สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงกระบวนการผลิตเม็ดโฟมพอลิโพรพิลีน

T119515

วรรธนะ ชัยสุนทรโยธิน
ศิลป หาญผดุงธรรมะ
อรฉัตร นัยถนอม

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 119515
วัน,เดือน,ปี - 8 S.A. 2554

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Improvement of EPP Foam Bead Process

WATTANA CHAISOONTORNYOTIN

SILAPA HANPADUNGDHUMMA

ORACHAT NAITHANOM

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS 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

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การปรับปรุงกระบวนการผลิตเม็ดโฟมพอลิโพรพิลีน
โดย	นายวรรธนะ ชัยสุนทรโยธิน
	นายศิลป หาญผดุงธรรมะ
	นางสาวอรฉัตร นัยถนอม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์
ปริญญานิพนธ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

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

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.อภินันท์ นัมคณิสรณ์)

.....กรรมการ
(ผศ. รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การปรับปรุงกระบวนการผลิตเม็ดโฟมพอลิโพรพิลีน
โดย นายวรรธนะ ชัยสุนทรโยธิน
นายศิลป หาญผดุงธรรมะ
นางสาวอรฉัตร นัยถนอม
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2553
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตเม็ดโฟมพอลิเมอร์แบบกะ ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบคือ ไม่สามารถควบคุมคุณลักษณะของเม็ดโฟมที่ผลิตได้ ซึ่งในโครงงานนี้ได้สนใจที่จะปรับปรุงกระบวนการผลิตเม็ดโฟมพอลิโพรพิลีนให้เม็ดโฟมที่ผลิตได้มีสัดส่วนการขยายตัวดีขึ้นและมีปริมาณสารเคมีที่ตกค้าง (%Deposited Material) ติดอยู่ที่เม็ดโฟมลดน้อยลงเพื่อลดความยุ่งยากของขั้นตอนการล้างสารเคมีก่อนนำเม็ดโฟมที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

โดยทำการทดลองผลิตเม็ดโฟมด้วยวิธีการเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการบดและไม่ผ่านการบด ที่สภาวะความดัน 12 MPa อุณหภูมิ 120°C เวลา 120 นาที ความเร็วรอบใบพัด 195 rpm เพื่อหาค่า %Deposited Material และได้ทำการทดลอง Visualization เพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของสารต่างๆในถังปฏิกรณ์ และทำการศึกษาสมดุลไอของเหลวของระบบเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ได้ทำ Visualization เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ของไหลเหนือวิกฤตของระบบเฮกเซน คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และศึกษาสัณฐานวิทยาของเม็ดโฟมพอลิโพรพิลีน จากนั้นทำการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของของไหลเหนือวิกฤต ที่ปริมาตรเฮกเซนต่างๆ

จากการทดลองพบว่าเม็ดโฟมที่ได้จากการผลิตเม็ดโฟมโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการเตรียมด้วยการบดมีค่า %Deposited Material เท่ากับ 0.26% ซึ่งน้อยกว่าเม็ดโฟมที่ได้จากการผลิตเม็ดโฟมโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการเตรียมด้วยการบดซึ่งเท่ากับ 0.51% และจากการทดลอง Visualization เพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของสารต่างๆในถังปฏิกรณ์พบว่าชั้นของเฮกเซนและเม็ดพอลิโพรพิลีนลอยตัวอยู่ด้านบนสัมผัสกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อทำการศึกษาสมดุลไอของเหลวของระบบเฮกเซนและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์และทำ Visualization เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ของไหลเหนือวิกฤตของระบบเฮกเซน คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ พบว่าของผสมระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ขณะทำการผลิตเม็ดโฟมมีสภาพเป็นของผสมของของไหลเหนือวิกฤต เมื่อคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของของไหลเหนือวิกฤต ที่ปริมาตรเฮกเซนต่างๆ คือ 30 50 และ 100 ml จะพบได้ว่าเมื่อปริมาตรของเฮกเซนที่ใช้มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของของไหลเหนือวิกฤตระหว่างเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นคือ 45.8 47.9 และ 52.8 J $mol^{-1}K^{-1}$ ตามลำดับ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์โฟมเฉลี่ยเป็น 147 203 และ 307 μm ตามลำดับ ความหนาแน่นของเซลล์มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง 10^{-4} -10^{-5} cells/cm^3 และพบว่ามีแนวโน้มของค่าสัดส่วนการขยายตัวของเม็ดโฟมเพิ่มขึ้นคือ 7.1 13.6 และ 13 ตามปริมาตรเฮกเซนที่ใช้เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตเม็ดโฟมซึ่งในที่นี้มีเป้าหมายคือการเพิ่มค่าสัดส่วนการขยายตัวของเม็ดโฟมพอลิโพรพิลีนสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาตรของเฮกเซนที่ใช้ในการผลิตเม็ดโฟม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Improvement of EPP Foam Bead Process
By	Wattana Chaisoontornyotin
	Silapa Hanpadungdhumma
	Orachat Naithanom
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2010
Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

ABSTRACT

In batch foaming process, the main problem is the difficulty of foam property control. Therefore, this thesis aims to improve foaming process by increasing EPP foam bead expansion ratio and reducing deposited material percentage on foam bead. The batch foaming process will increase feasibility of cleaning of foam bead before fabricate to foam product.

Firstly, the experiment is to study the effect of reducing size of additive particles at the pressure of 12 MPa and the temperature at 120°C for 120 minutes. Secondly, the visualization of hexane in the reactor has been observed and studies the vapor-liquid equilibrium (VLE) of hexane and carbon dioxide system. Then, visualization of supercritical fluid of mixture between water hexane and carbon dioxide has been studied While the foam morphology is also studied. Finally, the calculation of heat capacities of mixture between hexane and carbon dioxide ($C_{P_{mix}}$) as a function of hexane composition (30, 50 and 100 ml) has been studied.

The result has shown that the deposited material percentage on foam bead in case of reducing the size of additive particles (0.26 percents) was smaller than the case of non-reducing size of the additive particles (0.51 percents). From the visualization of hexane in the reactor, the layer of hexane and polypropylene beads floats at the interface between liquid and gas phase (Carbon dioxide). Moreover, the vapor-liquid equilibrium of hexane and carbon dioxide system study has shown that a mixture of hexane and carbon dioxide in the reactor became a supercritical

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fluid. Furthermore, the calculation of specific heat capacity of mixture between hexane and carbon dioxide as a function of hexane composition has shown that the specific heat capacities tend to increase from 45.8 to 52.8 J $mol^{-1}K^{-1}$ and the average foam cell diameters tend to increase from 147 to 307 μm with hexane composition while foam cell densities are constant. Consequently, foam bead expansion ratios increase from 7.1 to 13 with hexane composition. In conclusion, EPP bead foam process could be improved by increasing hexane composition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพจน์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งต่องานปริญญานิพจน์ฉบับนี้ จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ นอกจากนี้

ขอขอบคุณบริษัท ไทยโพลิเอทิลีน จำกัด ที่มอบทุนในการศึกษาวิจัย รวมถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์

ขอขอบคุณ ดร. วิญญู ตัณฑะพานิชกุล ที่ให้คำปรึกษาในการทำปริญญานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ นายณัฐพงศ์ เชื้อพล ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง ทำให้สามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่คณะผู้ดำเนินโครงงานไม่ได้กล่าวนาม ถ้าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ มีข้อผิดพลาดประการใด ขอน้อมรับและกราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้

