีความยืดหยุ่นตัวได้ดีที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ มักใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ภายนอกเนื่องจากทนต่อสภาพอากาศได้ดีและใช้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เป็นส่วนใหญ่ เช่น ยางขอบกระจก ยางปิดน้ำฝน ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิล สายพานลำเลียงแผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา

#### - การแบ่งเกรด

ยาง EPDM มีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีน รวมถึงปริมาณของไดอีน โดยทั่วไปยางชนิดนี้มีเอทิลีนอยู่ในช่วง 45-85 % โดยโมล หรือ 40-80 % โดยน้ำหนัก แต่เกรดที่มีโดยทั่วไปจะมีปริมาณเอทิลีนอยู่ประมาณ 50-70 % โดยโมล และมีปริมาณไดอีนอยู่ในช่วง 3-11 % โดยโมล แม้ว่าไดอีนที่ใช้กันอย่างกว้างขวางจะมีอยู่ 3 ชนิดคือ dicyclopentadiene (DCPD), ethylidene norbornene (ENB) และ trans-1,4-hexadiene (1,4 HD) แต่ชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ ENB เนื่องจากจะทำให้โมเลกุลของยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันหรือปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันสูงที่สุด แม้ว่าการใช้ 1,4 HD จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ช้ากว่า ENB แต่สมบัติบางประการของยางจะดีกว่า เช่น

ความทนทานต่อความร้อน รวมถึงการบดผสมและการขึ้นรูปยางก็จะทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากโมเลกุลของยางมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง (Linear Molecules) ส่วนการใช้ DCPD จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยากงรูปได้ช้าที่สุด

สัดส่วนของเอทิลีนและ โพรพิลีนในยางก็มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติของยาง กล่าวคือยางที่มีปริมาณเอทิลีนสูงจะมีความแข็งแรงในสภาพที่ยังไม่คงรูปสูง แต่เมื่อปริมาณของเอทิลีนลดลง ยางจะนิ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น โดยนอกจากจะมีการแบ่งเกรดตามชนิดและปริมาณของไดอินและสัดส่วนของเอทิลีนและ โพรพิลีนแล้ว ยังมีการแบ่งเกรดยาง EPDM ตามความหนืดอีกด้วย

ยางเกรดที่มีความหนืดต่ำแม้ว่าจะสามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย แต่สามารถรับสารตัวเติมได้แก่ สารเพิ่มเนื้อ (Filler), สารเพิ่มความนุ่ม (Softener), สารทำให้เกิดฟอง ฯลฯ ได้ในปริมาณปานกลางเท่านั้นจึงเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูง

#### - สมบัติทั่วไป

ยาง EPDM มีความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่ำกว่ายางชนิดอื่น โดยมีค่าประมาณ 0.86-0.87  $\text{g/cm}^3$  และมีค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Temperature) ประมาณ  $-60^\circ\text{C}$

**ความยืดหยุ่น (Elasticity)** ยาง EPDM มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางชนิดอื่นๆ แต่ยังต่ำกว่ายางธรรมชาติ

**ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength)** เนื่องจากการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ในสายโซ่โมเลกุลเป็นแบบไม่มีรูปแบบทำให้ได้พอลิเมอร์แบบอสัณฐาน ยางชนิดนี้จึงไม่สามารถตกผลึกได้จึงส่งผลให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำและต้องอาศัยการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย โดยค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางที่ได้รับการเสริมแรงจะสูงหรือต่ำมากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่ใช้

**ความทนทานต่อการฉีกขาด (Shear Strength)** เมื่อได้รับการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมที่เหมาะสม ยาง EPDM จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงยางชนิดนี้จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

**ความทนทานต่อแรงอัด (Compression Set)** ยาง EPDM มีค่า Compression Set ต่ำมาก โดยเฉพาะในยางเกรดที่มี ENB ในปริมาณมากและได้รับการคงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์หรืออาจคงรูปด้วยระบบกำมะถันที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง แต่ค่า Compression set ของยางที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ค่า Compression set ของยางที่คงรูปด้วยระบบกำมะถันจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

**สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic Properties)** ยาง EPDM มีสมบัติเชิงพลวัตที่ดีมากและมีความทนทานต่อความล้าสูง โดยเฉพาะในยางที่ได้รับการคงรูปด้วยระบบกำมะถันซึ่งมีสมบัติเชิงพลวัตใกล้เคียงกับยาง SBR

**ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging Properties)** ยาง EPDM มีพันธะคู่ในโมเลกุลน้อยมาก ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้เป็นอย่างดี (ดีกว่ายาง SBR และ NBR แต่ด้อยกว่ายางซิลิโคน) นอกจากนี้ยาง EPDM ยังทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสารเคมี กรด และด่างได้ดีอีกด้วย ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณ ไดอินที่มีอยู่ในโมเลกุลยาง EPDM เกรดที่มีไดอินต่ำจะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูง จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ แต่ว่ายางในเกรดที่มีไดอินค่อนข้างสูงอาจจำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนและแสงแดดลงไปด้วย อย่างไรก็ตามยางชนิดนี้ทุกเกรดมีความทนทานต่อโอโซนดีมาก จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกัน โอโซน (Antiozonants) ส่วนระบบการคงรูปก็มีผลกระทบโดยตรงต่อความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนของยาง เพราะยางที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์จะมีความทนทานต่อความร้อนและโอโซนสูงกว่ายางที่คงรูปด้วยกำมะถัน

**ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil & Chemical Resistance)** จากลักษณะโครงสร้างของโมเลกุล จะเห็นว่ายาง EPM และ EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงไม่ทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดี ยางชนิดนี้จึงทนต่อกรด ด่าง น้ำ และตัวทำละลายที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบได้เป็นอย่างดี มีความทนทานต่อน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ได้ปานกลาง แต่ไม่ทนต่อตัวทำละลายที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ กรดอินทรีย์เข้มข้น ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง (Aliphatic Hydrocarbon Solvents) และตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนวงแหวน (Aromatic Hydrocarbon Solvents) เป็นต้น

**ความเป็นฉนวน (Insulation)** ยางชนิดนี้มีค่าความต้านไฟฟ้าจำเพาะสูงมาก ดังนั้น ยางจึงมีความเป็นฉนวนสูงและยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นฉนวนได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยางชนิดนี้ยังดูดซึมน้ำได้น้อยมาก จึงเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตยางหุ้มสายเคเบิลในกรณีที่สายเคเบิลนั้นต้องสัมผัสกับน้ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง EPM กับยาง EPDM พบว่ายาง EPM มีความเป็นฉนวนสูงกว่ายาง EPDM เล็กน้อย

**การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Flexibility)** ยาง EPDM มีสมบัติด้านการหักงอที่อุณหภูมิต่ำได้ดีใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

**อุณหภูมิของการใช้งาน (Service Temperature)** ยาง EPDM ที่ได้รับการคงรูปด้วยกำมะถันจะมีอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งานต่ำกว่ายางที่ได้รับการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ โดยทั่วไปยาง EPDM สามารถนำไปใช้ได้ทั้งที่อุณหภูมิตั้งแต่  $-40^{\circ}\text{C}$  ถึง  $150^{\circ}\text{C}$  ปกติยางจะทนต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่  $165^{\circ}\text{C}$  ได้นาน 1 เดือน หรือที่  $125^{\circ}\text{C}$  ได้นาน 5 ปี ทั้งนี้สมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น การเลือกใช้ชนิดของสารป้องกันเสื่อมสภาพและปริมาณของไดอินในยางสังเคราะห์ เป็นต้น

#### 2.4.2 ยางเหลว PB (Polybutadiene)

ยางเหลว PB เกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของโมโนเมอร์ 1,3-butadiene ซึ่งยางเหลว PB ที่ใช้ในการทดลองนี้มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ความหนาแน่น  $0.89\text{ g/cm}^3$  มวลโมเลกุล  $1400\text{ g/mol}$  ความหนืด  $1600\text{ cps}$  ที่  $25^{\circ}\text{C}$  และมีค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$

## 2.5 สมบัติของสารกึ่งฟองที่ใช้ในการทดลอง [7]

### 2.5.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide)

คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สในบรรยากาศซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอม ต่อหนึ่งโมเลกุล คาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในสารประกอบเคมีที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด และมักเรียกด้วยสูตรเคมี  $\text{CO}_2$  เมื่ออยู่ในสถานะของแข็ง และเรียกว่า น้ำแข็งแห้ง (Dry Ice) ซึ่งในสถานะแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่มีปริมาณมากเป็นอันดับ 4 ในอากาศ รองจากไนโตรเจน ออกซิเจนและ อาร์กอน

คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การหายใจของสิ่งมีชีวิตหรือการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์ แก๊สนี้เป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เพื่อให้คาร์บอนและออกซิเจนในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงนี้ พืชจะปล่อยแก๊สออกซิเจนออกมาสู่บรรยากาศ ทำให้สัตว์ได้ใช้ออกซิเจนนี้ในการหายใจ การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของพืชนี้เป็นการลดแก๊สเรือนกระจกได้ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่เป็นหนึ่งในสาเหตุของปรากฏการณ์เรือนกระจก

คาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่น  $1.98\text{ kg/m}^3$  ซึ่งคิดเป็น 1.5 เท่าของอากาศ โมเลกุลประกอบด้วยพันธะคู่ 2 พันธะ ( $\text{O}=\text{C}=\text{O}$ ) ไม่ติดไฟและไม่ทำปฏิกิริยา คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี หากหายใจเอาแก๊สนี้เข้าไปในปริมาณมาก จะรู้สึกเปรี้ยวที่ปากและเกิดการระคายเคืองที่จมูกและคอ เนื่องจากอาจเกิดการละลายของแก๊สนี้ในเมือกในอวัยวะ ก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิกอย่างอ่อน คาร์บอนไดออกไซด์จะกลายเป็นของแข็งที่มีสีขาว อุณหภูมิ  $-78^{\circ}\text{C}$  โดยไม่ผ่านการเป็นของเหลวก่อน หากต้องการทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเหลว ต้องใช้ความดันไม่น้อยกว่า

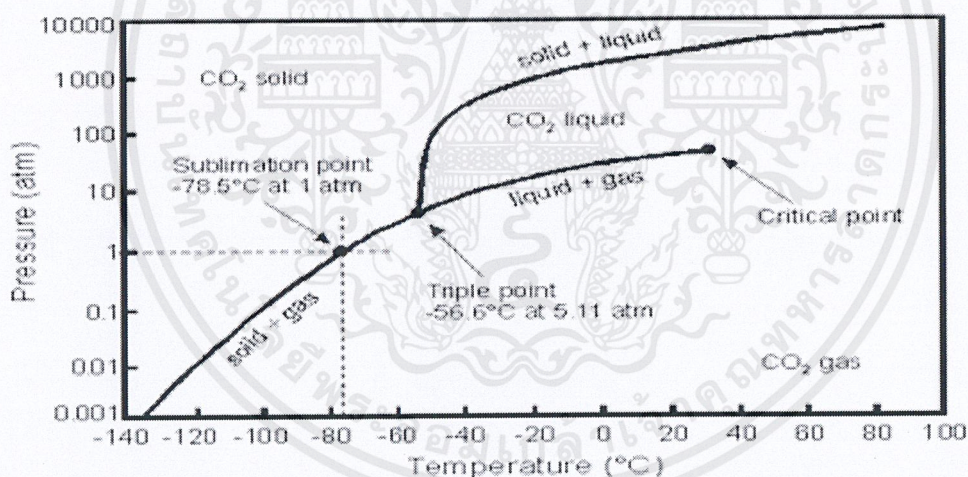
### 5.1 บรรยากาศ

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide) คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีสถานะแก๊สปนอยู่ในอากาศที่ความดันปกติ ( $1\text{ atm}$ ) หรือมักใช้ในรูปของแข็ง ซึ่งเรียกว่า

น้ำแข็งแห้ง ใช้ในการให้ความเย็น แต่หากมีการเพิ่มอุณหภูมิและความดันจนมีค่าที่สูงจนถึงจุดจุดหนึ่ง คาร์บอนไดออกไซด์ก็จะเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะผสมที่เรียกว่าของไหลวิกฤต

คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต คือ คาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะสองสถานะร่วมกันระหว่างของเหลวและแก๊ส ภายใต้สภาวะวิกฤตที่อุณหภูมิ  $31.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  และความดัน  $72.9\text{ atm}$  ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะมีคุณสมบัติคือมีความหนาแน่นเหมือนของเหลว และมีการกระจายตัวได้เหมือนแก๊ส สำหรับการใช้งานที่สำคัญคือใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดสารเคมี โดยมีความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ

โดยทั่วไปเทอร์โมพลาสติกและเซรามิก สามารถผลิตได้จากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เป็นสารรีเอเจนท์ ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวนี้ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบอัลคาไลน์และมีผลพลอยได้เป็นน้ำเกิดขึ้น นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมักใช้ในกระบวนการเกิดโฟมของพอลิเมอร์ โดยใช้เป็นตัวทำละลายทำให้พอลิเมอร์อิมัลชัน ซึ่งเมื่อทำการลดความดันและให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เกิดการขยายตัว ทำให้เกิดเป็นช่องว่างภายในเนื้อของพอลิเมอร์ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ได้แก่ microcellular foams เป็นต้น



รูปที่ 2.3 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์

## 2.5.2 สารทำความเย็น (Refrigerant)

สารทำความเย็น (Refrigerant) เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบทำความเย็นแบบอัดไอ ทำหน้าที่รับความร้อนจากเนื้อที่ว่างหรือเทหวัตถุต่างๆในขณะที่เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ เพื่อทำให้เกิดความเย็น

## คุณสมบัติของสารทำความเย็น

### คุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical properties)

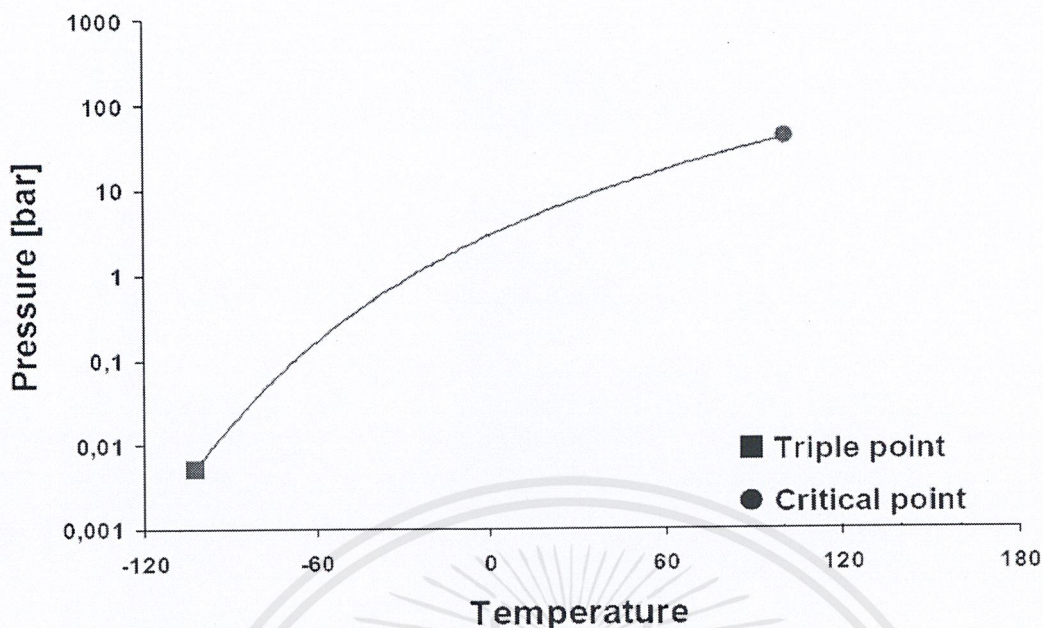
- (1) ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง ความหนาแน่นสูง
- (2) จุดแข็งตัวต่ำ
- (3) มีความต้านทานไฟฟ้าสูง

### คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) ได้แก่

- (1) มีโครงสร้างทางเคมีมั่นคง คือ สามารถทำงานได้ภายใต้อุณหภูมิและความดันปกติในระบบ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพ
- (2) ไม่ติดไฟหรือไม่มีการระเบิดทั้งในสถานะที่เป็นของเหลวและไอ
- (3) ไม่ทำปฏิกิริยาหรือเกิดการกัดกร่อนในอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในระบบ เช่น ยาง พลาสติก เหล็ก ทองเหลือง ทองแดง อะลูมิเนียม เป็นต้น
- (4) ไม่เป็นพิษ หรือไม่มีอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ หรือสิ่งแวดล้อมใดๆ

R-134a (1,1,1,2-tetrafluoroethane :  $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ ) เป็นสารทำความเย็นกลุ่มอีเทน ซึ่งโมเลกุลของอีเทนประกอบด้วยคาร์บอน 2 อะตอม และไฮโดรเจน 6 อะตอม เมื่อเปลี่ยนไฮโดรเจนด้วยฟลูออรีน จำนวน 4 อะตอมจะได้เป็น R - 134a เป็นสารทำความเย็นที่ถูกพัฒนามาใช้แทนสารจำพวกคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่  $-103.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  จุดเดือด  $-26.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่ความดัน 1 atm ความหนาแน่น  $0.00425\text{ g/cm}^3$  มีคุณสมบัติในการรวมตัวกับน้ำได้ดี

R - 134a ที่สถานะเหนือวิกฤต คือ R - 134a ที่อยู่ในสถานะสองสถานะร่วมกันระหว่างของเหลวและแก๊ส ภายใต้สถานะวิกฤตที่อุณหภูมิ  $101.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  และความดัน 40.7 bar ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะมีคุณสมบัติคือมีความหนาแน่นเหมือนของเหลว และมีการกระจายตัวได้ดีเหมือนแก๊ส สำหรับการใช้งานที่สำคัญคือใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดสารเคมี โดยมีความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ



รูปที่ 2.4 เฟสไดอะแกรมของ R-134a

## 2.6 การแพร่และการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ [8]

ค่าการแพร่และการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์เป็นสมบัติสำคัญในการผลิต โฟม นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาถึงสมบัติเหล่านี้ ซึ่งงานวิจัยทั้งหลายได้แสดงให้เห็นว่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อความดันอ้อมตัวเพิ่มขึ้น และเป็นไปตามกฎของเฮนรี่ ดังนั้นบ่อยครั้งที่นำค่าคงที่ของเฮนรี่มาใช้ในการประเมินค่าการละลายของแก๊สโมเลกุลต่ำในระบบพอลิเมอร์ หลอมเหลวควบคู่กับสมการแวนท์ฮอฟฟ์ (Van't Hoff equation) ซึ่งสามารถอธิบายถึงค่าการละลายที่ขึ้นกับอุณหภูมิได้

2.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับความหนืดของสารละลาย ตามสมการของ Stokes – Einstein

$$D = \frac{RT}{N_A} \frac{1}{6\pi\mu r_u} \quad (2.4)$$

โดยที่  $N_A$  = Avogadro number

$T$  = Temperature

$\mu$  = viscosity ของ solution

$r_u$  = solute radius

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง Einstein สมมติว่า solute radius นั้นใหญ่กว่า solvent radius โดยจากสมการจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แปรผันตามอุณหภูมิ แปรผกผันกับค่าความหนืดของสารละลาย และแปรผกผันกับขนาดของตัวถูกละลาย

### 2.6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สในพอลิเมอร์อย่างง่าย [9]

การแพร่ของแก๊สเข้าไปในพอลิเมอร์จะมีพฤติกรรมการแพร่เป็นแบบ Fickian คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่แปรผันตามความเข้มข้นและเวลา แต่แปรผันตามอุณหภูมิเป็นหลัก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสดังสมการที่ (2.5)

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{R_g T}\right) \quad (2.5)$$

โดย  $\log D_0 = \frac{E_D \times 10^{-3}}{R_g} - 4 \pm 0.4$  (2.6)

|       |       |     |                                |
|-------|-------|-----|--------------------------------|
| เมื่อ | $D$   | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊ส  |
|       | $D_0$ | คือ | ค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลแฟกเตอร์ |
|       | $E_D$ | คือ | ค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่    |
|       | $R_g$ | คือ | ค่าคงที่ของแก๊ส                |
|       | $T$   | คือ | อุณหภูมิ                       |

จากสมการของอาร์เรเนียสจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สได้โดยการพิจารณาค่าความร้อนของระบบซึ่งค่าพรีเอ็กซ์โพเนนเชียลแฟกเตอร์ ( $D_0$ ) และค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่ ( $E_D$ ) คือค่าคงที่เฉพาะของระบบพอลิเมอร์แต่ละชนิด มีหน่วยเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D$ ) การคำนวณสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่  $\left(\frac{E_D}{R_g}\right)$  แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D$ ,  $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ ) และค่าพลังงานกระตุ้นการแพร่ ( $E_D/R_g$ ,  $10^3 \text{ K}$ ) สำหรับแก๊สที่อุณหภูมิคงที่ 298 K

| Gas/Polymer                              | N <sub>2</sub> |                                | O <sub>2</sub> |                                | CO <sub>2</sub> |                                |
|--|----------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
|  | D              | E <sub>D</sub> /R <sub>g</sub> | D              | E <sub>D</sub> /R <sub>g</sub> | D               | E <sub>D</sub> /R <sub>g</sub> |
| Polybutadiene                            | 1.1            | 3.60                           | 1.5            | 3.40                           | 1.05            | 3.65                           |
| Polychloroprene<br>(Neoprene rubber)     | 0.24           | 5.18                           | 0.38           | 4.74                           | 0.23            | 5.40                           |
| cis-1,4-polyisoprene<br>(natural rubber) | 1.1            | 4.35                           | 1.73           | 4.03                           | 1.25            | 4.13                           |
| Silicone rubber                          | 15             | 1.35                           | 25             | 1.10                           | 15              | 1.35                           |
| HDPE                                     | 0.10           | 4.5                            | 0.17           | 4.40                           | 0.12            | 4.25                           |
| LDPE                                     | 0.35           | 4.95                           | 0.46           | 4.80                           | 0.37            | 4.60                           |
| PET                                      | 0.0014         | 5.25                           | 0.0036         | 5.50                           | 0.0015          | 5.95                           |
| PS                                       | 0.06           | 4.25                           | 0.11           | 4.15                           | 0.06            | 4.35                           |
| PVC, unplasticized                       | 0.0038         | 7.45                           | 0.012          | 6.55                           | 0.0025          | 7.75                           |
| PVAc                                     | 0.03           | 6.15                           | 0.056          | 7.30                           | -               | -                              |
| PC                                       | 0.015          | 4.35                           | 0.021          | 3.85                           | 0.005           | 4.50                           |
| Poly(ethyl<br>methacrylate)              | 0.17           | 5.14                           | 0.89           | 3.82                           | 3.79            | 3.98                           |
| Poly(tetrafluoro<br>ethylene)            | 0.088          | 3.60                           | 0.152          | 3.16                           | 0.095           | 3.44                           |
| Teflon (FEP)                             | 0.0948         | 4.63                           | 0.184          | 4.17                           | 0.105           | 4.40                           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สในพอลิเมอร์ตามแบบจำลองของ Vrentas และ Duda [8]

Vrentas และ Duda ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึ่งกันและกัน ศักย์เคมี และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยตัวเองของระบบแก๊สพอลิเมอร์ ดังนี้

$$D_{mutual} = \frac{x_2 D_1 + x_1 D_2}{RT} \left( \frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1} \right)_{T,P} \quad (2.7)$$

- โดย  $D_1, D_2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยตัวเองของแก๊สและพอลิเมอร์ ตามลำดับ
- $\mu_1$  คือ ค่าศักย์เคมีของแก๊สในพอลิเมอร์
- $x_1, x_2$  คือ สัดส่วนโมลของแก๊สและพอลิเมอร์ ตามลำดับ

โดยปกติแล้วค่า  $D_2$  จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ  $D_1$  นั่นคือ  $x_1 D_2 \ll x_2 D_1$  ดังนั้นสมการ (2.7) ลดรูปได้ดังนี้

$$D_{mutual} = \frac{x_2 D_1}{RT} \left( \frac{\partial \mu_1}{\partial \ln x_1} \right)_{T,P} \quad (2.8)$$

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วยตัวเองสามารถประยุกต์ได้จากแบบจำลองของ Maeda และ Paul ดังนี้

$$D_{self} = RTM = RTA \exp \left[ \frac{-B}{(\hat{V}_{mix} - \hat{V}_{mix}^0)} \right] \quad (2.9)$$

- โดย  $A, B$  คือ ค่าคงที่ของแก๊สแต่ละชนิด
- $\hat{V}_{mix}$  คือ ปริมาตรจำเพาะของระบบ
- $\hat{V}_{mix}^0$  คือ ปริมาตรจำเพาะของระบบที่ 0 K

2.6.4 การวัดค่าการแพร่ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการวัดค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ [1]

โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในพอลิเมอร์ เนื่องจากการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้เกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์ นั่นคือจะทำให้ปริมาตรจำเพาะของพอลิเมอร์เปลี่ยนไป เนื่องจากการบวมตัวเกิดขึ้นระหว่างการวัดค่าการแพร่ โดยการบวมตัวจะแสดงในรูปของคิกรี ( $\xi$ ) ได้ดังนี้

$$\xi(t) = \frac{V_0 + \Delta V(t)}{V_0} = \frac{L_0 + \Delta L(t)}{L_0} \quad (2.10)$$

โดย  $\xi(t)$  คือ ดิกรีของการบวมตัวที่เวลาใดๆ

$V$  คือ ปริมาตรของพอลิเมอร์

$L$  คือ ความสูงของพอลิเมอร์

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประมาณได้จากสมการดังนี้

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left[ \frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right] \quad (2.11)$$

ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สัมพันธ์กับดิกรีของการบวมตัวโดย

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{V_t + V_0}{V_\infty - V_0} = \frac{\xi(t) - 1}{\xi(\infty) - 1} \quad (2.12)$$

$$\frac{M_{CO_2}(t)}{M_{CO_2}(t=\infty)} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left[ \frac{-D\pi^2 t}{4L^2} \right] \quad (2.13)$$

ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สัมพันธ์กับดิกรีของการบวมตัวโดย

$$\ln \left\{ \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \frac{\xi(t) - 1}{\xi(\infty) - 1} \right] \right\} = \frac{-D\pi^2 t}{4L^2} \quad (2.14)$$

## 2.7 ค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์ [9]

ค่าการละลายของแก๊ส (Gas solubility) ในพอลิเมอร์มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมโพลีเมอร์ ซึ่งกระบวนการผลิตโพลีเมอร์จะอาศัยค่าการละลายของแก๊สที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ในการดำเนินการผลิตโพลีเมอร์ โดยทั่วไปแล้วค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่จะมีค่าสูงขึ้นตามค่าความดันที่สูงขึ้น ซึ่งค่าการละลายมีความสำคัญในหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการผลิตโพลีเมอร์ กระบวนการแยกแก๊สด้วยการผ่านเมมเบรน เป็นต้น

### 2.7.1 ค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์อย่างง่าย

ค่าการละลายของแก๊ส คือ ปริมาณของแก๊สที่ละลายในพอลิเมอร์ที่สภาวะสมดุลกับความดันย่อย (Partial Pressure,  $P$ ) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.15)

$$\frac{V_A}{V_P} = S(P)P \quad (2.15)$$

โดย  $V_A$  คือ ปริมาณของแก๊สที่ละลายในพอลิเมอร์  
 $V_B$  คือ ปริมาตรของสารละลาย  
 $S$  คือ ค่าการละลาย  
 $P$  คือ ความดันย่อย

ดังนั้นนิยามค่าการละลายตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสแสดงได้ดังสมการที่ (2.16)

$$S = S_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_s}{R_g T}\right) \quad (2.16)$$

และ  $\log S_0 = -5.5 - 0.005 \frac{\epsilon}{k}$  (2.17)

เมื่อ  $S_0$  คือ ค่าพรีเอกซ์โพเนนเชียลแฟกเตอร์  
 $\Delta H_s$  คือ ค่าความร้อนของการดูดซับ  
 $\frac{\epsilon}{k}$  คือ Lennard – Jones Temperature

ค่าการละลายและพลังงานความร้อนของแก๊สและพอลิเมอร์แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 ค่าการละลาย ( $S$ ,  $10^{-6}$  cm<sup>3</sup> (STP)/cm<sup>3</sup>.Pa) และ ค่าพลังงานความร้อนของการดูดซึม ( $\Delta H_s/R_g$ ,  $10^3$  K) สำหรับแก๊สที่อุณหภูมิ 298 K

| Gas/Polymer                              | N <sub>2</sub> |                  | O <sub>2</sub> |                  | CO <sub>2</sub> |                  |
|--|----------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|
|  | S              | $\Delta H_s/R_g$ | S              | $\Delta H_s/R_g$ | S               | $\Delta H_s/R_g$ |
| Polybutadiene                            | 0.44           | 0.51             | 0.96           | 0.14             | 9.87            | -1.06            |
| Polychloroprene<br>(Neoprene rubber)     | 0.36           | 0.16             | 0.74           | 0.25             | 8.19            | -1.15            |
| cis-1,4-polyisoprene<br>(natural rubber) | 0.55           | 0.25             | 1.02           | -0.51            | 9.20            | -1.50            |
| Silicone rubber                          | 0.81           | -                | 1.26           | -                | 4.30            | -                |
| HDPE                                     | 0.15           | 0.24             | 0.18           | -0.20            | 0.22            | -0.66            |
| LDPE                                     | 0.23           | 0.95             | 0.47           | 0.30             | 2.54            | 0.05             |
| PET                                      | 0.39           | -1.37            | 0.69           | -1.56            | 13.0            | -3.78            |
| PS                                       | -              | -                | 0.55           | -                | 6.5             | -                |
| PVC, unplasticized                       | 0.23           | 0.85             | 0.29           | 0.14             | 4.7             | -0.94            |
| PVAc                                     | 0.2            | -                | 0.64           | -0.55            | -               | -                |
| PC                                       | 0.28           | -                | 5.03           | -1.55            | 1.24            | -2.62            |
| Poly(ethyl methacrylate)                 | 0.57           | -0.25            | 0.84           | 0.55             | 11.3            | -0.51            |
| Poly(tetrafluoro ethylene)               | 1.20           | -0.66            | 2.1            | -0.87            | 9.2             | -1.76            |
| Teflon (FEP)                             | 1.25           | -0.95            | 2.02           | -1.11            | 9.08            | -1.89            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 สมดุลไอและของเหลวของสารละลายจริง

สำหรับระบบสมดุลระหว่างของเหลว (L) และไอ (V) ฟูกาซิตีขององค์ประกอบ  $i$  เท่ากัน

ในแต่ละวัฏภาค

$$\hat{f}_i^V = \hat{f}_i^L \quad (2.18)$$

จาก

$$A_i = \frac{f_i}{f_i^o} \quad (2.19)$$

ดังนั้น

$$A_i^V f_i^{ov} = A_i^L f_i^{oL} \quad (2.20)$$

จัดรูปในเทอมของสัมประสิทธิ์แอกติวิตี้ได้ดังนี้

$$\gamma_i = \frac{A_i}{x_i} = \frac{f_i}{f_i^o x_i} \quad (2.21)$$

เพราะฉะนั้น

$$\gamma_i^V y_i f_i^{ov} = \gamma_i^L x_i \hat{f}_i^{oL} \quad (2.22)$$

**สัมประสิทธิ์แอกติวิตี้จากข้อมูลสมดุลไอและของเหลว**

สำหรับระบบที่ความดันไม่สูงมากนัก (น้อยกว่า 10 bar) จะสามารถสมมติว่าวัฏภาคไอเป็นแก๊สอุดมคติ ทำให้สามารถประมาณค่า  $\gamma_i^V \approx 1$ ,  $f_i^{oL} \approx P$  และ  $\hat{f}_i^{oL} \approx P^o$  ดังนั้น จากสมการ (2.22) จะได้

$$\gamma_i = \frac{y_i P}{x_i P_i^o} \quad (2.23)$$

ซึ่งสมการนี้เหมาะกับกรณีที่ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์แอกติวิตี้ได้อย่างง่าย จากข้อมูลการทดลอง สมดุลไอ-ของเหลว ที่ความดันต่ำ (น้อยกว่า 10 bar)

ในกรณีที่สมดุลไอและของเหลวมีความดันสูงกว่า 10 atm ปริมาณโมลาร์ย่อยในกรณีของผสมจะไม่เท่ากับปริมาณโมลาร์ย่อยในกรณีของเหลวบริสุทธิ์ ดังนั้นจึงใช้สมการของ Prausnitz ดังนี้

$$A_i = \frac{y_i \phi_i P}{P_i^{\text{sat}} \phi_i^{\text{sat}} \exp\left(\frac{v_i^L (P - P_i^{\text{sat}})}{RT}\right)} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากสมการจะเห็นได้ว่าค่าแอกติวิตีเป็นฟังก์ชันกับทั้งความดันและอุณหภูมิ ดังนั้นจึงใช้ค่าแอกติวิตีอธิบายถึงปรากฏการณ์การบวมตัวของพอลิเมอร์ได้ดีกว่าค่าความดันเพียงอย่างเดียว