นายวรรธนะ ชัยสุนทรโยธิน
นายศิลป หาญผดุงธรรมะ
นางสาวอรฉัตร นัยถนอม
คณะผู้ดำเนินโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....III

กิตติกรรมประกาศ.....V

สารบัญ.....VI

สารบัญรูป.....IX

สารบัญตาราง.....XI

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญโครงงาน.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....1

1.3 ขอบเขตของโครงงาน.....2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการเกิดโฟมพอลิเมอร์.....3

2.2 สารเติมแต่ง (Additives).....4

2.3 กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์.....5

2.3.1 กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์แบบต่อเนื่อง.....5

2.3.2 กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์แบบกะ.....5

2.4 Fill Factor (θ).....6

2.5 การบดย่อยด้วยโม่บด.....7

2.6 สารละลายอุดมคติ.....12

2.7 สารละลายจริง.....18

2.8 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับของไหลเหนือวิกฤต.....26

2.9 ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p).....28

2.10 การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีกรณีความดันคงที่.....30

2.10.1 กรณีอุณหภูมิอยู่ในช่วงของเฟสเดียวกัน.....30

2.10.2 กรณีอุณหภูมิครอบคลุมช่วงของการเปลี่ยนเฟส.....31

2.11 การนำโฟมพอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้งาน.....32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....33

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 การทดลองการผลิตโฟมพอลิเมอร์แบบกะโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านและไม่ผ่านการบดและวิเคราะห์ผล %Depositedและสัดส่วนการขยายตัว (Expansion ratio).....35

3.1.1 การผลิตโฟมพอลิเมอร์แบบกะโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการบด.....35

3.1.2 การผลิตโฟมพอลิเมอร์แบบกะโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการบดด้วยเทคนิค Ball mill.....36

3.1.3 การวิเคราะห์เพื่อหา %Deposited material และสัดส่วนการขยายตัว (Expansion ratio).....36

3.2 การ Visualization.....37

3.2.1 การ Visualization เพื่อศึกษาตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของสารต่างๆ ในถังปฏิกรณ์.....37

3.2.2 การ Visualization เพื่อศึกษาการเป็นของไหลเหนือวิกฤตของระบบเฮกเซน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ.....38

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 วิเคราะห์ผล %Deposited material และสัดส่วนการขยายตัวของเม็ดโฟมที่เกิดจากกระบวนการเกิดโฟมโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการบดและไม่ผ่านการบด.....39

4.2 การ Visualization เพื่อศึกษาตำแหน่งและลักษณะการเคลื่อนที่ของสารต่างๆในถังปฏิกรณ์..... 41

4.3 การศึกษาสมดุลไอของเหลวของระบบเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์.....43

4.4 การ Visualization เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ของไหลเหนือวิกฤตของระบบเฮกเซน- คาร์บอนไดออกไซด์ – น้ำ.....45

4.5 สัณฐานวิทยาของโฟมที่ปริมาตรเฮกเซนต่างๆและคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของของไหลเหนือวิกฤติที่ปริมาตรเฮกเซน 30 50 และ 100 ml.....47

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง.....50

5.2 ข้อเสนอแนะ.....51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง.....52

ภาคผนวก.....54

ภาคผนวก ก การคำนวณจำนวนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์.....55

ภาคผนวก ข การคำนวณความดันไอ (P^{sat}) ของแต่ละองค์ประกอบ.....56

ภาคผนวก ค การคำนวณค่า K-value ของเฮกเซนที่อุณหภูมิต่างๆ.....57

ภาคผนวก ง การคำนวณค่า K-value ของเฮกเซนที่สัดส่วนโมลในเฟสของเหลว
ของเฮกเซน (x_1) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 120 °C.....59

ภาคผนวก จ การคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของของผสม.....61

ภาคผนวก ฉ คุณสมบัติเบื้องต้นของเฮกเซน (C_6H_{14}).....63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการเกิดโฟมพอลิเมอร์ 3

รูปที่ 2.2 PE/PS blend foam bead schematic 6

รูปที่ 2.3 แสดงแรงที่เกิดขึ้นขณะเกิดการบดในแต่ละช่วง 8

รูปที่ 2.4 กราฟไอโซเทอร์มอลของผสม A และ B โดยแสดงความดันรวมของไอต่อ
สัดส่วนโมลในวัฏภาคของเหลวที่เป็นไปตามกฎของราอูลท์ 14

รูปที่ 2.5 กราฟไอโซเทอร์มอลแสดงความสัมพันธ์กันโดยตรงระหว่างสัดส่วนโมลของสารA
ในวัฏภาคของเหลวกับสัดส่วนโมลในวัฏภาคไอ 15

รูปที่ 2.6 เครื่องมือสมดุลไอ-ของเหลวแบบสถิต 24

รูปที่ 2.7 เครื่องมือสมดุลไอ-ของเหลวแบบไหลเวียน 24

รูปที่ 2.8 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ แสดงบริเวณสถานะและกระบวนการเปลี่ยนสถานะ
ของสารบริสุทธิ์ 26

รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีตามอุณหภูมิและเอนทาลปีของการหลอมเหลว
(ความร้อนแฝงในการหลอมเหลว) 31

รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ 36

รูปที่ 4.1 ก.) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่ง
แบบผ่านการบด 40

ข.) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาของมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่ง
แบบไม่ผ่านการบด 40

รูปที่ 4.2 ก.) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่ง
แบบผ่านการบด 40

ข.) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาของมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่ง
แบบไม่ผ่านการบด 40

รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของการเกิดโฟมด้วยวิธีการเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่ง
แบบไม่ผ่านการบดและผ่านการบด 41

รูปที่ 4.4 กระบอกอะครีลิคที่มีส่วนผสมของน้ำกับเม็ดพอลีโพรพิลีนและเฮกเซนผสมสี 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 ภาพแสดงการปั่นกวนเฮกเซน น้ำ และเม็ดโพรพิลีน 43
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับสัดส่วนโมลของคาร์บอนไดออกไซด์
ที่อุณหภูมิ 40 80 และ 120 ^{o}C 44
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับสัดส่วนโมลในเฟสของเหลว (x_1)
และแก๊ส (y_1) ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 120 ^{o}C 45
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการเกิดของไหลเหนือวิกฤตของระบบที่ประกอบด้วยเฮกเซน
คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่อุณหภูมิ 40^{o}C ความดัน 8.27 MPa 46
รูปที่ 4.9 ภาพไมโครกราฟ แสดงลักษณะของโฟมพอลิโพรพิลีนที่สภาวะความดัน 17 MPa
อุณหภูมิ 120°C ปริมาตรเฮกเซน 30 50 และ 100 ml เวลาการทำโฟม 180 150 และ
180 นาที ตามลำดับ 47
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเฮกเซนกับขนาดและความหนาแน่นของเซลล์
โฟม 48
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเฮกเซน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) และ
เส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์โฟมที่สภาวะความดัน 17 MPa อุณหภูมิ 120 °C 49
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเฮกเซนกับสัดส่วนการขยายตัว 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างแนวคิดค่าพลังงานอิสระส่วนเกินและค่าสัมประสิทธิ์แอคติวิตี ของระบบหลายองค์ประกอบ 20
ตารางที่ 2.2 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ 27
ตารางที่ 2.3 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้แทนค่าเพื่อหาค่าความจุความร้อนของเฮกเซนและ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 29
ตารางที่ ง.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับสัดส่วนโมลในเฟสของเหลวและแก๊ส 59
ตารางที่ ฉ.1 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะของเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ 61
ตารางที่ ฉ.2 แสดงสัดส่วนโมลของเฮกเซนและคาร์บอนไดออกไซด์ 61
ตารางที่ ฉ.3 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรเฮกเซนต่างๆกัน 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญโครงงาน

ปัจจุบันโฟมพอลิเมอร์มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากเพราะไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานไปจนถึงสิ่งก่อสร้างต่างๆก็อาจจะมีโฟมพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย และเนื่องจากโฟมพอลิเมอร์มีคุณสมบัติต่างๆ เช่น มีความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักเบา เป็นฉนวนกันความร้อน ดูดซับแรงกระแทกและเสียง ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ใช้ทำเป็นฉนวนกันความร้อนและเสียง ดังนั้นจึงมีการนำโฟมพอลิเมอร์ไปใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ

การผลิตโฟมพอลิเมอร์จะมีขั้นตอนต่างๆดังนี้ โดยเริ่มแรกจะทำการเตรียมเม็ดพอลิเมอร์จากเครื่องอัดรีด จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ และทำการผลิตเม็ดโฟมด้วยวิธีทางกายภาพ แล้วจะนำเม็ดโฟมที่ผลิตได้มาทำการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้น แล้วขนส่งเพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โฟมต่อไป โดยในโครงงานนี้ได้สนใจในกระบวนการผลิตเม็ดโฟมแบบกะ (Batch foaming process) ซึ่งในถังปฏิกรณ์จะประกอบไปด้วย 4 วัฏภาค คือ 1.น้ำที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการกระจายตัวของสารเติมแต่งซึ่งสารเติมแต่งนี้จะช่วยลดการเกาะติดกันของเม็ดพอลิเมอร์ในถังปฏิกรณ์ 2. เม็ดพอลิเมอร์ที่ลอยอยู่เหนือน้ำ 3. สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ละลายอยู่กับน้ำ 4. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีวัฏภาคเป็นจำนวนมากในระบบ ทำให้ระบบมีความซับซ้อนและควบคุมได้ยาก ดังนั้นในโครงงานนี้จึงต้องการที่จะลดจำนวนวัฏภาคในระบบลงโดยทำการศึกษาสมดุลไอของเหลว (Vapor-liquid equilibrium) ของเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

นอกจากนี้ในโครงงานนี้ยังศึกษาถึงผลกระทบของการเตรียมมาสเตอร์แบตซ์ของสารเติมแต่งที่มีต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดโฟมพอลิเมอร์ โดยการลดขนาดอนุภาคสารเคมีของมาสเตอร์แบตซ์ของสารเติมแต่ง ทำให้สามารถนำผลที่ได้มาช่วยปรับปรุงลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดโฟมพอลิเมอร์และสามารถนำไปใช้ในการเตรียมสารเติมแต่งเมื่อขยายขนาดการผลิตไปเป็นกระบวนการระดับอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตเม็ดโฟมพอลิเมอร์โดยลดจำนวนวัฏภาคในระบบและลดขนาดอนุภาคของสารเติมแต่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เพื่อศึกษาสมดุลไอของเหลวของเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วนำผลที่ได้ไปเป็นแนวทางพัฒนาคุณลักษณะของเม็ดโฟมพอลิเมอร์ที่ทำการผลิต

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. ทำการทดลองการผลิตเม็ดโฟมด้วยวิธีการเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการบดและผ่านการบด ที่สภาวะความดัน 12 MPa อุณหภูมิ 120°C เวลา 120 นาที ความเร็วใบพัด 195 rpm

2. ทำการทดลอง Visualization เพื่อศึกษาตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของสารต่างๆในถังปฏิกรณ์

3. คำนวณสมดุลไอของเหลวของระบบ 2 องค์ประกอบ โดยการประมาณค่าคงที่สมดุล (K-value) ของเฮกเซนที่ความดัน 14 MPa อุณหภูมิตั้งแต่ 120°C ถึง 160°C และประมาณค่าคงที่สมดุลของเฮกเซนที่สัดส่วนโมลในเฟสของเหลวของเฮกเซน (x_1) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 120°C โดยใช้สมการของมากูลส์ (Marqules Equation) และโมเดลกฎของราอูลท์ (Raoult's law) ช่วยในการคำนวณ

4. ทำการทดลองการเกิดโฟมด้วยวิธีการเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งโดยปรับเปลี่ยนปริมาตรเฮกเซนที่ใช้ (30, 50 และ 100 ml) ที่สภาวะความดัน 17 MPa อุณหภูมิ 120°C เวลา 120 นาที ความเร็วใบพัด 195 rpm

5. ทำการศึกษาพฤติกรรมการเกิดสภาพของไหลเหนือวิกฤตของของผสมระหว่างเฮกเซน น้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดัน 8.27 MPa อุณหภูมิ 40°C

6. คำนวณค่าความจุความร้อน (C_p) ของของไหลเหนือวิกฤตผสมระหว่างเฮกเซนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สัดส่วนโมลของเฮกเซนต่างๆ ที่ความดัน 17 MPa อุณหภูมิ 120°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการเกิดโฟมพอลิเมอร์ [1]

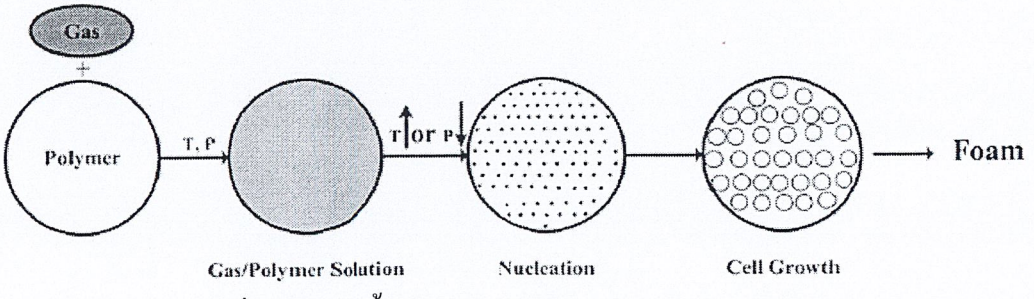
โฟมพอลิเมอร์เป็นพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการเติมแก๊สเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากแทรกอยู่ระหว่างเนื้อพอลิเมอร์ การใช้สารประกอบประเภทคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) แทรกอยู่ในโฟมพอลิเมอร์ที่ทำจากพอลิสไตรีนจะช่วยเก็บความร้อนได้ดี แต่สาร CFC นี้ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green house effect) ซึ่งส่งผลให้โลกร้อนขึ้นและยังทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศอีกด้วย จากการที่ชั้นโอโซนถูกทำลายจึงทำให้รังสีอัลตราไวโอเลตสามารถส่องทะลุมายังโลกได้มากซึ่งจะเป็น อันตรายต่อสิ่งมีชีวิตบนโลกได้ ดังนั้นจึงมีการใช้สารชนิดอื่นทดแทนสาร CFC ซึ่งพบว่าแก๊สบิวเทนและเพนเทนสามารถนำมาใช้ผลิตโฟมพอลิเมอร์ได้ โดยในปัจจุบันนี้มีพอลิเมอร์มากมายหลายชนิดที่สามารถนำมาทำโฟมพอลิเมอร์ได้ เช่น พีวีซี พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน เป็นต้น [2] ในการเกิดโฟมพอลิเมอร์นั้นจะประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การละลายของสารเกิดฟอง (Foaming agents) ในพอลิเมอร์เพื่อที่จะทำให้เกิดสารละลายพอลิเมอร์กับแก๊ส