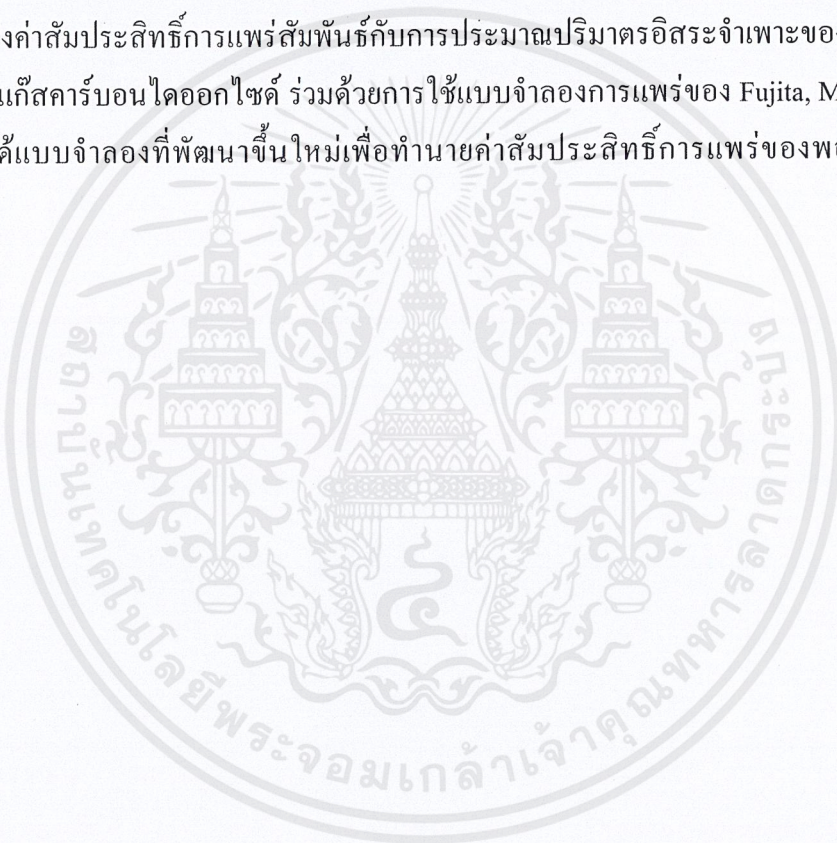
## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ming Wanga และคณะ [10] ได้ศึกษาค่าการละลายของ HFC-134a, HCFC-142b, Butane และ iso-Butane ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำหลอมเหลว (LDPE) ที่ความดัน 3.4 MPa อุณหภูมิ 383.15, 413.15 และ 473.15 K ค่าการละลายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงและความดันเพิ่มสูงขึ้น การวัดค่าการละลายของแก๊สในพอลิเมอร์มีความสัมพันธ์กับสมการสถานะของ Sanchez-Lacombe (S-L EOS) และอุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ค่า ในทุกกรณีการคำนวณจะมีค่าจากการทดลองและค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเป็น 3.0, 5.1, 7.2 และ 3.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ HFC-134a, HCFC-142b, บิวเทน และไอโซบิวเทน ตามลำดับ ค่าคงที่ของเฮนรี ( $K_p$ ) สำหรับบิวเทนและไอโซบิวเทนได้นำข้อมูลมาจากแหล่งตีพิมพ์ต่างๆและจากสมการของ Stiel ความสัมพันธ์สำหรับฟลูออโรคาร์บอนใน LDPE ได้ถูกพัฒนาให้อยู่ในรูปของค่าความดันวิกฤตของฟลูออโรคาร์บอน

Jong Sung Lim และคณะ [11] ได้ศึกษาสมดุลของของเหลวและไอสำหรับระบบสององค์ประกอบที่อุณหภูมิตั้งระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และ HFC-134a ที่อุณหภูมิ 323.15, 328.15, 333.15, 338.15 และ 343.15 K การวัดข้อมูลจะสัมพันธ์กับสมการสถานะของ Peng - Robinson งานวิจัยนี้ใช้สมการสถานะของ Peng - Robinson ร่วมกับกฎการผสมของ Wong-Sandler ในการประมาณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบสององค์ประกอบระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และ HFC-134a

Andrew K. Hebb และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ cross-linked polymethacrylate monoliths ที่มีรูพรุนด้วยวิธี free radical polymerization ที่มี R-134a เป็น porogenic solvent ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่แยกออกได้ง่าย (R-134a มีจุดเดือดเท่ากับ  $-26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) และทำให้ปฏิกิริยาเสร็จสิ้นได้ที่ความดันต่ำ (น้อยกว่า 20 bar) หากความเข้มข้นของมอนอเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงไป พบว่าพื้นที่ผิวกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูของ R-134a อาจมีการเปลี่ยนแปลงค่าได้ในช่วง  $5\text{--}320\text{ m}^2/\text{g}$  และ  $15\text{ nm} - 5\text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ แต่ในทางกลับกันความดันกลับมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อโครงสร้างของ R-134a เนื่องจากตามธรรมชาติของ R-134a ในสถานะของเหลวนั้นไม่สามารถอัดตัวได้

Surat Areerat และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาการละลายและการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง พอลิโพรพิลีน เอทิลีนเอทิลอะคริเลท และพอลิสไตรีน ทำการวัดที่อุณหภูมิจาก 150°C ถึง 200°C และความดันสูงถึง 12 MPa โดยใช้เครื่อง Magnetic Suspension Balance (MSB) ด้วยเทคนิคการชั่งน้ำหนักสำหรับการวัดการซึมซับแก๊ส ค่าการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในพอลิเมอร์แต่ละชนิดอธิบายด้วยค่าคงที่ของเฮนรี ค่าพารามิเตอร์ของอันตรกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับพอลิเมอร์หาได้จากข้อมูลการละลาย และใช้ในการประมาณความสัมพันธ์ของความดัน ปริมาตร อุณหภูมิ และปริมาตรอิสระจำเพาะของของผสมพอลิเมอร์กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่วัดได้ด้วยเครื่อง MSB สำหรับพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สัมพันธ์กับการประมาณปริมาตรอิสระจำเพาะของของผสมพอลิเมอร์กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร่วมด้วยการใช้แบบจำลองการแพร่ของ Fujita, Maeda และ Paul ทำให้ได้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใหม่เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพอลิเมอร์ที่ทำการศึกษา



## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงขนาด 1.2 ml
- 3.1.2 วาล์วและหัวปรับแรงดัน (Regulator)
- 3.1.3 ป้อนอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D)
- 3.1.4 เทอร์โมคัพเปิด และ ชุดควบคุมอุณหภูมิ
- 3.1.5 ชุดบันทึกอุณหภูมิ (DataLocker)
- 3.1.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Mettler Toledo รุ่น XS320011)
- 3.1.7 กล้องวิดีโอ (SONY รุ่น ExwaveHAD)

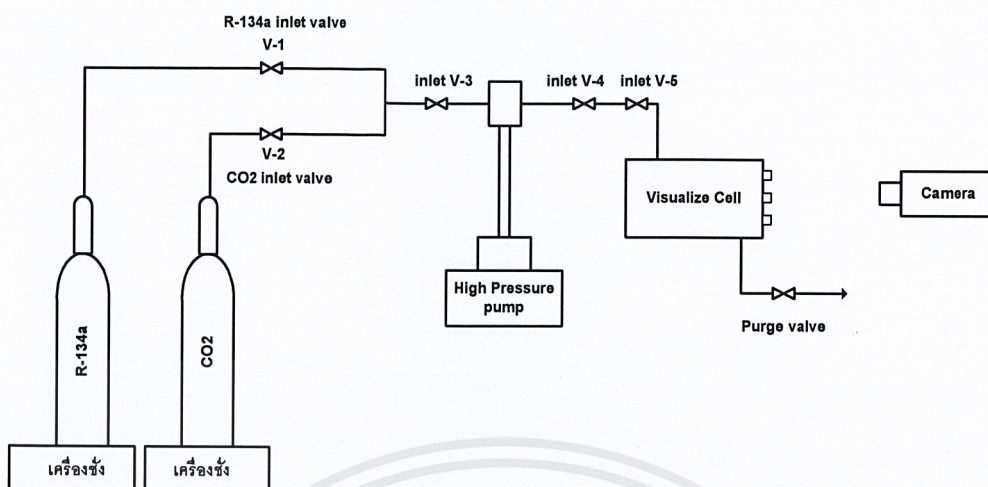
#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ยาง EPDM
- 3.2.2 ยางเหลว PB
- 3.2.3 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.95 % (Minimum Purity Grade)
- 3.2.4 แก๊ส R-134a

#### 3.3 วิธีการทดลอง

##### 3.3.1 การสังเกตการบวมตัวของยาง EPDM เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

1. เตรียมยาง EPDM ขนาด 2x6x14 mm
2. นำยางที่เตรียมแล้วใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบดังรูปที่ 3.1 แล้วติดตั้งกล้องดิจิทัลเพื่อบันทึกภาพการบวมตัวของยางทุกๆ 5 นาที โดยทำการทดลองที่ความดัน 80 bar และอุณหภูมิ 40 °C
3. นำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ Swelling Factor
4. จากค่า Swelling Factor ที่ได้ นำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สในยาง EPDM จากสมการ (2.13)
5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความดันที่ใช้เป็น 100 bar และ 120 bar จากนั้นทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 40 °C เป็น 50 °C ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง

### 3.3.2 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

1. เตรียมยางเหลว PB ปริมาตร 2 ml
2. นำยางที่เตรียมแล้วใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบดังรูปที่ 3.1 แล้วติดตั้งกล้องดิจิทัลเพื่อบันทึกภาพการบวมตัวของยางทุกๆ 5 นาที โดยทำการทดลองที่ความดัน 80 bar และอุณหภูมิ 40 °C
3. นำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ Swelling Factor
4. จากค่า Swelling Factor ที่ได้ นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซในยาง PB จากสมการ (2.13)
5. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความดันที่ใช้เป็น 100 bar และ 120 bar จากนั้นทดลองซ้ำอีกโดยเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 40 °C เป็น 50 °C ตามลำดับ

### 3.3.3 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤต

1. เตรียมยางเหลว PB ปริมาตร 2 ml
2. นำยางที่เตรียมแล้วใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบดังรูปที่ 3.1 แล้วติดตั้งกล้องดิจิทัลเพื่อบันทึกภาพการบวมตัวของยางทุกๆ 2.5 นาที โดยทำการทดลองที่ความดัน 80 bar และอุณหภูมิ 60 °C
3. อัดแก๊ส R-134a ปริมาตร 50 ml เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ก่อน จากนั้นค่อยอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามเข้าไปให้ได้ความดัน 80 bar และอุณหภูมิ 60 °C
4. นำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ Swelling Factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากค่า Swelling Factor ที่ได้ นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134 ที่สถานะเหนือวิกฤตในยางเหลว PB จากสมการ (2.14)

6. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนปริมาตรของก๊าซ R-134a เป็น 100 ml และปรับความดันเป็น 90 bar และ 100 bar ตามลำดับ

### 3.3.4 การชั่งน้ำหนักแก๊ส R-134a

1. เปิดแก๊ส R-134a เข้าระบบโดยเปิดวาล์ว V-1 และ V-3 จากรูปที่ 3.1
2. สูบแก๊ส R-134a จากถังเข้ามายังปั๊มอัดความดันสูงจนได้ปริมาตรประมาณ 50 ml แล้วปิดวาล์ว V-3 บันทึกน้ำหนักที่หายไปจากถัง
3. อัดแก๊ส R-134a เข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์ให้ปริมาตรระบอบสูบเป็นศูนย์
4. ไล่แก๊ส R-134a ออกจากระบบ
5. ตั้งค่าเครื่องชั่งเป็นศูนย์ เปิดวาล์ว V-3 สูบแก๊ส R-134a เข้าระบบให้มีปริมาตรที่พอดีกับการอัดครั้งแรก บันทึกน้ำหนักของถังแก๊สที่หายไป
6. คำนวณน้ำหนักของแก๊ส R-134a ที่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ได้จาก  
น้ำหนักแก๊ส R-134a = น้ำหนักของแก๊สที่หายไปครั้งแรก - น้ำหนักของแก๊สที่หายไปครั้งที่สอง

### 3.3.5 การชั่งน้ำหนักแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1. เปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระบบโดยเปิดวาล์ว V-2 และ V-3 จากรูปที่ 3.1
2. สูบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากถังเข้ามายังปั๊มอัดความดันสูงจนได้ปริมาตรถูกสูบประมาณ 250 ml ปิดวาล์ว V-3 บันทึกน้ำหนักที่หายไปจากถัง
3. อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์ด้วยความดัน 80 bar
4. ไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบ
5. ตั้งค่าเครื่องชั่งเป็นศูนย์ เปิดวาล์ว V-3 สูบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าระบบให้มีปริมาตรที่พอดีกับการอัดที่ความดัน 80 bar แล้วถูกสูบของปั๊มมีปริมาตรเป็นศูนย์ บันทึกน้ำหนักของถังแก๊สที่หายไป
6. คำนวณน้ำหนักของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ได้จาก  
น้ำหนักแก๊ส CO<sub>2</sub> = น้ำหนักของแก๊สที่หายไปครั้งแรก - น้ำหนักของแก๊สที่หายไปครั้งที่สอง

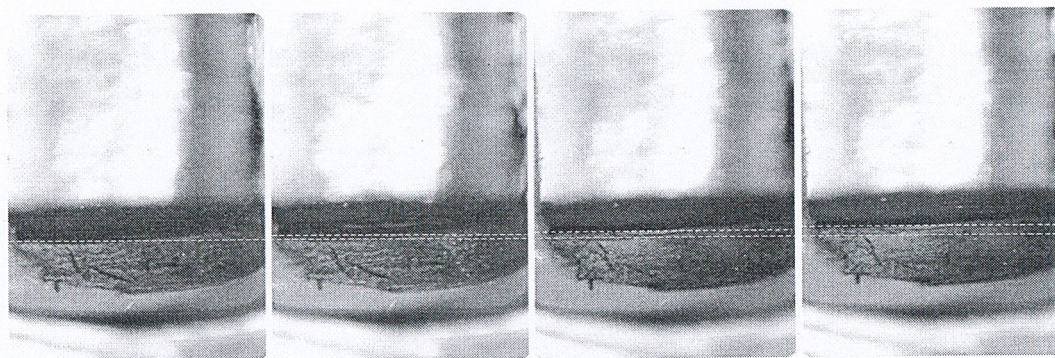
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษากระบวนการบวมตัวของพอลิเมอร์ โดยศึกษาขั้นตอนการบวมตัวของพอลิเมอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM และยางเหลว PB ซึ่งค่าการบวมตัวที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM และยางเหลว PB ปัจจุบันที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ทำการศึกษานั้นประกอบด้วยผลของอุณหภูมิและความดัน รวมถึงสัดส่วนของตัวทำละลายร่วม ตัวแปรควบคุมที่มีผลต่อการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในพอลิเมอร์นั้น สำหรับตัวอย่างยาง EPDM ที่น้ำหนักประมาณ 0.1 กรัม ที่อุณหภูมิ 40 - 50 °C ที่ความดัน 80 - 120 bar และใช้ยางเหลว PB ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว ปริมาตร 0.2 ml ที่อุณหภูมิ 40 - 60 °C ความดัน 80 - 120 bar โดยการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

#### 4.1 การสังเกตการบวมตัวของยาง EPDM เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

การสังเกตการบวมตัวของยาง EPDM เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิบัติการความดันสูงที่สามารถสังเกตการบวมตัวผ่านกระจกใส การสังเกตการบวมตัวของยาง EPDM นั้นจะทำการบันทึกภาพการบวมตัวของยางที่เวลาต่างๆด้วยกล้องวิดีโอ จากการทดลองสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงความสูงของยาง EPDM กับเวลาได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากรูปพบว่ายาง EPDM จะมีความสูงเพิ่มขึ้น โดยความสูงที่เพิ่มขึ้นนี้วัดโดยใช้โปรแกรม Image J โดยการจัดเรียงรูปให้ได้ตำแหน่งที่เท่ากันด้วยโปรแกรม Photoscape หลังจากนั้นจะกำหนดจุดอ้างอิงโดยให้จุดต่ำสุดของยาง EPDM ในแต่ละรูปเป็นจุดอ้างอิง จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 นาที พบว่าเริ่มมีการบวมตัวของยาง EPDM และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 150 นาที ยาง EPDM จะไม่มีการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น หรือเข้าสู่สภาวะสมดุล