ขั้นตอนที่ 2 เกิดการแยกเฟส (Phase Separation) ของสารละลายโดยเป็นเฟสของแก๊สและพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics Instability) ด้วยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน

ขั้นตอนที่ 3 คือ การเติบโตของฟองแก๊ส

ขั้นตอนที่ 4 คือ การหยุดการเติบโตของฟองแก๊สซึ่งก็คือกระบวนการเสถียรของฟองแก๊ส ทำให้ได้โฟมพอลิเมอร์เกิดขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการเกิดโฟมพอลิเมอร์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารเติมแต่ง (Additives) [4]

2.2.1. สารเกิดฟอง เป็นสารที่ใช้ในการทำให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบโฟม โดยสารเกิดฟองสามารถเป็นได้ทั้งแก๊สและสารเคมี ในกรณีที่สารเกิดฟองเป็นสารเคมีจะเกิดการสลายตัวเพื่อให้เกิดแก๊สในพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างกระบวนการผลิต โดยแก๊สที่เกิดจากสารเกิดฟองทั้งสองแบบนั้นมีการกระจายตัวและเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์หลอมเหลวภายใต้ความดันภายในกระบวนการผลิต เมื่อความดันของกระบวนการผลิตลดลงแก๊สจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นเซลล์ขึ้นในพอลิเมอร์

- สารเกิดฟองทางกายภาพ (Physical Foaming Agents)

สารเกิดฟองทางกายภาพ คือ ของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำซึ่งจะกระจายอยู่ในวัสดุพอลิเมอร์เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างแบบโฟม ซึ่งสารเกิดฟองทางกายภาพมักเป็นของเหลวที่มีราคาถูก ข้อดีของสารเกิดฟองทางกายภาพคือเมื่อกลายเป็นแก๊สแล้วจะไม่เกิดสารตกค้างภายในโฟมพอลิเมอร์ แต่ข้อเสียของสารเกิดฟองทางกายภาพคือ เก็บรักษายาก การใช้สารเกิดฟองทางกายภาพ ทำได้ 2 วิธี คือ

1). ฉีดแก๊สเฉื่อยเช่น แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าในพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีความดันสูง ซึ่งแก๊สจะเกิดการขยายตัวเมื่อความดันของระบบมีค่าลดลง

2). เติมของเหลวมีจุดเดือดต่ำลงไปผสมในพอลิเมอร์ ซึ่งของเหลวที่นิยมใช้ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน ฮาโลจิเนตไฮโดรคาร์บอน และอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ

- สารเกิดฟองทางเคมี (Chemical Foaming Agents)

สารเกิดฟองทางเคมีเป็นสารที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง แต่จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงและปล่อยแก๊สออกมา โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนขึ้นในผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้สารเกิดฟองทางเคมีมีหลากหลายชนิด อาทิเช่น การผลิตยางฟองน้ำ (Sponge) ด้ามจับ กรอบหน้าต่าง ชิ้นส่วนยานยนต์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ คอมพิวเตอร์ และของเล่น เป็นต้น ซึ่งประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ มีน้ำหนักเบากว่า ใช้พอลิเมอร์น้อยกว่า และมีรูปแบบที่หลากหลายกว่า

2.2.2. สารลดแรงตึงผิว สารลดแรงตึงผิวช่วยให้โฟมพอลิเมอร์ขยายตัวได้ดี ไม่เกิดรูพรุนฟองแก๊สมีความเสถียรและโฟมพอลิเมอร์ที่ได้มีลักษณะโครงสร้างเซลล์ที่มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อนและทำให้โฟมพอลิเมอร์นิ่ม เมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้นทำให้ได้โฟมพอลิเมอร์ที่มีเซลล์ขนาดเล็กลง มีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการคืนรูปและความแข็งของโฟมพอลิเมอร์ที่ได้ลดลง

2.2.3. สี (Dyes and Pigments) เป็นสารที่เติมลงไปในพอลิเมอร์ เพื่อให้เกิดสีสันตามความต้องการ เป็นการเพิ่มคุณค่าและความสวยงามให้แก่ผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4. สเตบิไลเซอร์ (Stabilizers) เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อช่วยให้โฟมพอลิเมอร์มีความอยู่ตัว ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ไม่เสื่อมสลายง่าย นอกจากนี้ ยังช่วยให้โฟมพอลิเมอร์มีความทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย

2.2.5. พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารที่เติมลงไปผสมกับพอลิเมอร์เพื่อทำให้พอลิเมอร์นิ่ม เป็นการเพิ่มคุณสมบัติในทางอ่อนตัว เพิ่มความเหนียว เพิ่มความทนทานต่อความร้อน เพิ่มความต้านทานการสึกหรอ และทำให้พอลิเมอร์สามารถเติมฟิลเลอร์ได้ปริมาณมากขึ้น แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ชนิด ปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยแบบปฐมภูมิจะเป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีคุณภาพสูง ใช้ได้โดยตรง แต่ราคาแพง ในขณะที่พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิเป็นพลาสติไซเซอร์ที่มีคุณภาพค่อนข้างต่ำกว่าประเภทแรก นำไปใช้โดยตรงไม่ได้จะต้องใช้ควบคู่กับพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิแต่พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิจะเพิ่มคุณสมบัติเฉพาะอย่างได้ดีกว่า

2.2.6. สารเกิดนิวเคลียสเชิงเคมี (Chemical Nucleating Agents) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปผสมกับพอลิเมอร์เพื่อช่วยกระตุ้นให้พอลิเมอร์เกิดนิวเคลียสในขั้นตอนการเกิดนิวเคลียสได้ดีขึ้น แล้วเติบโตกลายเป็นฟองโฟมต่อไป

2.3 กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์ (Foaming Process) [5]

2.3.1 กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์แบบต่อเนื่อง (Continuous Foaming Process)

ทำได้โดยผสมสารเกิดนิวเคลียสเชิงเคมีกับพอลิเมอร์ แล้วนำไปอัดรีดในเครื่องอัดรีด (Extruder) จากนั้นจะเกิดการขยายตัวอย่างทันทีทันใดหลังจากความดันลดลงที่บริเวณหัวได (Die)