เวลาเริ่มต้น

10 นาที

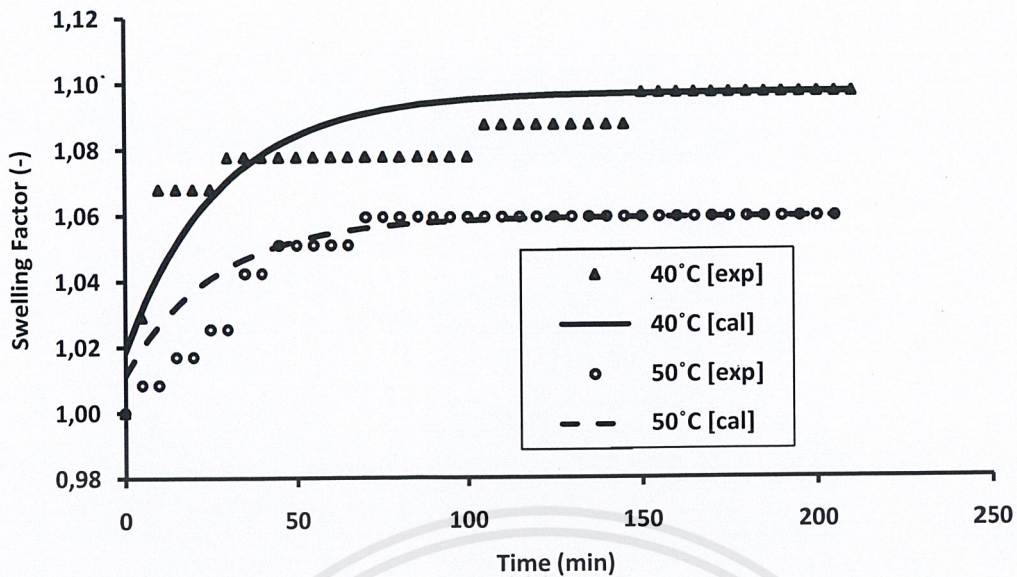
80 นาที

150 นาที

**รูปที่ 4.1** ตัวอย่างการบวมตัวของยาง EPDM ที่อุณหภูมิ 40 °C ความดัน 120 bar

#### 4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการบวมตัวของยาง EPDM

จากรูปที่ 4.1 พบว่าการบวมตัวของตัวอย่างยาง EPDM จะเกิดขึ้นเร็วในช่วง 10 นาทีแรก โดยเป็นผลมาจากการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเข้าไปในยาง EPDM หลังจากนั้น การบวมตัวของยาง EPDM จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนถึงภาวะสมดุลที่ไม่มีการบวมตัวเกิดขึ้นอีกที่เวลาประมาณ 100 -150 นาที การบวมตัวเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณของของผสม ในเชิงอุณหพลศาสตร์ที่มีผลมาจากการผสมเข้ากันได้ดีระหว่างยาง EPDM กับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยการบวมตัวของยาง EPDM นี้สามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling Factor กับ เวลา ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

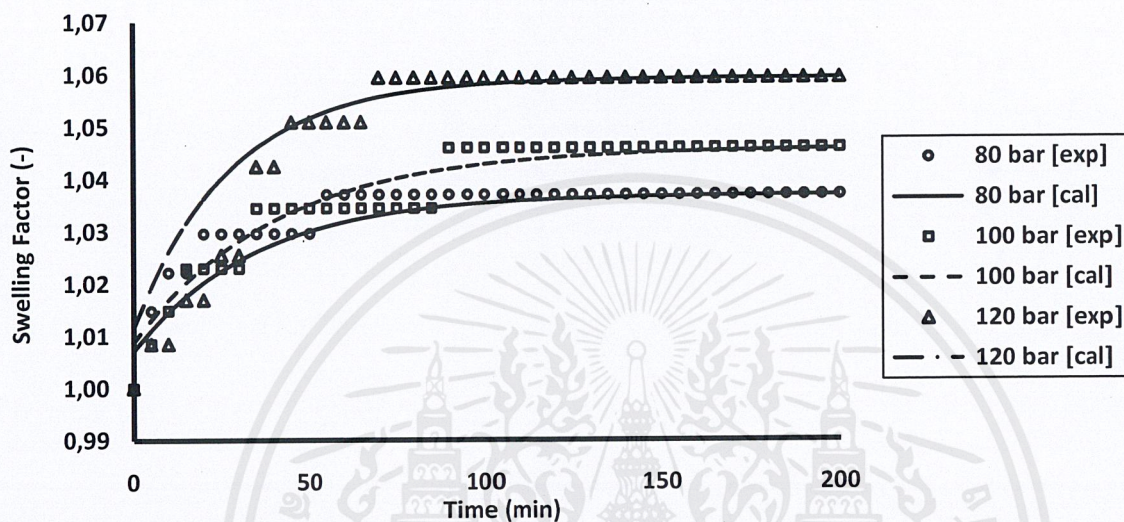


รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยาง EPDM กับ Time (min) ที่ความดันคงที่ที่ 120 bar

จากรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อการบวมตัวของยาง EPDM พบว่าค่า Swelling Factor แปรผกผันกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการบวมตัวของยาง EPDM จะลดลงเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM ลดลง ทำให้ปริมาตรรวมของสารทั้งสองชนิดลดลง และพบว่าที่อุณหภูมิสูงระบบจะเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้พลังงานจลน์ของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตสามารถแพร่เข้าไปในยาง EPDM เร็วขึ้นดังสมการอาร์เรเนียส ดังรูปที่ 4.2

#### 4.1.2 อิทธิพลของความดันต่อการบวมตัวของยาง EPDM

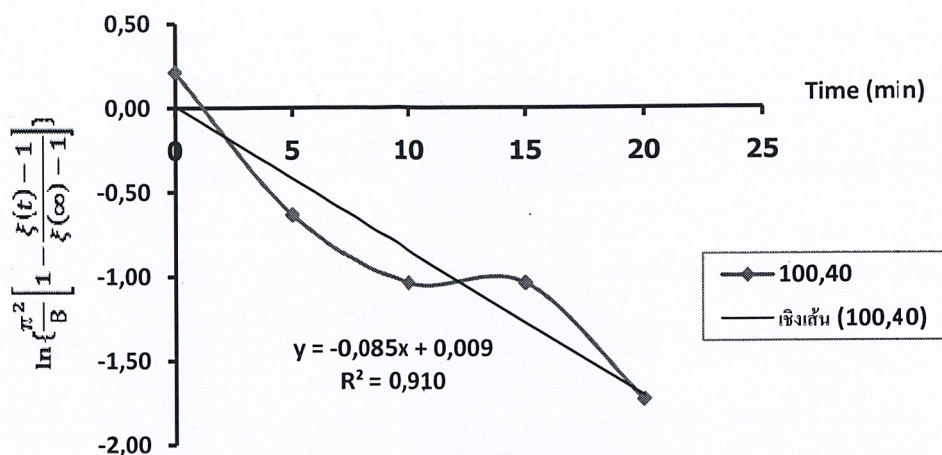
เมื่อพิจารณาผลของความดันต่อการบวมตัวของยาง EPDM พบว่าค่า Swelling Factor แปรผันตรงกับความดัน โดยเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความสามารถในการบวมตัวของยาง EPDM จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยาง EPDM กับ Time (min) ที่อุณหภูมิคงที่ 40 °C

#### 4.1.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM

จากรูปที่ 4.4 เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยนำค่า Swelling Factor ที่ได้มาเขียนกราฟโดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (2-14) เมื่อหาค่าความชันของกราฟจะทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM ที่อุณหภูมิ 40 °C ความดัน 100 bar ได้ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะคำนวณจากช่วงเวลาที่เริ่มต้นในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในช่วงเวลาเริ่มต้นประมาณ 10 - 20 นาที เป็นช่วงที่เกิดการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM ตัวอย่างการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ข ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM แสดงผลดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \left\{ \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1} \right] \right\}$  กับ Time (min) ของยาง EPDM ที่อุณหภูมิ 40 °C ความดัน 100 bar

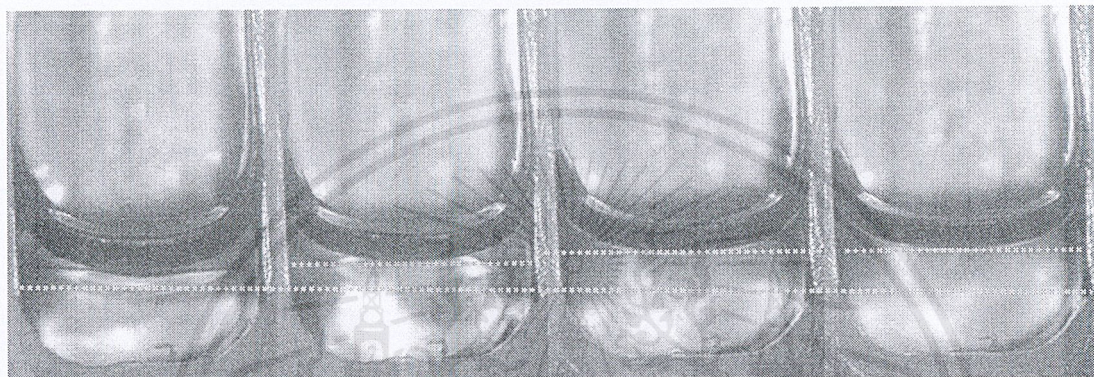
จากผลการทดลองพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิระหว่าง 40 -50 °C และความดัน 80 -120 bar ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EPDM มีค่าอยู่ในช่วง  $4.00 \times 10^{-8}$  -  $1.03 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s จากการทดลองสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤต มีค่าเพิ่มขึ้นตามแนวโน้มของสมการอาร์เรเนียสดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยาง EDPM

| ความดัน (bar) | สัมประสิทธิ์การแพร่ scCO <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> /s) ในยาง EPDM |                       |
|---------------|--|-----------------------|
|               | 40 °C  | 50 °C                 |
| 80            | $4.00 \times 10^{-8}$  | $1.72 \times 10^{-7}$ |
| 100           | $3.48 \times 10^{-7}$  | $6.43 \times 10^{-8}$ |
| 120           | $9.64 \times 10^{-8}$  | $1.03 \times 10^{-7}$ |

## 4.2 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

ในกรณีนี้จะเป็นการศึกษาการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต โดยใช้วิธีการทดลองเช่นเดียวกันกับการสังเกตการบวมตัวของยาง EPDM คือใช้เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงที่สามารถสังเกตการบวมตัวผ่านกระจกใส จากนั้นจะทำการบันทึกภาพการบวมตัวของยางเหลว PB ที่เวลาต่างๆด้วยกล้องวิดีโอ จากการทดลองสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางเหลว PB กับเวลาได้ดังรูปที่ 4.5



เวลาเริ่มต้น                      5 นาที                      10 นาที                      30 นาที

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการบวมตัวของยางเหลว PB ที่อุณหภูมิ 40 °C ความดัน 120 bar

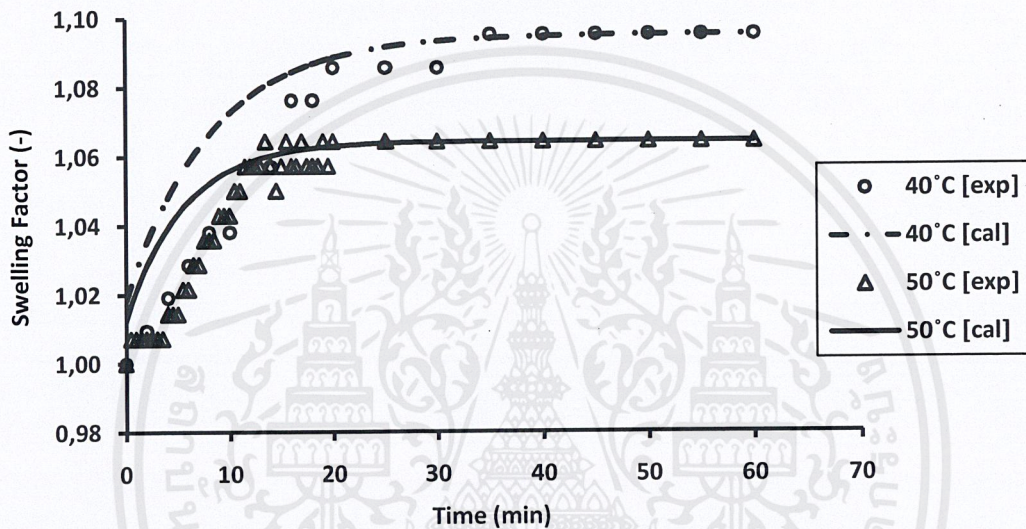
### 4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการบวมตัวของยางเหลว PB

ผลการทดลองที่ได้จะแสดงในรูปของค่า Swelling factor ที่หาได้จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างยางเหลว PB ที่เพิ่มขึ้นจนถึงสมดุลกับความสูงของตัวอย่างเริ่มต้นดังเช่นในการศึกษากรณีของยาง EPDM โดยทำการตั้งสมมติฐานว่าตัวอย่างยางเหลว PB ที่เกิดการบวมตัวนั้นมีการบวมตัวในทิศทางเดียว โดยใช้เวลาประมาณ 120 -150 นาที

จากการสังเกตพบว่าการบวมตัวของตัวอย่างยางเหลว PB จะเกิดขึ้นเร็วในช่วง 10 - 20 นาทีแรกดังรูปที่ 4.6 เป็นผลมาจากการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเข้าไปในยางเหลว PB หลังจากนั้นการบวมตัวของยางเหลว PB จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนถึงภาวะสมดุลที่ไม่มีการบวมตัวเกิดขึ้นอีก ซึ่งการบวมตัวเพียงเล็กน้อยนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรของของผสมในเชิงอุณหพลศาสตร์ที่มีผลมาจากการผสมเข้ากันได้ดี ระหว่างยางเหลว PB กับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เมื่อทำการทดลองจนเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้วนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling Factor กับ เวลา ดังรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 ผลการทดลองที่ได้จะแสดงในรูปของค่า Swelling factor ที่หาได้จากการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างยางเหลว PB ที่เพิ่มขึ้นจนถึงสมดุลกับความสูงของตัวอย่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มต้น ดังเช่นในการศึกษาในกรณีของยาง EPDM โดยตั้งสมมติฐานว่าตัวอย่างยางเหลว PB ที่เกิดการบวมตัวนั้นมีการบวมตัวในทิศทางเดียว การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการบวมตัวของยางเหลว PB พบว่า ค่า Swelling Factor แปรผกผันกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสามารถในการบวมตัวของยางเหลว PB จะลดลงเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ลดลง ทำให้ปริมาตรรวมของสารทั้งสองชนิดมีค่าลดลง การบวมตัวของยางเหลว PB มีค่าลดลง ดังเช่นในยาง EPDM



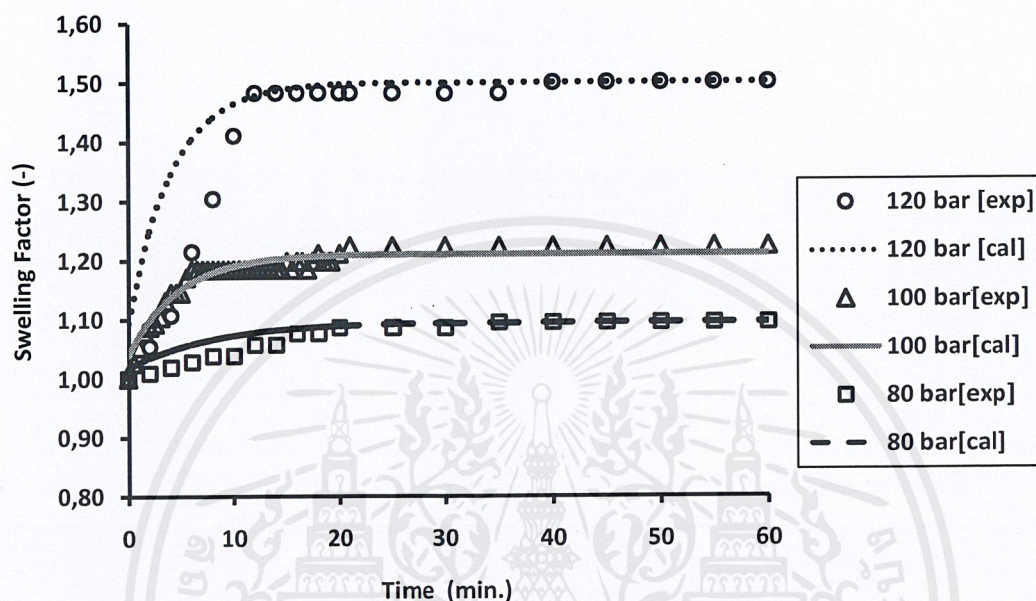
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB กับ Time (min) ที่ความดันคงที่ 120 bar