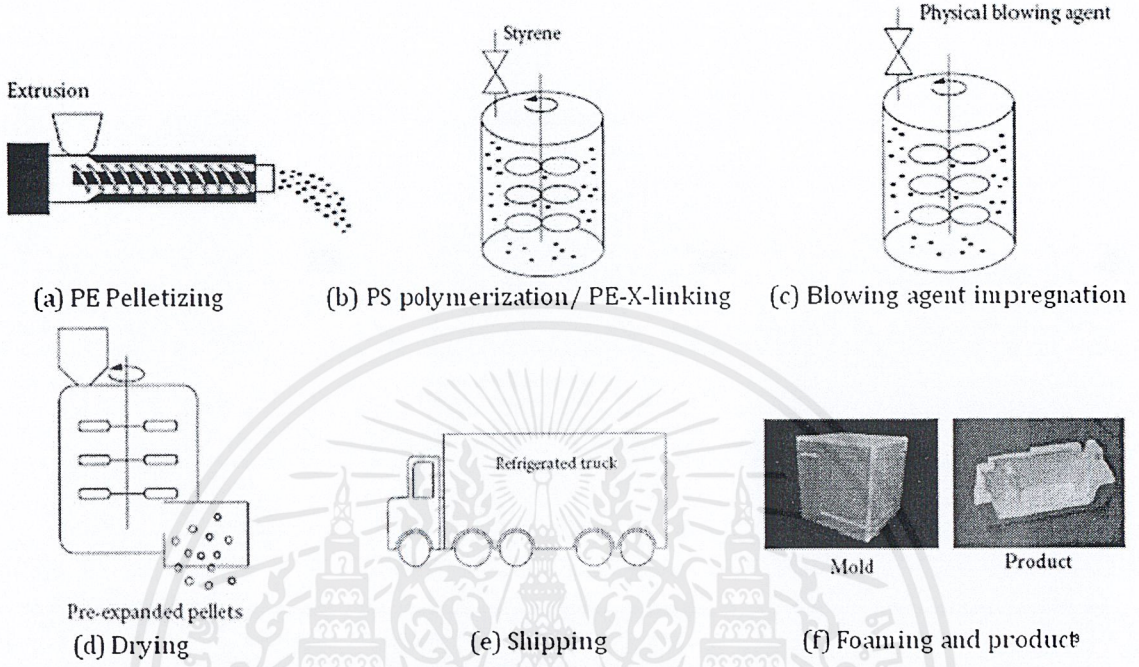
2.3.2 กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์แบบกะ

กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์แบบกะทำได้โดยผสมสารเกิดนิวเคลียสกับพอลิเมอร์ แล้วเติมแก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass transition temperature หรือ T_g) ภายใต้สภาวะความดันสูงเข้าไปจนอิ่มตัว ซึ่งตัวอย่างที่อิ่มตัวจะถูกผลิตขึ้นเมื่อทำการลดความดัน และเมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อิ่มตัวจนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว แล้วเซลล์ของโฟมพอลิเมอร์ก็จะเกิดนิวเคลียสขึ้นโดยการเติบโตของเซลล์จะถูกควบคุมจากการให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์อย่างช้าๆ กระบวนการผลิตโฟมพอลิเมอร์แบบกะนี้ นิยมใช้ผลิตโฟมพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำและมีรูปร่างแน่นอน ข้อได้เปรียบของกระบวนการนี้คือ โฟมพอลิเมอร์มีการขยายตัวสูง ได้โฟมพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก (Microcellular closed cell) และโฟมพอลิเมอร์มีความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) สูง

ต่อไปจะยกตัวอย่างกระบวนการผลิตโฟมแบบกะ[5] โดยขั้นตอนเริ่มแรกจะทำการเตรียมเม็ดพอลิเอททิลีนจากเครื่องอัดรีด จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันกับพอลิสไตรีนและทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใส่สารเกิดโฟมเข้าไปในถังแล้วทำการผลิตโฟมแบบกะด้วยวิธีทางกายภาพ จากนั้นทำการอบไล่ความชื้น แล้วขนส่งเพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป



รูปที่ 2.2 PE/PS blend foam bead schematic

2.4 Fill Factor (θ) [6]

ในกระบวนการผลิตโฟมแบบกะต้องใช้ถังปฏิกรณ์ในกระบวนการผลิตโฟม ซึ่งสัดส่วนของสารที่ต้องใส่ในถังปฏิกรณ์มีความสำคัญในกระบวนการผลิตโฟม โดย Fill factor คือ เปอร์เซ็นต์ของการใส่สารลงในขั้นตอนของการผสมและได้มีการศึกษาเป็นครั้งแรกในอุตสาหกรรมยาง โดยปริมาณของสารที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผสมนั้นเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่ม Fill factor ภายใต้ขอบเขตที่จำกัดคือ ขีดจำกัดล่าง (Lower limit) หาได้จากปริมาณของ Rolling bank ที่เหมาะสมและหาได้จากปริมาณความจุของการให้ความร้อนหรือการหล่อเย็นจากการที่อยู่ติดผนังที่เพียงพอ ในขณะที่ขีดจำกัดบน (Upper limit) หาได้จากความต้องการของที่ว่างสำหรับการนวด (Kneading) และผลิตภาพ (Productivity) ที่ความเร็วในการหมุนคงที่ ผลของ Fill factor ที่สูงขึ้นในการบรรจุสารที่มากกว่า 10% ของค่า Fill factor ที่เหมาะสมไม่เป็นที่ต้องการเนื่องจากจะใช้พลังงานและเวลาในการผสมมากขึ้น การทำให้ Fill factor ที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นทำได้โดยลดความเร็วในการหมุน เปลี่ยนชนิดของเครื่องผสมและเปลี่ยนความหนืดของสารประกอบให้มีความหนืดที่น้อยลง ค่าโดยทั่วไปของ Fill factor ในอุตสาหกรรมยางจะอยู่ในช่วง 0.60-0.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสำคัญของ Fill factor ในการทำผสม (Compounding) ของเทอร์โมพลาสติกยังมีการศึกษาไม่มาก จาก Rule of thumb ค่า Fill factor จะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.70-0.75 นำมาใช้ในการผสมเทอร์โมพลาสติก สมการโดยทั่วไปของ Fill factor สามารถคำนวณได้จาก

$$\theta = \sum(w_i \times \theta_i) \tag{2.1}$$

โดย w_i คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสาร i

θ_i คือ fill factor ของสาร i

ปริมาตรรวมของสารตอนเริ่มต้น (V) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และน้ำหนักของสารที่ใช้ในการผสมคำนวณได้จากสมการที่ (2.2) ดังนี้

$$V = V_{reactor} \times \theta \tag{2.2}$$

$$V = \sum(\overline{V}_i \times m_i) = \sum\left(\frac{1}{\rho_1} \times m_i\right) \tag{2.3}$$

โดย $V_{reactor}$ คือ ปริมาตรรวมของเครื่องปฏิกรณ์ (cm^3)

$\overline{V}_i$ คือ ปริมาตรจำเพาะของสาร i (cm^3/g)

ρ_i คือ ความหนาแน่นของสาร i (g/cm^3)

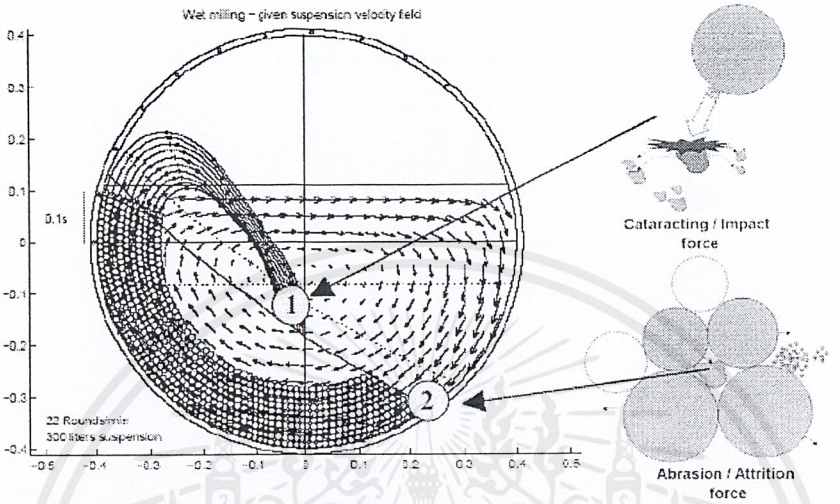
m_i คือ ปริมาณของสาร i (g)