#### 4.2.2 อิทธิพลของความดันต่อการบวมตัวของยางเหลว PB

จากรูปที่ 4.7 การสังเกตพบว่าการบวมตัวของตัวอย่างยางเหลว PB จะเกิดขึ้นเร็วในช่วง 10-20 นาทีแรก เป็นผลมาจากการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเข้าไปในยางเหลว PB หลังจากนั้นการบวมตัวของยางเหลว PB จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนถึงภาวะสมดุลที่ไม่มีการบวมตัวเกิดขึ้นอีก ซึ่งการบวมตัวเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรของของผสมในเชิงอุณหพลศาสตร์ที่มีผลมาจากการผสมเข้ากันได้ดีระหว่างยางเหลว PB กับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต เมื่อทำการทดลองจนเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้วนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling Factor กับ เวลา ดังรูปที่ 4.7

เมื่อพิจารณาผลของความดันต่อการบวมตัวของยางเหลว PB พบว่า ค่า Swelling Factor แปรผกผันกับความดัน โดยเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความสามารถในการบวมตัวของยางเหลว PB

จะเพิ่มเนื่องจากเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้นสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับของเหลวมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาตรรวมของสารทั้งสองชนิดมีเพิ่มขึ้นเกิดการบวมตัวได้ดีขึ้นดังเช่นในยาง EPDM ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับกฎของเฮนรี



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB กับ Time (min.) ที่อุณหภูมิคงที่ 40 °C

#### 4.2.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่หาได้ดังรูปที่ 4.4 เมื่อหาค่าความชันของกราฟ จะทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB ได้โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (2-14) แสดงผลดังตารางที่ 4.2

จากผลการทดลองพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิระหว่าง 40 - 50 °C และความดัน 80 - 120 bar พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB มีค่าอยู่ในช่วง  $3.30 \times 10^{-9}$  -  $7.18 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB มีค่ามากขึ้นเนื่องจากระบบมีพลังงานเพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นจึงเกิดการแพร่ได้เร็วขึ้น และผลของความดันที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่พบว่าเมื่อความดันสูงขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตลดลงเป็นผลจากเมื่อความดันสูงขึ้นทำให้โมเลกุลในระบบเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลมากขึ้น จึงทำให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์

เหนือวิกฤตแพร่เข้าไปในยางเหลว PB ซ้ำลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB จึงมีค่าลดลงดังตารางที่ 4.2

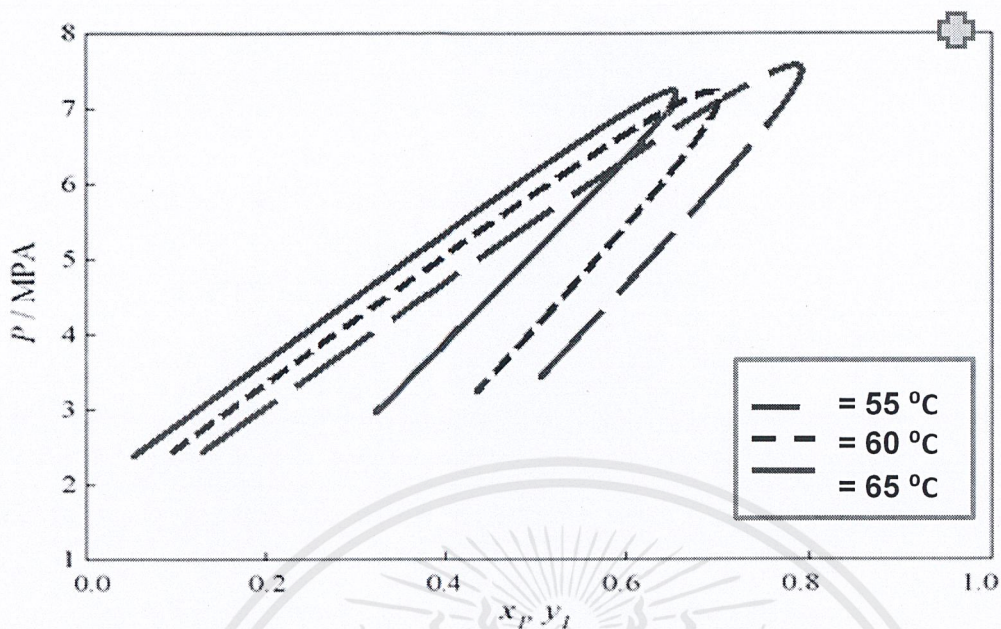
ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตในยางเหลว PB

| ความดัน (bar) | สัมประสิทธิ์การแพร่ $\text{scCO}_2$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ในยางเหลว PB |                       |
|---------------|--|-----------------------|
|               | 40 °C  | 50 °C                 |
| 80            | $6.51 \times 10^{-9}$  | $7.18 \times 10^{-9}$ |
| 100           | $5.72 \times 10^{-9}$  | $6.16 \times 10^{-9}$ |
| 120           | $3.30 \times 10^{-9}$  | $4.91 \times 10^{-9}$ |

### 4.3 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤต

#### 4.3.1 อิทธิพลของตัวทำละลายร่วมต่อการบวมตัวของยางเหลว PB

ในการทดลองนี้ใช้ตัวทำละลายร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a เนื่องจาก R-134a เป็นสารเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และเป็นตัวทำละลายที่ดีกับยางเหลว PB ทำให้ความหนืดของยางเหลว PB มีค่าลดลง ซึ่งการทดลองนี้สามารถอธิบายอิทธิพลของตัวทำละลายร่วมที่สถานะเหนือวิกฤต ดังรูปที่ 4.8 โดยใช้สัดส่วนของ R-134a ต่อคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็นเศษส่วนโมลประมาณ 0.01 : 0.99 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C และความดันในช่วง 80 – 100 bar จากรูปที่ 4.8 แนวโน้มของกราฟจะเป็นดังนี้คือ อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามแกนนอนที่แสดงสัดส่วนของตัวทำละลายร่วม จนถึงที่สถานะที่มีเพียงคาร์บอนไดออกไซด์เพียงองค์ประกอบเดียว และที่จุดยอดของกราฟจะแสดงถึงสถานะวิกฤตของตัวทำละลายผสม ซึ่งสถานะที่ทำการทดลองจะแสดงผลที่อยู่เลื่อนไปทางขวาจากจุดยอด เพราะเป็นการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C และอยู่ในตำแหน่งเกือบสุดขอบกราฟ เพราะเศษส่วน โมลมีค่าประมาณ 0.99 ดังนั้นสถานะที่กำหนดในการทดลอง จึงมีผลต่อการทำให้ตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R134a มีสถานะเป็นของไหลเหนือวิกฤต



รูปที่ 4.8 เฟสไดอะแกรมของสารผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a



สถานะที่ใช้ในการทดลอง อุณหภูมิ 60 °C เศษส่วน โมล 0.99

การสังเกตอิทธิพลของตัวทำละลายร่วมต่อการบวมตัวของยางเหลว PB ศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูงที่สามารถสังเกต การบวมตัวผ่านกระจกใส การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB นั้นจะทำการบันทึกภาพการบวมตัวของยางที่เวลาต่างๆด้วยกล้องวิดีโอ จากการทดลองสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางเหลว PB กับเวลา ซึ่งการสังเกตการบวมตัวของยาง PB เหลวแบ่งเป็น 4 ช่วงดังนี้

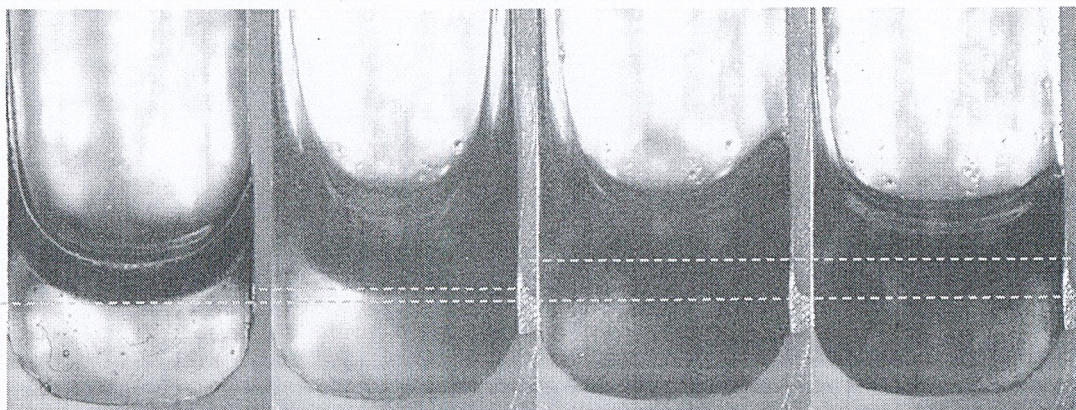
ช่วงที่ 1 ที่เวลาเริ่มต้น เริ่มใส่ R-134a เข้าไปในยางเหลว PB ดังรูปที่ 4.9 (a)

ช่วงที่ 2 ที่เวลา 30 นาทีจากการสังเกตพบว่า R-134a จะละลายเข้าไปในยางเหลว PB บางส่วนทำให้สังเกตเห็นการบวมตัวของยางเหลว PB และบางส่วนที่ไม่สามารถละลายเข้าไปในยางเหลว PB จะเกิดการแยกชั้นดังรูปที่ 4.9 (b)

ช่วงที่ 3 ที่เวลา 80 นาทีหลังจากใส่คาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปพบว่าเกิดการบวมตัวของยางเหลว PB เพิ่มมากขึ้น ที่สถานะนี้คาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a จะเข้าสู่สถานะเหนือวิกฤตและละลายเข้าไปในยางเหลว PB ทำให้เกิดการบวมตัวของยางเหลวเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 4.9 (c)

ช่วงที่ 4 เป็นสถานะที่ระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว จะไม่เกิดการบวมตัวของยางเหลว PB เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.9 (c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) เวลาเริ่มต้น

(b) 30 นาที

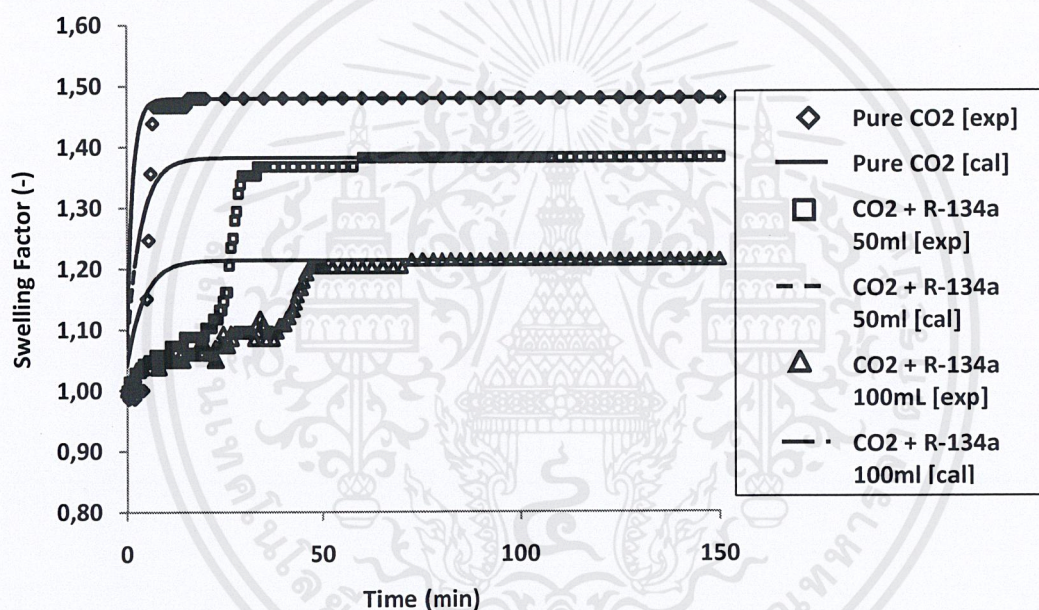
(c) 45 นาที

(d) 60 นาที

**รูปที่ 4.9** ตัวอย่างการบวมตัวของยางเหลว PB ที่อุณหภูมิ 60 °C ความดันคงที่ 90 bar  
ด้วยปริมาณ R-134a 100 mL

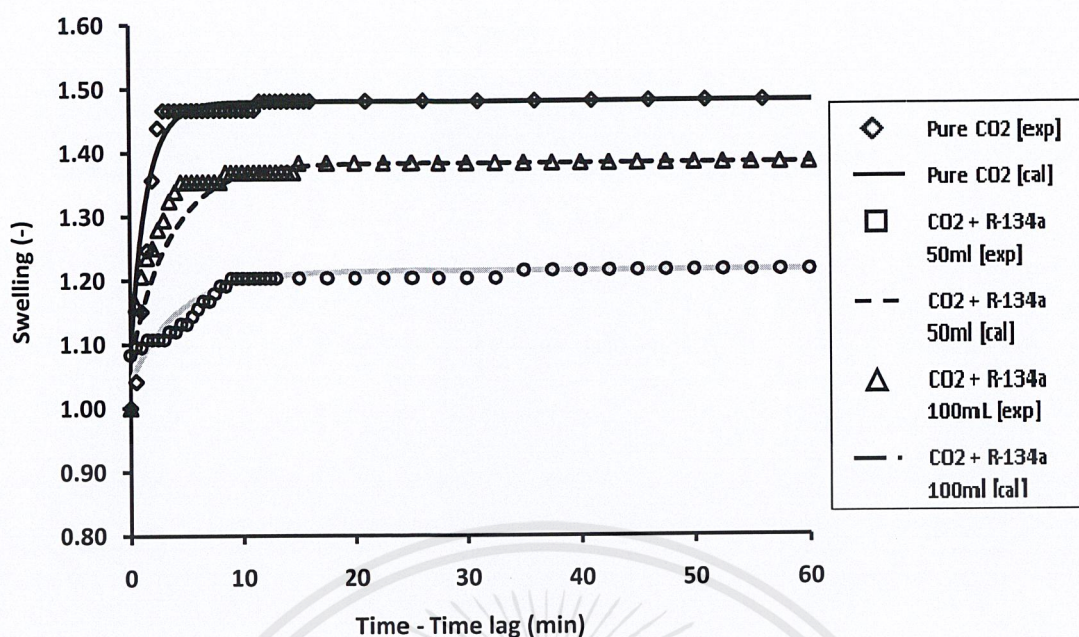
การบวมตัวของตัวอย่างยางเหลว PB สามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling Factor กับ เวลาดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นผลมาจากการแพร่ของตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤตเข้าไปในยางเหลว PB โดยเริ่มใส่ R-134a เข้าไปในยางเหลว PB ปล่อยให้ R-134a ละลายเข้าไปในยางเหลว PB หลังจากนั้นจะใส่คาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในระบบจนได้สถานะที่กำหนดไว้ สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของยางเหลว PB จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนถึงภาวะสมดุลที่ไม่มีการบวมตัวเกิดขึ้นอีกจากรูปที่ 4.10 พบว่าเกิดช่วงเวลาในการดำเนินการกระบวนการที่ทำให้ตัวทำละลายร่วม R-134a กับคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่สถานะเหนือวิกฤต (Time lag) ซึ่งการวัดการบวมตัวของยางเหลว PB จะเริ่มวัดจากช่วงเวลาในตัวทำละลายร่วมอยู่ในสถานะเหนือวิกฤต ดังนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Swelling Factor กับ เวลาดังรูปที่ 4.10 จะตัดค่าช่วงเวลาดังกล่าวออก และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.11

เมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนตัวทำละลายร่วมต่อการบวมตัวของยางเหลว PB ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า ค่า Swelling Factor แปรผกผันกับสัดส่วนของ R-134a ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือวิกฤต ความสามารถในการบวมตัวของยางเหลว PB จะลดลงเมื่อปริมาณสัดส่วนของ R-134a ต่อคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือวิกฤตเพิ่มสูงขึ้น การบวมตัวที่ลดลงนี้เป็นผลมาจาก R-134a ที่ละลายเข้าไปในยางเหลว PB ในช่วงแรก ทำให้ตัวทำละลายร่วมที่ใส่เข้าไปละลายได้น้อย เนื่องจากจุดอิ่มตัวสำหรับการละลายภายในยางเหลว PB ลดลงทำให้ความสามารถในการละลายของตัวทำละลายร่วมระหว่าง R-134a กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือวิกฤตในยางเหลว PB มีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของ R-134a ต่อคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเพิ่มขึ้นจะทำให้การบวมตัวของยางเหลว PB น้อยลงเพราะปริมาณของ R-134a มีสัดส่วนมากขึ้น ดังรูปที่ 4.11



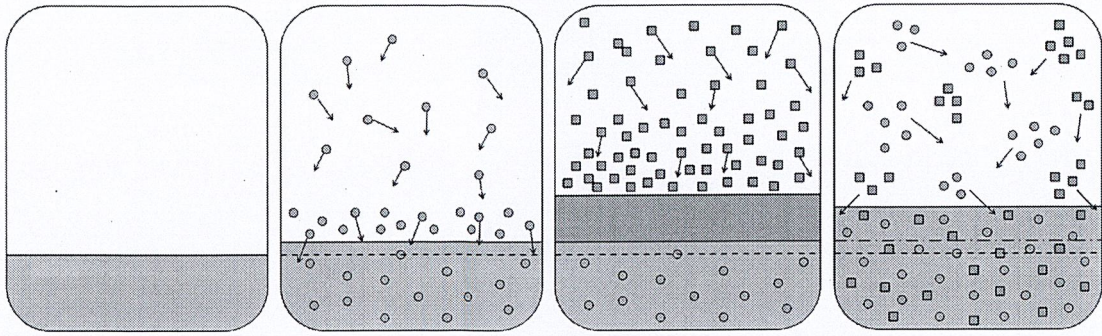
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB กับ Time (min)

อุณหภูมิ 60 °C ความดันคงที่ 90 bar






รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Swelling Factor ของยางเหลว PB กับ Time - Time lag (min) อุณหภูมิ 60 °C ความดันคงที่ 90 bar

จากรูปที่ 4.12 ภาพแรกจะเป็นภาพที่เวลาเริ่มต้น คือ ระบบมีแต่ยางเหลว PB ในภาพถัดมา เมื่อมีการเติม R-134a เข้าไปในระบบ จะเกิดการแพร่เข้าไปในยางเหลว PB ทำให้เกิดการบวมตัวขึ้น แต่เป็นการบวมตัวเพียงเล็กน้อย จากนั้นในภาพถัดมา เมื่อทำการเติมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในระบบ ซึ่งมีสถานะที่ความดันและอุณหภูมิสูง จึงเป็นการเพิ่มความดันให้ระบบ ทำให้ R-134a อัดตัวกลายเป็นของเหลวอย่างรวดเร็ว และในภาพสุดท้ายเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลที่สภาวะวิกฤต จะมี R134a บางส่วนที่ยังแพร่เข้าไปในยางเหลวไม่หมดรวมตัวกับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารผสมและแพร่เข้าไปในยางเหลว PB อีกครั้งหนึ่ง ทำให้เกิดการบวมตัวเนื่องจากของผสมจนกว่าจะสิ้นสุดการบวมตัวลง



รูปที่ 4.12 แสดงกระบวนการบวมตัวของยางเหลว PB

-  ยางเหลว PB
-  คาร์บอน ไดออกไซด์
-  R-134a

#### 4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายร่วมในยางเหลว PB

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่หาได้ดังเช่นรูปที่ 4.4 เมื่อหาค่าความชันของกราฟ จะทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤตในยางเหลว PB ได้ โดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการที่ (2-14) ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 4.3

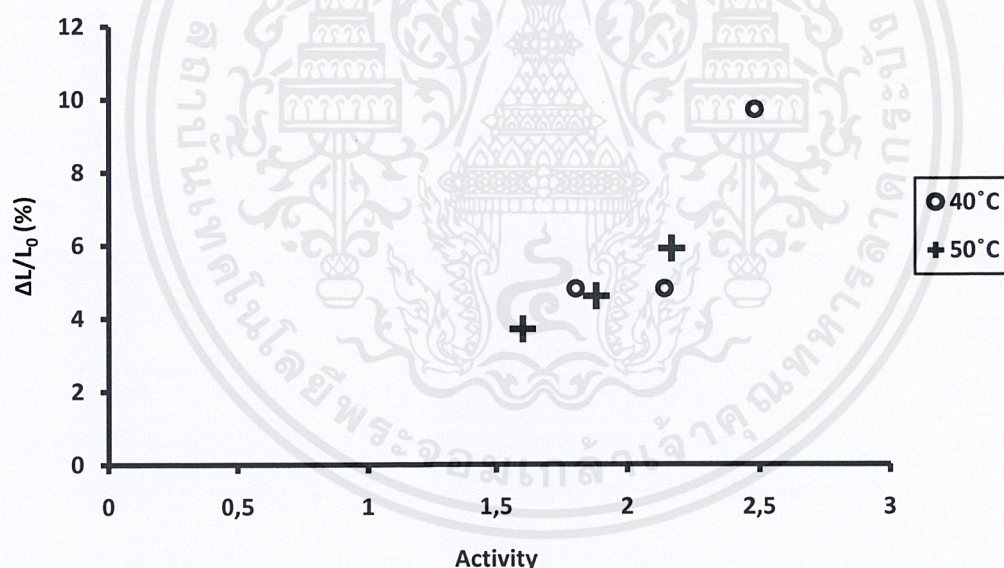
จากผลการทดลองพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ 60 °C และความดัน 80 - 100 bar พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ R-134a กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤตในยางเหลว PB มีค่าอยู่ในช่วง  $1.06 \times 10^{-9}$  -  $8.73 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s จากผลการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารผสมระหว่าง R-134a กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤตมีค่าลดลง เมื่อมีสัดส่วนของ R-134a มากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ลดลงนี้เป็นผลเนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่าง R-134a กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งหมายถึงการเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบระหว่าง R-134a กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤตทำให้โมเลกุลโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นผลทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ช้าลงเกิดการแพร่เข้าไปในยางสังเคราะห์ได้ช้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จึงมีค่าลดลง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของสัดส่วนตัวทำละลายร่วมต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายร่วม คาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤตในยางเหลว PB อุณหภูมิ 60°C

| ความดัน (bar) | สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์ กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤต ( $m^2/s$ ) ในยางเหลว PB |                                |                                 |
|---------------|---|--------------------------------|---------------------------------|
|               | Pure CO <sub>2</sub>  | CO <sub>2</sub> + R-134a 50 ml | CO <sub>2</sub> + R-134a 100 ml |
| 80            | $2.67 \times 10^{-8}$   | $8.73 \times 10^{-9}$          | $6.33 \times 10^{-9}$           |
| 90            | $1.43 \times 10^{-8}$   | $6.01 \times 10^{-9}$          | $4.00 \times 10^{-9}$           |
| 100           | $1.14 \times 10^{-8}$   | $3.77 \times 10^{-9}$          | $1.06 \times 10^{-9}$           |

#### 4.4 การวิเคราะห์ผลค่า Activity

4.4.1 ค่า Activity ในการศึกษาการบวมตัวของยาง EPDM โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta L/L_0$  (%) กับ Activity of CO<sub>2</sub> [f<sup>n</sup>(P,T)] ของยาง EPDM

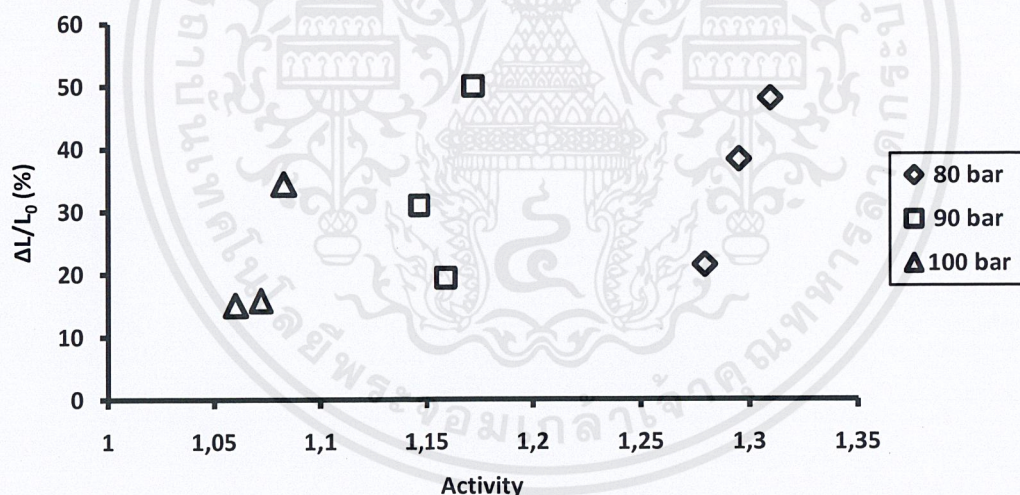
จากกราฟสามารถพิจารณาผลของความสูงของยาง EPDM ที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta L/L_0$ ) กับค่า Activity ของยาง EPDM เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ได้พร้อมกันทั้งสองปัจจัย คือ ความดันและอุณหภูมิ โดยจากปัจจัยของความดันจะพบว่าที่แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า Activity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลมาจากค่าความดันสูงขึ้น และที่ความดันที่เพิ่มขึ้นนี้ก็จะให้ผลการเพิ่มขึ้นของปริมาตร เช่นเดียวกับการคำนวณ Swelling Factor จึงเป็นการแสดงว่าค่า Activity เป็นค่าที่แปรผันตรงกับ ความสูงที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta L/L_0$ ) สำหรับปัจจัยของอุณหภูมิจะพบว่าที่แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ ค่า Activity (เส้นตรงในกราฟ) นั้นเป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิที่ลดลง และเช่นเดียวกัน การที่อุณหภูมิลดลงนี้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาตรเช่นเดียวกับการคำนวณเรื่องการบวมตัว

#### 4.4.2 ค่า Activity ในการศึกษาการบวมตัวของยางเหลว PB โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และสารผสมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤต

ในส่วนของยางเหลว PB เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤตจะมีปัจจัยที่พิจารณาเพิ่มขึ้นจากความดันและอุณหภูมิมาอีกหนึ่งปัจจัยคือ สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤต โดยแสดงในรูปของเศษส่วนโมลของสารทั้งสองที่ใช้ในแต่ละการทดลอง ซึ่งในกรณีนี้พิจารณาแต่คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือวิกฤต เศษส่วนโมลของ R-134a จะมีค่าเท่ากับศูนย์ และเศษส่วน โมลของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง ซึ่งกรณีนี้จะให้ผลของค่า Activity ในแนวทางเดียวกันกับยาง EPDM (ค่า Activity เป็นค่าที่แปรผันตรงกับความดันและแปรผกผันกับอุณหภูมิ)



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Activity กับ  $\Delta L/L_0$  ที่อุณหภูมิคงที่ 60 °C ของยางเหลว PB เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤต

จากกราฟเมื่อพิจารณาที่ปัจจัยของเศษส่วน โมลของคาร์บอนไดออกไซด์จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของเศษส่วน โมล จะมีผลให้ค่า Activity เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และมีผลทำให้ความสูงของยางเหลว PB ที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta L/L_0$ ) มีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน จึงเป็นการแสดงว่าค่า Activity เป็นค่าที่มีการแปรผันตรงกับเศษส่วน โมลของคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับปัจจัยของความดันพบว่าเมื่อ

ความดันเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ค่า Activity เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และมีผลให้ความสูงของยางเหลว PB ที่เพิ่มขึ้นมีค่าสูงขึ้นอีกเล็กน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษาการบวมตัวของพอลิเมอร์เนื่องจากการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวทำละลายร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a โดยมีตัวแปรที่ศึกษา 3 ตัวคือ ความดัน อุณหภูมิ และสัดส่วนของตัวทำละลายร่วม (เศษส่วน โมล) สามารถสรุปผลของโครงการนี้ได้ดังนี้

1. การใช้เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง (High Pressure Vessel) ที่มีการตัดแปลงให้มีช่องกระจกใส สามารถสังเกตเห็นการบวมตัวของยาง EPDM ได้ รวมถึงต้องสามารถเห็นขั้นตอนการบวมตัวของยางเหลว PB ได้เช่นกัน ดังนั้นการทดลองในแต่ละครั้ง จะมีสถานะที่ใช้ในการทดลองเป็นสถานะที่ความดันและอุณหภูมิสูง จึงต้องมีการใช้อุปกรณ์ที่ทนต่อสภาวะดังกล่าวได้ และผู้ทำการทดลองต้องมีการเตรียมตัวที่ดีเป็นอย่างมาก

2. พอลิเมอร์ (ยาง EPDM และยางเหลว PB) มีแนวโน้มที่จะบวมตัวมากขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน อันเป็นผลเนื่องมาจากเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น ก็ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของสารเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรรวมของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเกิดการบวมตัวได้ดีขึ้นนั่นเอง และในทางตรงกันข้ามกลับมีแนวโน้มที่จะบวมตัวลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง ทำให้ความสามารถในการละลายของสารลดลง (แต่ความสามารถในการแพร่เพิ่มขึ้น) สรุป คือ การบวมตัวแปรผันตรงกับความดัน และแปรผกผันกับอุณหภูมิ

3. ในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายร่วมโดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาตรของ R-134a มีผลต่อการบวมตัวของยางเหลว PB ดังนี้คือ ปริมาตรของ R-134a ที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลให้การบวมตัวของยางเหลว PB ลดลง เนื่องจากเมื่อสัดส่วนของ R-134a ต่อคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายของตัวทำละลายร่วมคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สถานะเหนือวิกฤตในยางเหลว PB ลดลง การบวมตัวของยางเหลว PB จึงมีค่าลดลง

4. การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการที่พัฒนาขึ้น โดย M.Ohshima และคณะ มีค่าดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในยาง EPDM มีค่าอยู่ในช่วง  $4.00 \times 10^{-8} - 1.03 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

- ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ในยางเหลว PB มีค่าอยู่ในช่วง  $3.30 \times 10^{-10} - 1.75 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

5. การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวทำละลายร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ในยางเหลว PB จากสมการที่พัฒนาขึ้นโดย M.Ohshima และคณะ มีค่าอยู่ในช่วง  $1.06 \times 10^{-9} - 7.47 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

6. เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใส่คาร์บอนไดออกไซด์กับตัวทำละลายร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a จะเห็นได้ว่ากรณีของการใส่ตัวทำละลายร่วมมีผลทำให้การบวมตัวของยางเหลว PB ลดลง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียมชุดทดลองผู้ทำการทดลองต้องมีทักษะในการปฏิบัติอย่างสูง เพราะเป็นการทดลองที่ความดันและอุณหภูมิสูง หากเตรียมอุปกรณ์ไม่ดีอาจเกิดอันตรายจากการทดลองหรือการทดลองล้มเหลวได้

2. ก่อนทำการทดลองควรเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ให้พร้อม เนื่องจากต้องทำการบันทึกเวลาจริง หากใช้เวลาในการเตรียมมากเกินไป จะทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้

3. การชั่งน้ำหนักสารควรทำการชั่งหลายๆ ครั้ง เพื่อนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยหาค่าที่แท้จริง จึงทำให้สามารถหาค่าสัดส่วนโมลที่ถูกต้องของสารแต่ละชนิดได้

4. การทดลองทุกครั้งต้องทำการเติมสารเข้าไปในระบบก่อนที่จะทำการชั่งสาร เพื่อให้ทราบค่าน้ำหนักที่แท้จริงของสารที่ใช้ในการทดลอง โดยปราศจากส่วนน้ำหนักของสารที่ค้างในท่อ

5. ควรมีการเปลี่ยนหรือเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสมต่อการทนแรงดันสูง เช่น มีการเลือกใช้กระจกที่สามารถทนต่อแรงดันสูงได้แทนกระจกธรรมดาทั่วไป

6. ไม่ควรเลือกพอลิเมอร์ที่จะทำการทดลองที่เป็นของแข็ง เพราะจะมีการเตรียมที่ยากและเห็นผลการทดลองได้ไม่ดีเท่ากับของเหลว