2.5 การบดย่อยด้วยหม้อบด [7]

ในการศึกษาถึงผลกระทบของการเตรียมมาสเตอร์แบตซ์ของสารเติมแต่งที่มีต่อลักษณะและคุณสมบัติของโฟมพอลิเมอร์นั้นเนื่องจากสารเติมแต่งที่ใช้เป็นอนุภาคของแข็ง จึงได้สนใจการลดขนาดอนุภาคสารเคมีของมาสเตอร์แบตซ์ของสารเติมแต่ง ซึ่งการลดขนาดอนุภาคสารเคมีนั้นได้เลือกใช้หม้อบดในการบดย่อยวัตถุดิบ หลักการทั่วไปของการบดย่อยวัตถุดิบด้วยหม้อบดคือการให้วัตถุดิบถูกกระแทก (Cataracting/Impact grinding force) และ/หรือขัดสี (Abrasion/Attrition grinding force) ด้วยลูกบด โดยหลักการทำงานคือเมื่อหม้อบดหมุนจนได้รอบตามที่กำหนดไว้ กลไกภายในหม้อบดเกิดขึ้นได้เป็น 2 แบบคือการบดที่เกิดจากการตกกระทบของลูกบด (Cataracting Media) กับวัตถุดิบป้อนบริเวณ Impact Zone และการบดที่เกิดจากแรงขัดสีของลูกบด (Cascading Media) กับวัตถุดิบป้อนบริเวณ Abrasion Zone ดังแสดงในรูปที่ 2.3 หากให้อัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบต่อความเร็ววิกฤต (N_{OP}/N_C) มากขึ้นก็จะทำให้เกิด Empty Zone ได้น้อยลง เนื่องจากลูกบดสามารถวิ่งขึ้นไปได้สูงกว่าเดิม ในขณะเดียวกันก็จะสามารถเพิ่ม Impact Zone ได้มากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.3 แสดงแรงที่เกิดขึ้นขณะเกิดการบดในแต่ละช่วง [8]

การแตกตัวของวัตถุดิบประกอบกันด้วย 2 กลไกคือ Chipping และ Abrasion ซึ่ง Chipping เป็นการบดที่ทำให้เกิดอนุภาคหยาบหลุดออกมาจากเม็ดวัตถุดิบป้อนขนาดใหญ่ แต่ Abrasion คือการบดที่ทำให้เกิดอนุภาคเล็กๆ จากอนุภาคหยาบอีกตอนหนึ่งหรือกล่าวรวมกันได้ว่ากระบวนการบดด้วยแรงขัดสีนั้นรวมกันเรียกว่า Attrition

การพิจารณาถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพของหม้อบด

โดยทั่วไปหม้อบดสามารถทำการบดได้ใน 2 ลักษณะคือ การบดแบบเปียก (Wet grinding) และการบดแบบแห้ง (Dry grinding) ขั้นแรกของการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของหม้อบดต้องทราบว่า ปริมาตรทั้งหมดของหม้อบด สามารถใส่ลูกบดได้ประมาณร้อยละ 50 และจะให้เกิดช่องว่างหรือ Void Fraction ประมาณร้อยละ 20 ดังนั้นก็จะเหลือพื้นที่ในการใส่วัตถุดิบและน้ำอีกประมาณร้อยละ 30

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบดด้วยหม้อบด

1. คุณสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุดิบ (Raw Materials Characterization) โดยคุณลักษณะเฉพาะตัวของวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อการบดเช่น แหล่งกำเนิด ขนาดก่อนเข้าบดของวัตถุดิบป้อน (Feeding Size) และความสามารถในการแตกตัว (Grindability) สิ่งที่ช่วยปรับปรุงกระบวนการบดได้คือ ขนาดของวัตถุดิบป้อนและความสามารถในการแตกตัวขนาดตั้งต้นของวัตถุดิบป้อนที่ต้องการบดด้วยหม้อบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความสามารถในการแตกตัวของวัตถุดิบ สามารถหาได้จากการทดสอบค่าความสามารถในการแตกตัวของวัตถุดิบแต่ละชนิดได้ โดยอยู่ในหน่วย g/revolution หรืออาจอยู่ในรูปของดัชนีงาน (Working Index) ที่อยู่ในหน่วย kWh/Ton ส่วนคุณสมบัติเฉพาะของวัตถุดิบป้อน อธิบายได้ด้วยทฤษฎีหลายทฤษฎี ซึ่งกล่าวถึงความสามารถในการบดในที่นี้ขอยกตัวอย่างในรูปแบบของดัชนีงาน โดยทฤษฎีที่แพร่หลายที่สุดคือ Bond Theory

2. ความเร็วรอบหม้อบด (Mill Rotational Speed) โดยวิธี Variable Speed Drive ช่วยทดสอบเพื่อหาความเร็วที่เหมาะสมก่อนการปรับระบบเชิงกลอื่น ๆ

ความเร็ววิกฤต (Critical Speed) หมายถึง ความเร็วรอบที่ทำให้ลูกบอลถูกเหวี่ยงติดไปกับผนังตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการบดแบบ Cataracting/Impact Grinding หรือเกิดน้อยมาก ซึ่งสภาพนี้เกิดจากการที่ลูกบดมีความเร็วเท่ากับความเร็วหนีศูนย์กลางหรือ Gravimetric/Centrifuging Speed ดังนั้นจะเรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็ววิกฤต (N_C) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$N_c = \frac{42.3}{(D-d)^{1/2}} \tag{2.4}$$

เมื่อ N_C คือ ความเร็ววิกฤต (rpm)

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของหม้อบด (m)

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกบด (m)

ความเร็วของหม้อบด N_{OP} จะอยู่ในช่วง 65 – 80 % N_C ทั้งนี้ก็เป็นเพราะว่าผลของ Filling Degree, f หมายถึง ปริมาตรของลูกบดต่อปริมาตรของหม้อบด ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวจะส่งผลต่อกำลังงานของมอเตอร์ขับ โดยมอเตอร์จะมีแรงขับเต็มประสิทธิภาพที่ f เท่ากับ 40-45 %

3. ขนาดของวัตถุดิบต่อลูกบด (Raw Materials Size to grinding media size) [8] ขนาดของวัตถุดิบ (Feeding Size, F) ก็จะส่งผลต่อการเลือกใช้ขนาดลูกบด

4. ปริมาณลูกบดและการกระจายขนาดอนุภาคของลูกบด (Grinding media charging quantity and their size distribution) ในกระบวนการบดนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงระยะการบด คือ

ช่วงที่ 1 ที่ลูกบดขนาดใหญ่มีความสำคัญ เพื่อก่อให้เกิดการบดแบบ Cataracting Grinding Force แต่หลังจากที่วัตถุดิบถูกตกกระทบจนมีขนาดเล็กลงจนไม่สามารถบดแบบ Cataracting Grinding Force ได้ วัตถุดิบดังกล่าวก็จะเข้าสู่ระยะการบดช่วงที่ 2