7. ในการเติมสารเข้าไปในอุปกรณ์ ต้องใช้ปริมาณให้เหมาะสม เพราะหากใส่สารในปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้ไม่เห็นภาพจากการทดลองได้

8. ภาพที่ได้จากการทดลองอาจมีการขยับไปจากตำแหน่งเริ่มต้น ดังนั้นผู้ทดลองควรดูแลกล้องให้นิ่งอยู่เสมอในขณะที่ทำการทดลองอยู่ เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจน

9. เมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้ว ต้องค่อยๆ ไล่สารออกจากระบบด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากเป็นระบบที่มีความดันและอุณหภูมิสูง จึงอาจเป็นอันตรายต่อผู้ทดลองได้

10. ผู้ทำการทดลองต้องใช้เวลากับการทำการทดลองมากพอสมควร เพราะการทดลองหนึ่งครั้งจะใช้เวลาประมาณครึ่งวัน ดังนั้นควรวางแผนการทำการทดลองให้เหมาะสม

11. ภาพที่บันทึกได้จากการทดลอง ควรตั้งเวลาในการบันทึกให้เหมาะสมเพราะ ถ้าเร็วเกินไปจะทำให้มีข้อมูลมากเกินไป และถ้าช้าเกินไปก็จะให้ผลที่คลาดเคลื่อน



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Masaaki Kojima, Masatoshi Tosaka, Eita Funami, Kouei Nitta, Masahiro Ohshima, and Shinzo Kohjiya, "Phase Behavior of crosslinked polyisoprene rubber and supercritical carbondioxide," **J. of Supercritical Fluids** 35,pp. 175–181, 2005.
- [2] จีราวรรณ หาญวัฒนกุล, โฟมพลาสติกชนิดพอลิยูรีเทนและพอลิสไตรีน (Polyurethane and polystyrene Plastic Foams), 2550 .  
[Online]. Available: [http : //www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/bla\\_4\\_2550\\_foams.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/starticles/files/bla_4_2550_foams.pdf). 2010.
- [3] Zhi-Mei Xu, Xiu-Lei Jiang , Tao Liu , Guo-Hua Hub, Ling Zhao, Zhong-Nan Zhua, and Wei-Kang Yuan, "Foaming of polypropylene with supercritical carbon dioxide," **J. of Supercritical Fluids** 41, pp.299-300, 2007.
- [4] Duanghathai Pentrakoon, and John W.Ellis, **An introduction to plastic foam** ,Chulalongkorn University Press, 2005.
- [5] สุภัทรชัย แสงวงษ์, สมบัติเชิงกลพลวัตและสัณฐานวิทยาของโฟมคอมโพสิตโพลีโพรไพลีนและผงไม้ยางพารา (Dynamic Mechanical and Morphology of Foam Para Saw Dust – Polypropylene Composites), 2550.  
[Online]. Available: [http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snmcn/Supatchai\\_Sangwong/Fulltext.pdf](http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snmcn/Supatchai_Sangwong/Fulltext.pdf). 2010.
- [6] Neoplast, ยาง EPDM, 2553 [Online]. Available: <http://www.neoplast.biz/index.php>. 2010.  
ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM), 2553.  
[Online]. Available : <http://www.oknation.net/blog/obbie-tt/2010/08/22/entry-1>. 2010
- [7] Staff, **Phase change data for Carbon dioxide**, National Institute of Standards and Technology, 2008.  
[Online]. Available: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=1501>. 2010
- [8] SURAT AREERAT, EITA FUNAMI, YUSUKE HAYATA, DAI NAKAGAWA, and MASAHIRO OHSHIMA, "Measurement and Prediction of Diffusion Coefficients of Supercritical CO<sub>2</sub> in Molten Polymers," **Polym. Eng. Sci**, pp.1915-1924, 2004.
- [9] Donald G. baird, and Dimitris I. Collias, **Polymer Processing** ,John Wiley & Sons Press, 1998.

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [10] Ming Wanga, Yoshiyuki Sato, Toru Iketani, Shigeki Takishima, HirokatsuMasuokaa,Taku Watanabe, and Yoshihito Fukasawab, “Solubility of HFC134a,HCFC-142b,butane,and isobutene in low density polyethylene at temperature from 383.15 to 473.15 K and at pressures up to 3.4 MPa,” **Fluid Phase Equilibria** 232, pp. 1–8, 2005.
- [11] Jong Sung Lim, Jung Min Jin, and Ki-Pung Yoo, “VLE measurement for binary systems of CO<sub>2</sub>+1,1,1,2-tetrafluoroethane (HFC-134a) at high pressures,” **J. of Supercritical Fluids** 44, pp. 279–283, 2008.
- [12] AndrewK. Hebb, Kazunobu Senoo, and Andrew I. Cooper, “Synthesis of porous cross-linked polymer monoliths using 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a) as the porogen,” **Composites Science and Technology** 63, pp. 2379–2387, 2003.
- [13] Jae-Jin Shim, and Keith P.Johnston, “Adjustable Solute Distribution between Polymer and Supercritical Fluids,” **AICHE Journal**, pp.1097-1106, 1989.



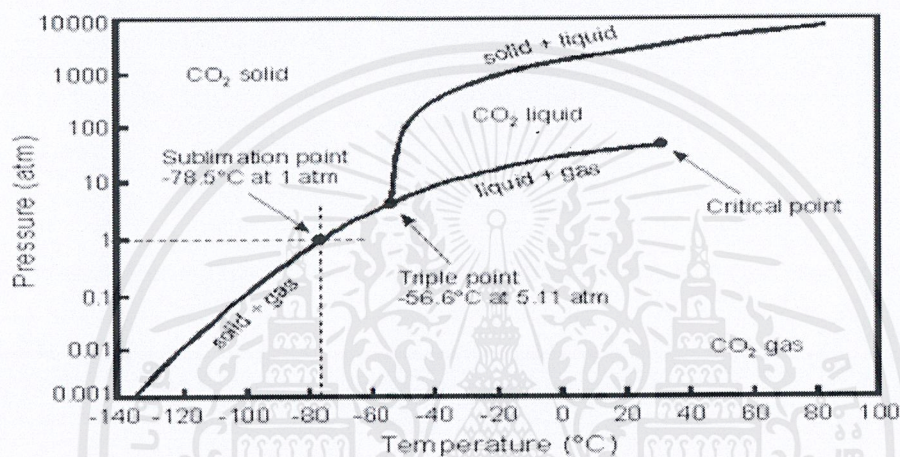
## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## การกำหนดสถานะในการทดลอง

1. การกำหนดสถานะในการทดลองการสังเกตการณ์บวมตัวของยาง EPDM และยางเหลว PB เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต



รูปที่ ก-1 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ ก-1 พบว่าจุดวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ จุดที่คาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสภาพของไหลมีสถานะร่วมกันระหว่างของเหลวและแก๊ส (อยู่ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 31.1 °C และความดัน 73.9 bar) ซึ่งจะมีคุณสมบัติคือมีความหนาแน่นเหมือนของเหลว และมีการกระจายตัวได้เหมือนแก๊ส ดังนั้นจึงเลือกทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิมากกว่า 31.1 °C และความดันมากกว่า 73.9 bar

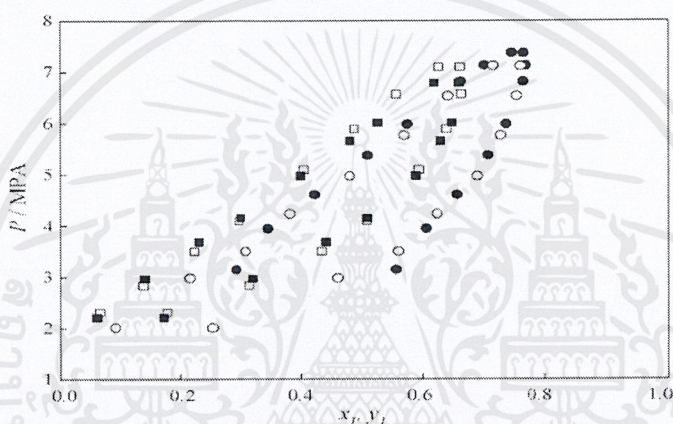
ตาราง ก-1 การกำหนดสถานะในการทดลองการสังเกตการณ์บวมตัวของยาง EPDM

| Pressure (bar) | Temperature (°C) |    |
|----------------|------------------|----|
| 80             | 40               | 50 |
| 100            | 40               | 50 |
| 120            | 40               | 50 |

ตาราง ก-2 การกำหนดสภาวะในการทดลองการสังเกตการณ์บวมตัวของยาง PB

| Pressure (bar) | Temperature (°C) |    |    |
|----------------|------------------|----|----|
| 80             | 40               | 50 | 60 |
| 100            | 40               | 50 | 60 |
| 120            | 40               | 50 | 60 |

## 2. การสังเกตการณ์บวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากตัวทำละลายร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤต



รูปที่ ก-2 เฟสไดอะแกรมของสารผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a  
 ○ และ □ คือ ค่าที่ได้จากการวัดที่อุณหภูมิ 328.15 K และ 338.15 K ส่วนสัญลักษณ์  
 ● และ ■ คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ Wong-Sandler mixing rule ที่อุณหภูมิ  
 329.6 K และ 339.1 K

จากรูปที่ ก-2 พบว่าที่สภาวะความดันมากกว่า 73.9 bar และอุณหภูมิมากกว่า 252.95 K สารผสมจะมีสมบัติเป็นของไหลเหนือวิกฤต ดังนั้นจึงได้กำหนดสภาวะการทดลองดังตารางที่ ก-3

ตารางที่ ก-3 การสังเกตการบวมตัวของยางเหลว PB เนื่องจากตัวทำละลายร่วมระหว่าง คาร์บอนไดออกไซด์กับ R-134a ที่สภาวะเหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิคงที่ 60 °C

| Pressure (bar) | Component            |                                |                                 |
|----------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 80             | Pure CO <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> + R-134a 50 ml | CO <sub>2</sub> + R-134a 100 ml |
| 90             | Pure CO <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> + R-134a 50 ml | CO <sub>2</sub> + R-134a 100 ml |
| 100            | Pure CO <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> + R-134a 50 ml | CO <sub>2</sub> + R-134a 100 ml |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร์

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยาง EPDM ที่ความดัน 80 100 และ 120 bar และอุณหภูมิคงที่ 40 °C

| Time (min) | Swelling Factor (L/L <sub>0</sub> ) [-] |         |         |
|------------|---|---------|---------|
|            | 80 bar                                  | 100 bar | 120 bar |
| 0          | 1.00000                                 | 1.00000 | 1.00000 |
| 5          | 1.02884                                 | 1.02758 | 1.02912 |
| 10         | 1.02884                                 | 1.03448 | 1.06796 |
| 15         | 1.02884                                 | 1.03448 | 1.06796 |
| 20         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.06796 |
| 25         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.06796 |
| 30         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.07766 |
| 35         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.07766 |
| 40         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.07766 |
| 45         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.07766 |
| 50         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.07766 |
| 55         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.07766 |
| 60         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.07766 |
| 65         | 1.02884                                 | 1.04137 | 1.07766 |
| 70         | 1.02884                                 | 1.04827 | 1.07766 |
| 75         | 1.02884                                 | 1.04827 | 1.07766 |
| 80         | 1.02884                                 | 1.04827 | 1.07766 |
| 85         | 1.02884                                 | 1.04827 | 1.07766 |
| 90         | 1.02884                                 | 1.04827 | 1.07766 |
| 95         | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.07766 |
| 100        | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.07766 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

| Time (min.) | Swelling Factor (L/L <sub>0</sub> ) [-] |         |         |
|-------------|---|---------|---------|
|             | 80 bar                                  | 100 bar | 120 bar |
| 110.        | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.08737 |
| 115         | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.08737 |
| 120         | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.08737 |
| 125         | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.08737 |
| 130         | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.08737 |
| 135         | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.08737 |
| 140         | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.08737 |
| 145         | 1.03846                                 | 1.04827 | 1.08737 |
| 150         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 155         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 160         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 165         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 170         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 175         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 180         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 185         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 190         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 195         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 200         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 205         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |
| 210         | 1.04807                                 | 1.04827 | 1.09708 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยาง EPDM ที่ความดัน 80 100 และ 120 bar และอุณหภูมิคงที่ที่ 50 °C

| Time (min) | Swelling Factor ( $L/L_0$ ) [-] |         |         |
|------------|---------------------------------|---------|---------|
|            | 80 bar                          | 100 bar | 120 bar |
| 0          | 1.00000                         | 1.00000 | 1.00000 |
| 5          | 1.014815                        | 1.02298 | 1.00847 |
| 10         | 1.022222                        | 1.02298 | 1.00847 |
| 15         | 1.022222                        | 1.02298 | 1.01694 |
| 20         | 1.02963                         | 1.02298 | 1.01694 |
| 25         | 1.02963                         | 1.02298 | 1.02542 |
| 30         | 1.02963                         | 1.02298 | 1.02542 |
| 35         | 1.02963                         | 1.03448 | 1.04237 |
| 40         | 1.02963                         | 1.03448 | 1.04237 |
| 45         | 1.02963                         | 1.03448 | 1.05084 |
| 50         | 1.02963                         | 1.03448 | 1.05084 |
| 55         | 1.037037                        | 1.03448 | 1.05084 |
| 60         | 1.037037                        | 1.03448 | 1.05084 |
| 65         | 1.037037                        | 1.03448 | 1.05084 |
| 70         | 1.037037                        | 1.03448 | 1.05932 |
| 75         | 1.037037                        | 1.03448 | 1.05932 |
| 80         | 1.037037                        | 1.03448 | 1.05932 |
| 85         | 1.037037                        | 1.03448 | 1.05932 |
| 90         | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 95         | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 100        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 105        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

| Time (min) | Swelling Factor ( $L/L_0$ ) [-] |         |         |
|------------|---------------------------------|---------|---------|
|            | 80 bar                          | 100 bar | 120 bar |
| 110        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 115        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 120        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 125        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 130        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 135        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 140        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 145        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 150        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 155        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 160        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 165        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 170        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 175        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 180        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 185        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 190        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 195        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 200        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 205        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |
| 210        | 1.037037                        | 1.04598 | 1.05932 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยางเหลว PB ที่ความดัน 80 90 และ 100 bar อุณหภูมิคงที่ 60 °C และปริมาณ R134a เป็นศูนย์

| Time (min) | Swelling Factor ( $L/L_0$ ) [-] |        |         |
|------------|---------------------------------|--------|---------|
|            | 80 bar                          | 90 bar | 100 bar |
| 0          | 1.0000                          | 1.0000 | 1.0000  |
| 2.5        | 1.0000                          | 0.9863 | 1.0588  |
| 5          | 1.0156                          | 1.0000 | 1.0588  |
| 7.5        | 1.0469                          | 1.0000 | 1.0735  |
| 10         | 1.0625                          | 0.9863 | 1.0882  |
| 12.5       | 1.0781                          | 1.0000 | 1.0882  |
| 15         | 1.0781                          | 1.0000 | 1.1029  |
| 17.5       | 1.0938                          | 1.0000 | 1.1324  |
| 20         | 1.1094                          | 1.0000 | 1.1471  |
| 22.5       | 1.1250                          | 1.0411 | 1.1471  |
| 25         | 1.1406                          | 1.1507 | 1.1618  |
| 27.5       | 1.1563                          | 1.2466 | 1.1618  |
| 30         | 1.1563                          | 1.3562 | 1.1912  |
| 32.5       | 1.1719                          | 1.4384 | 1.2353  |
| 35         | 1.2031                          | 1.4658 | 1.2647  |
| 37.5       | 1.2344                          | 1.4658 | 1.3088  |
| 40         | 1.2500                          | 1.4658 | 1.3529  |
| 42.5       | 1.2656                          | 1.4658 | 1.3824  |
| 45         | 1.2813                          | 1.4658 | 1.4265  |
| 47.5       | 1.2969                          | 1.4658 | 1.4559  |
| 50         | 1.3125                          | 1.4658 | 1.4706  |
| 52.5       | 1.3281                          | 1.4658 | 1.4853  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 (ต่อ)

| Time (min) | Swelling Factor ( $L/L_0$ ) [-] |        |         |
|------------|---------------------------------|--------|---------|
|            | 80 bar                          | 90 bar | 100 bar |
| 55         | 1.3281                          | 1.4658 | 1.4853  |
| 57.5       | 1.3281                          | 1.4658 | 1.4853  |
| 60         | 1.3281                          | 1.4658 | 1.4853  |
| 65         | 1.3281                          | 1.4658 | 1.4853  |
| 70         | 1.3281                          | 1.4658 | 1.4853  |
| 75         | 1.3281                          | 1.4658 | 1.4853  |
| 80         | 1.3438                          | 1.4658 | 1.4853  |
| 85         | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 90         | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 95         | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 100        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 105        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 110        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 115        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 120        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 125        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 130        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 135        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 140        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 145        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |
| 150        | 1.3438                          | 1.4658 | 1.5000  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยางเหลว PB ที่ความดัน 80 90 และ 100 bar อุณหภูมิคงที่ 60 °C และปริมาณ R134a 50 ml

| Time (min) | Swelling Factor (L/L <sub>0</sub> ) [-] |        |         |
|------------|---|--------|---------|
|            | 80 bar                                  | 90 bar | 100 bar |
| 0          | 1.0000                                  | 1.0000 | 1.0000  |
| 2.5        | 1.0147                                  | 1.0102 | 1.0088  |
| 5          | 1.0147                                  | 1.0102 | 1.0088  |
| 7.5        | 1.0147                                  | 1.0204 | 1.0000  |
| 10         | 1.0294                                  | 1.0204 | 1.0175  |
| 12.5       | 1.0294                                  | 1.0306 | 1.0263  |
| 15         | 1.0294                                  | 1.0204 | 1.0263  |
| 17.5       | 1.0294                                  | 1.0204 | 1.0351  |
| 20         | 1.0441                                  | 1.0204 | 1.0439  |
| 22.5       | 1.0441                                  | 1.0306 | 1.0351  |
| 25         | 1.0441                                  | 1.0306 | 1.0439  |
| 27.5       | 1.0441                                  | 1.0306 | 1.0439  |
| 30         | 1.0441                                  | 1.0408 | 1.0439  |
| 32.5       | 1.0441                                  | 1.0306 | 1.0614  |
| 35         | 1.0588                                  | 1.0408 | 1.0614  |
| 37.5       | 1.0441                                  | 1.0306 | 1.0702  |
| 40         | 1.0588                                  | 1.0306 | 1.0702  |
| 42.5       | 1.0588                                  | 1.0408 | 1.0789  |
| 45         | 1.0588                                  | 1.0408 | 1.0877  |
| 47.5       | 1.0588                                  | 1.0306 | 1.0877  |
| 50         | 1.0588                                  | 1.0510 | 1.0965  |
| 52.5       | 1.0588                                  | 1.0510 | 1.1053  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 (ต่อ)

| Time (min) | Swelling Factor ( $L/L_0$ ) [-] |        |         |
|------------|---------------------------------|--------|---------|
|            | 80 bar                          | 90 bar | 100 bar |
| 55         | 1.1618                          | 1.0918 | 1.1140  |
| 57.5       | 1.2059                          | 1.0918 | 1.1140  |
| 60         | 1.2353                          | 1.0918 | 1.1140  |
| 65         | 1.2500                          | 1.1020 | 1.1228  |
| 70         | 1.2794                          | 1.1020 | 1.1228  |
| 75         | 1.2941                          | 1.1122 | 1.1316  |
| 80         | 1.3676                          | 1.1224 | 1.1316  |
| 85         | 1.3676                          | 1.1224 | 1.1316  |
| 90         | 1.3676                          | 1.1429 | 1.1316  |
| 95         | 1.3676                          | 1.1531 | 1.1404  |
| 100        | 1.3676                          | 1.1633 | 1.1491  |
| 105        | 1.3824                          | 1.1735 | 1.1491  |
| 110        | 1.3824                          | 1.1837 | 1.1491  |
| 115        | 1.3824                          | 1.1939 | 1.1491  |
| 120        | 1.3824                          | 1.1939 | 1.1579  |
| 125        | 1.3824                          | 1.1939 | 1.1579  |
| 130        | 1.3824                          | 1.1939 | 1.1579  |
| 135        | 1.3824                          | 1.1939 | 1.1579  |
| 140        | 1.3824                          | 1.1939 | 1.1579  |
| 145        | 1.3824                          | 1.1939 | 1.1579  |
| 150        | 1.3824                          | 1.1939 | 1.1579  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลผลการทดลองวัดค่า Swelling Factor ของยางเหลว PB ที่ความดัน 80 90 และ 100 bar อุณหภูมิคงที่ 60 °C และปริมาณ R134a 100 ml

| Time (min) | Swelling Factor (L/L <sub>0</sub> ) [-] |        |         |
|------------|---|--------|---------|
|            | 80 bar                                  | 90 bar | 100 bar |
| 0          | 1.0000                                  | 1.0000 | 1.0000  |
| 2.5        | 1.0119                                  | 1.0088 | 1.0088  |
| 5          | 1.0119                                  | 1.0177 | 1.0088  |
| 7.5        | 1.0238                                  | 1.0177 | 1.0088  |
| 10         | 1.0238                                  | 1.0265 | 1.0177  |
| 12.5       | 1.0357                                  | 1.0265 | 1.0177  |
| 15         | 1.0357                                  | 1.0354 | 1.0265  |
| 17.5       | 1.0357                                  | 1.0354 | 1.0265  |
| 20         | 1.0357                                  | 1.0177 | 1.0354  |
| 22.5       | 1.0476                                  | 1.0306 | 1.0354  |
| 25         | 1.0476                                  | 1.0306 | 1.0354  |
| 27.5       | 1.0476                                  | 1.0306 | 1.0442  |
| 30         | 1.0476                                  | 1.0408 | 1.0442  |
| 32.5       | 1.0595                                  | 1.0306 | 1.0442  |
| 35         | 1.0595                                  | 1.0408 | 1.0531  |
| 37.5       | 1.0714                                  | 1.0306 | 1.0619  |
| 40         | 1.0833                                  | 1.0306 | 1.0619  |
| 42.5       | 1.0952                                  | 1.0408 | 1.0619  |
| 45         | 1.0952                                  | 1.0408 | 1.0619  |
| 47.5       | 1.0952                                  | 1.0306 | 1.0708  |
| 50         | 1.0833                                  | 1.0510 | 1.0708  |
| 52.5       | 1.0952                                  | 1.0510 | 1.0708  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 (ต่อ)

| Time (min) | Swelling Factor ( $L/L_0$ ) [-] |        |         |
|------------|---------------------------------|--------|---------|
|            | 80 bar                          | 90 bar | 100 bar |
| 55         | 1.1190                          | 1.0619 | 1.0796  |
| 57.5       | 1.1190                          | 1.0619 | 1.0885  |
| 60         | 1.1310                          | 1.0619 | 1.0885  |
| 65         | 1.1310                          | 1.0796 | 1.0885  |
| 70         | 1.1429                          | 1.0885 | 1.0973  |
| 75         | 1.1548                          | 1.0973 | 1.0973  |
| 80         | 1.1667                          | 1.2035 | 1.1062  |
| 85         | 1.1667                          | 1.2832 | 1.1150  |
| 90         | 1.1786                          | 1.3009 | 1.1239  |
| 95         | 1.1905                          | 1.3009 | 1.1239  |
| 100        | 1.2024                          | 1.3009 | 1.1327  |
| 105        | 1.2024                          | 1.3097 | 1.1327  |
| 110        | 1.2024                          | 1.3097 | 1.1416  |
| 115        | 1.2143                          | 1.3097 | 1.1416  |
| 120        | 1.2143                          | 1.3097 | 1.1504  |
| 125        | 1.2143                          | 1.3097 | 1.1504  |
| 130        | 1.2143                          | 1.3097 | 1.1504  |
| 135        | 1.2143                          | 1.3097 | 1.1504  |
| 140        | 1.2143                          | 1.3097 | 1.1504  |
| 145        | 1.2143                          | 1.3097 | 1.1504  |
| 150        | 1.2143                          | 1.3097 | 1.1416  |

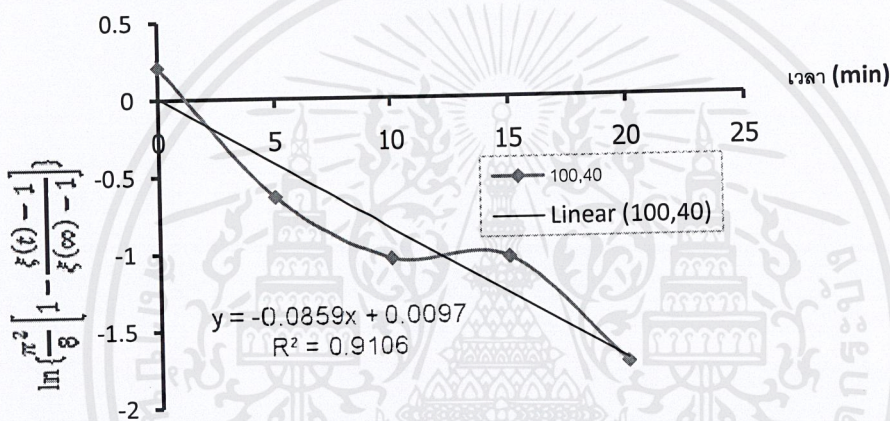
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง ข-1 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) โดยใช้สมการของ Ohshima และคณะ [1] คำนวณได้จากตารางที่ ข-1 และสมการที่ (2.14)

$$\ln \left\{ \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1} \right] \right\} = \frac{-D\pi^2 t}{4L^2} \quad (2.14)$$

จากสมการเมื่อทำการพลอตกราฟระหว่าง  $\ln \left\{ \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1} \right] \right\}$  กับเวลา (t) จะได้ความชันเท่ากับ  $\frac{-D\pi^2}{4L^2}$  และได้กราฟดัง รูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \left\{ \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1} \right] \right\}$  กับ เวลา

รูปที่ ข-1 แสดงผลการพลอตระหว่าง  $\ln \left\{ \frac{\pi^2}{8} \left[ 1 - \frac{\xi(t)-1}{\xi(\infty)-1} \right] \right\}$  กับเวลา (min) ของยางสังเคราะห์ EPDM ที่อุณหภูมิ 40 °C มีสมการความสัมพันธ์คือ  $y = -0.0859x + 0.0097$  ความชันกราฟเท่ากับ -0.0859 จะได้ว่า

$$\frac{-D\pi^2}{4L^2} = -0.0859 \text{ min}^{-1}$$

แทนค่าความหนาของยาง ( $L_0$ ) เท่ากับ 3.16 mm

$$\begin{aligned} D &= \frac{0.0859 \times 4 \times (3.16 \times 10^{-3})^2}{\pi^2 \times 60} \\ &= 3.48 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

## ภาคผนวก ค

## ตัวอย่างการคำนวณค่า Activity [13]

วิธีการคำนวณ Activity

สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$A_i = \frac{y_i \phi_i P}{P_i^{sat} \phi_i^{sat} \exp\left(\frac{v_i^P (P - P_i^{sat})}{RT}\right)} \quad (\text{ค-1})$$

โดยตัวแปรที่ต้องการทราบคือ  $\phi$  ซึ่งสามารถหาได้จาก Peng-Robinson equation of state

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a\alpha}{V^2 + 2bV - b^2} \quad (\text{ค-2})$$

$$a = \frac{0.45724R^2T_c^2}{p_c} \quad (\text{ค-3})$$

$$b = \frac{0.07780RT_c}{p_c} \quad (\text{ค-4})$$

$$\alpha = (1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2)(1 - T_r^{0.5}))^2 \quad (\text{ค-5})$$

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad , \quad T_r = \frac{T}{T_c} \quad (\text{ค-6})$$

$$\ln \phi = Z - 1 - \ln(Z - B) - \ln\left(\frac{Z + 2.414B}{Z - 0.414B}\right) \quad (\text{ค-7})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \frac{0.45724\alpha P_r}{T_r^2} \quad (\text{ก-8})$$

$$B = \frac{0.07780 P_r}{T_r} \quad (\text{ก-9})$$

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (\text{ก-10})$$

ตัวอย่าง การทดลองที่ความดัน bar 80 อุณหภูมิ 60°C R-134a 100 ml มีค่าความดันวิกฤตและอุณหภูมิวิกฤต ดังนี้

| Component            | $P_c$ , (bar) | $T_c$ , (K) | $\omega$ |
|----------------------|---------------|-------------|----------|
| sc - CO <sub>2</sub> | 73.9          | 304.25      | 0.2240   |
| R-134a               | 40.1          | 374.25      | 0.3268   |

จากสมการที่ (ก-6) จะได้

$$P_r = 80/73.9 = 1.0825$$

$$T_r = (60 + 273.15)/304.25 = 1.0950$$

จากสมการที่ (ก-3), (ก-4) จะได้

$$a = (0.45724 \times 83.14^2 \times 304.25^2)/73.9 = 3,958,958.89 \text{ bar dm}^3/\text{kgmol}$$

$$b = (0.0778 \times 83.14 \times 304.25)/73.9 = 26.63 \text{ dm}^3/\text{kg mol}$$

จากสมการที่ (ก-5) จะได้

$$\alpha = \{1 + [0.37464 + (1.54226 \times 0.224) - (0.26992 \times 0.224^2)][1 - 1.095^{0.5}]\}^2 = 0.935$$

นำค่า a, b,  $\alpha$  ไปแทนในสมการที่ (ก-2) จะได้ค่า molar volume ดังนี้

$$80 = [(83.14 \times 333.15)/(V - 26.63)] - [(3,958,958.89 \times 0.935)/(V^2 + (2 \times 26.63V) - 26.63^2)]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = 224.07 \quad \text{dm}^3/\text{kg mol}$$

จากสมการที่ (ค-8) , (ค-9) จะได้

$$A = (0.45724 \times 0.935 \times 1.0825)/1.095^2 = 0.386$$

$$B = (0.0778 \times 1.0825)/1.095 = 0.077$$

นำค่า A , B แทนในสมการ(ค-10) จะได้ค่า compressibility factor ดังนี้

$$Z^3 - (1 - 0.077)Z^2 + [0.386 - (2 \times 0.077) - (3 \times 0.077^2)]Z - [(0.386 \times 0.077) - 0.077^2 - 0.077^3] = 0$$

$$Z = 0.6472$$

เมื่อนำค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดไปแทนในสมการที่ (ค-7) จะได้

$$\begin{aligned} \ln \phi &= 0.6472 - 1 - \ln(0.6472 - 0.077) \\ &\quad - \ln\{[0.6472 + (2.414 \times 0.077)]/[0.6472 + (0.414 \times 0.077)]\} \\ &= -0.3285 \end{aligned}$$

$$\phi = 0.72$$

หาค่า  $P_{\text{sat}}$  จากสมการ โดยแทนค่าอุณหภูมิเท่ากับ 60 °C

$$\begin{aligned} P_{\text{sat}} &= \ln(760/101.3) - 24.04 \ln(60 + 273.15) - [7062.4/(60+273.15)] \\ &\quad + 166.39 + [3.37 \times 10^{-5}(60 + 273.15)^2] \\ &= 108.09 \text{ bar} \end{aligned}$$

นำค่า  $P_{\text{sat}}$  ที่ได้ไปหาค่า  $\phi_{\text{sat}}$  ตามสมการข้างต้นอีกครั้ง จะได้ค่า  $\phi_{\text{sat}} = 0.51$

โดยในการทดลองได้เตรียมปริมาณของ CO<sub>2</sub> กับ R-134a ไว้ที่ค่าต่างๆ เมื่อนำมาคำนวณหาสัดส่วนโมลจะได้ดังนี้

| Composition             | CO <sub>2</sub> | R-134a |             |
|-------------------------|-----------------|--------|-------------|
| Pure CO <sub>2</sub> ,A | 1               | 0      | 80 bar = A  |
| 50mL,A                  | 0.989           | 0.0111 |             |
| 100mL,A                 | 0.977           | 0.0226 |             |
| Pure CO <sub>2</sub> ,B | 1               | 0      | 90 bar = B  |
| 50mL,B                  | 0.989           | 0.0106 |             |
| 100mL,B                 | 0.978           | 0.022  |             |
| Pure CO <sub>2</sub> ,C | 1               | 0      | 100 bar = C |
| 50mL,C                  | 0.99            | 0.0096 |             |
| 100mL,C                 | 0.979           | 0.0209 |             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวสสำหรับกรเชงงานเพอการศกษาแทนน ไมอนุญาตหนาไปใชประโยชนดานการคา  
ไมวารณใดๆ ทังสิน อิกทงห้ามมิใหัดดแปลงเนือหาและตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดแทนในสมการที่ (ค-1) จะได้

$$\begin{aligned}
 A_{CO_2} &= (0.977 \times 0.72 \times 80) / \\
 &\quad \{108.09 \times 0.51 \times \exp[224.07 \times (80 - 108.09) / 83.14 \times 333.15]\} \\
 &= 1.31
 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้