ช่วงที่ 2 เป็นการบดแบบ Attrition/Abrasion Grinding Force โดยพิจารณาถึงปัจจัยของจำนวนลูกบดที่มีอยู่ภายในหม้อบดด้วย และทำการบดวัตถุดิบชนิดเดียวกัน ซึ่งภายในประกอบด้วยลูกบดขนาดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ค่าความเข้มข้นและความหนืดของ Slurry ที่ใช้ในการบดสำหรับการบดแบบเปียก (Raw materials slurry viscosity and concentration) เมื่อลูกบดเคลื่อนที่จะประกอบด้วยแรงต้าน 2 แรงคือ แรงโน้มถ่วงและแรงสโตร์ก หากพิจารณาสูตรคำนวณของแรงสโตร์กแล้วพบว่า สิ่งที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของลูกบดใน Slurry คือ ความหนาแน่นของตัวกลางและความหนืดของตัวกลาง

Stokes' Law, $$V = \frac{1}{18}\left[\frac{(\rho_S - \rho_F)gd^2}{\mu}\right] \quad (2.5)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วที่วัตถุตกลง

G คือ แรงโน้มถ่วง (9.80 m/s^2)

ρ_S คือ ความหน่าแน่นของวัตถุ

ρ_F คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของวัตถุ

μ คือ ความหนืดของตัวกลาง

6. อัตราส่วนวัตถุดิบในหม้อบด (Raw materials suspension ratio) โดยทั่วไปอัตราส่วนที่แนะนำไว้จะอยู่ที่ร้อยละ 20 – 25 ของปริมาตรหม้อบด เพราะว่ามีการกำหนดอัตราส่วนลูกบดไว้ที่ประมาณร้อยละ 50 และอัตราช่องว่างมีอยู่อีกร้อยละ 20 - 30 ทั้งนี้เพราะต้องการให้เกิด contacting Point ระหว่างลูกบดและวัตถุดิบให้มากที่สุด โดยการลดขนาดอนุภาคคือ การกระทำเพื่อลดขนาดอนุภาคให้เล็กลงเพื่อให้ง่ายต่อกระบวนการผลิตในขั้นต่อๆไปและเพื่อให้ได้ตามข้อกำหนดทั้งขนาดและรูปร่าง

การย่อยลดขนาดอนุภาคมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีต่อการละลายต่อการหลอมต่อความหนาแน่นและต่อความเหมาะสมของการกระบวนการต่างๆ ในขั้นถัดไป สิ่งที่ตามมาคือของแข็งอาจถูกทำให้มีขนาดเล็กลงโดยกระบวนการอัดหรือบีบ (Compression) ทุบหรือกระแทก (Impact) โม่หรือขัด (Attrition or rubbing) ตัด (Cutting) หรือบด ซึ่งในทางอุดมคติแล้วควรจะมีคุณสมบัติคือ มีความจุในปริมาณที่สูง ใช้กำลังน้อย และให้ผลผลิตมีช่วงของขนาดตามกำหนด

ประสิทธิภาพของการบด

อัตราส่วนของพลังงานพื้นผิวหน้าที่เกิดใหม่จากการบดต่อพลังงานซึ่งดูดกลืนไว้ในของแข็ง เรียกว่า ประสิทธิภาพของการบด (crushing efficiency, η)

$$W_n = \frac{e_s(A_{wb} - A_{wa})}{\eta_c} \quad (2.6)$$

กำหนดให้ e_s คือ ค่าพลังงานพื้นผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ($ft\text{-}lb_f/ft^2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า A_{wb}, A_{wa} เป็นค่าพื้นที่ต่อหน่วยมวลของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นตามลำดับ

ค่า W_n เป็นค่าพลังงานที่ถูกดูดซับไว้ในหนึ่งหน่วยมวลของวัสดุ

ประสิทธิภาพของการบดหาได้จากการทดลอง โดยการประมาณค่า e_s จากทฤษฎี Solid ค่า e_s แต่จากผลก็แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการบีบอัดอยู่ที่ประมาณ 0.06 ถึง 1 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าพลังงานที่ถูกดูดไว้ในของแข็ง W_n นี้ต่ำกว่าค่าพลังงานที่ป้อนให้แก่เครื่องบด ถ้าพลังงานที่ให้แก่เครื่องบดเท่ากับ W ส่วนหนึ่งของ W จะถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะความฝืดของ Bearing และส่วนเคลื่อนไหวต่างๆ อัตราส่วนของพลังงานที่ถูกดูดซับต่อพลังงานที่ให้แก่เครื่องกำหนดให้เท่ากับ η_m หรือประสิทธิภาพเชิงกล

$$\eta_m = \frac{W_n}{W} \Longrightarrow AW = \frac{W_n}{\eta_m} = \frac{e_s(A_{wb} - A_{wa})}{\eta_m \eta_c} \tag{2.7}$$

ถ้ากำหนดให้ $\dot{m}$ เป็นค่าอัตราป้อน ค่าพลังงานที่ใช้โดยเครื่อง (P) จะเท่ากับ

$$P = W\dot{m} = \frac{\dot{m} e_s (A_{wb} - A_{wa})}{\eta_m \eta_c} \tag{2.8}$$

คำนวณค่า A_{wb}, และ A_{wa} จากสมการ

$$P = \frac{6\dot{m} e_s}{\eta_m \eta_c \rho_p} \left(\frac{1}{\phi_b \bar{D}_{sb}} - \frac{1}{\phi_a \bar{D}_{sa}} \right) \tag{2.9}$$

เมื่อ $\bar{D}_{sa}$, $\bar{D}_{sb}$ = Volume-surface mean diameter of feed and product

ϕ_a , ϕ_b = ค่า Sphericity ของ feed และ product

ρ_p = ค่าความหนาแน่นของอนุภาค

ในกระบวนการผลิตโฟมแบบกะนั้น ในถังปฏิกรณ์ได้มีสารละลายของสารต่างที่ใช้ในการผลิตโฟมอยู่ ดังนั้นจึงได้สนใจที่จะศึกษาเรื่องต่างๆเกี่ยวกับสารละลายดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สารละลายอุดมคติ [9]

ฟิวกาซิตีและสัมประสิทธิ์ฟิวกาซิตี

จากนิยามฟิวกาซิตี (Fugacity) ของสารองค์ประกอบ i ของของผสมมีสัญลักษณ์เป็น $\hat{f}_i$ คือ

$$[dG_i^- = d\mu_i = RT\,d(\ln \hat{f}_i)]_T \tag{2.10}$$

และ $$\frac{\lim \hat{f}_i (P,T)}{y_i P} = 1 \tag{2.11}$$

จะได้ว่า

$$\hat{f}_1^{(1)} = \hat{f}_1^{(2)} = \hat{f}_1^{(3)} = \cdots = \hat{f}_1^{(j)}$$

$$\hat{f}_n^{(1)} = \hat{f}_n^{(2)} = \hat{f}_n^{(3)} = \cdots = \hat{f}_n^{(j)} \tag{2.12}$$

ในทางปฏิบัตินิยมใช้สัมประสิทธิ์ฟิวกาซิตี (Fugacity coefficient, ϕ) แทนฟิวกาซิตี นิยามของสัมประสิทธิ์ฟิวกาซิตี ของสององค์ประกอบ i ในระบบของผสม คือ

$$\hat{\emptyset}_i = \frac{\hat{f}_i}{y_i P} \tag{2.13}$$

จากสมการสถานะทั่วไปโดยวิธีของลีเดอเซ็นได้ว่า

$$\ln \emptyset = \int_0^P (Z-1)\frac{dP}{P} \tag{2.14}$$

ในการคำนวณอินทิกรัลของสมการ (2.14) นี้ที่ลิมิตต่ำ เมื่อ Z/P→ ∞ สมการถูกจัดใหม่เพื่อว่าลิมิตต่ำกว่า เป็นกรณีอุดมคติเมื่อ ϕ = 1 ที่ความดันอ้างอิง P_0 ได้เป็น

$$\ln \emptyset = -\int_{P_0}^P \frac{1-Z}{P}\,dP \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามของสารละลายอุดมคติ

นิยามของ Lewis กล่าวว่า "สารละลายอุดมคติจะมีค่าฟิวกาซิตี ของแต่ละสารเป็นสัดส่วนกับสัดส่วนโมล ตลอดช่วงของความเข้มข้นในทุกๆ อุณหภูมิและทุกๆ ความดัน"

$$\hat{f}_i = k_i x_i \tag{2.16}$$

โดยที่ $\hat{f}_i$ คือ ค่าฟิวกาซิตีของสาร i ในระบบไม่ว่าจะเป็นสถานะไอ ของเหลว หรือของแข็ง

x_i คือ สัดส่วนโมล

k_i คือ ค่าคงตัวของการเป็นสัดส่วน

ซึ่งค่า k_i จะมีค่าเท่ากันตลอดช่วงของความเข้มข้น ณ อุณหภูมิและความดันที่กำหนดให้และสำหรับ $x_i = 1$ จะได้ว่า

$$k_i = f_i^0 \tag{2.17}$$

โดยที่ f_i^0 คือ ค่าฟิวกาซิตีของสารบริสุทธิ์ i ณ ความดันและอุณหภูมิที่กำหนดให้ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ (2.16) ได้อีกรูปแบบคือ

$$\hat{f}_i = f_i^0 x_i \tag{2.18}$$

ระบบที่ประกอบไปด้วยสาร 2 ชนิด (Binary System)

ณ อุณหภูมิของระบบคงที่ ระบบที่ประกอบไปด้วยสาร A และ B สามารถเขียนสมการจากกฎของราอูลห์ได้เป็น

$$P_A = x_A P_A^0 \tag{2.19}$$

$$P_B = x_B P_B^0 \tag{2.20}$$

ความดันรวมจากกฎของดาลตัน (Dalton's Law)

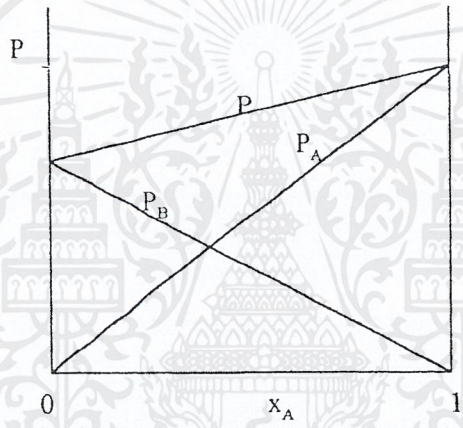
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = P_A + P_B = x_A P_A^0 + x_B P_B^0 \quad (2.21)$$

เนื่องจากเป็นระบบสององค์ประกอบดังนั้น 1- $x_A = x_B$ แทนลงในสมการ (2.21) จะได้

$$P = x_A(P_A^0 - P_B^0) + P_B^0 \quad (2.22)$$

สมการ (2.22) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันในระบบสารละลายอุดมคติกับสัดส่วนโมลในวัฏภาคของเหลวซึ่งจะเป็นกราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟไอโซเทอร์มอลของผสม A และ B โดยแสดงความดันรวมของไอต่อสัดส่วนโมลในวัฏภาคของเหลวที่เป็นไปตามกฎของราอูลท์

จากกฎของดาลตันสามารถเขียนความสัมพันธ์ในวัฏภาคไอได้ดังนี้

$$P_A = y_A P \quad (2.23)$$

$$P_B = y_B P = (1 - y_A)P \quad (2.24)$$

โดยที่ y_A คือสัดส่วนโมลของสาร A ในวัฏภาคไอ

y_B คือสัดส่วนโมลของสาร B ในวัฏภาคไอ

จากความสัมพันธ์ในสมการ (2.19) (2.20) (2.23) และ (2.24) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y_A P = x_A P_A^0 \tag{2.25}$$

$$y_B P = x_B P_B^0 \tag{2.26}$$

นำมาทำเป็นอัตราส่วนจะได้

$$\left(\frac{y_A/y_B}{x_A/x_B}\right) = \frac{y_A(1-x_A)}{x_A(1-y_A)} = \frac{P_A^0}{P_B^0} = \alpha \tag{2.27}$$

โดยที่ α คือ ค่าคงที่อิสระขององค์ประกอบในระบบ หรือเรียกได้ว่า ค่าการระเหยสัมพัทธ์ ซึ่งสำหรับสารละลายอุดมคติ α จะเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง และสมการ (2.27) สามารถจัดรูปให้ง่ายขึ้นดังนี้

$$y_A = \frac{\alpha\frac{x_A}{1-x_A}}{1+\alpha\frac{x_A}{1-x_A}} \tag{2.28}$$

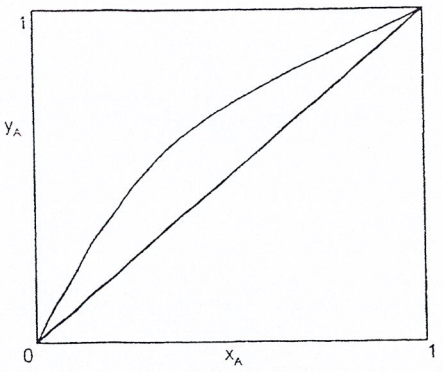
สมการ (2.28) แสดงความสัมพันธ์กันโดยตรงระหว่างสัดส่วนโมลของสาร A ในวัฏภาคของเหลวกับสัดส่วนโมลในวัฏภาคไอ ซึ่งสามารถแสดงในลักษณะของกราฟดังรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.4 และ 2.5 สามารถสร้างได้จากค่าความดันไอของสารบริสุทธิ์ A และ B ณ อุณหภูมิคงที่ที่กำหนดให้

ณ อุณหภูมิคงที่ สมดุลแบบไอโซเทอร์มอลระหว่าง ไอ-ของเหลว เป็นไปตามกฎของราอูลท์ แต่สำหรับระบบที่เป็นไอโซบาร์ริกนั้นสมการ (2.21) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$P = P_A + P_B = x_A P_A^0(T) + (1-x_A) P_B^0(T) \tag{2.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กราฟไอโซเทอร์มอลแสดงความสัมพันธ์กันโดยตรงระหว่างสัดส่วนโมลของสาร A ในวัฏภาคของเหลวกับสัดส่วนโมลในวัฏภาคไอ

การระบุ $P_i^0(T)$ นั้นเป็นการเน้นว่าความดันไอของสารบริสุทธิ์ i ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของวัฏภาคไอ-วัฏภาคของเหลว เป็นไปตามสมการนี้

$$y_A = \frac{\alpha(T)\frac{x_A}{1-x_A}}{1+\alpha(T)\frac{x_A}{1-x_A}} \qquad (2.30)$$

เมื่อ $\alpha(T) = P_A^o(T)/P_B^o(T)$ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ แต่พบว่ามันแปรผันกับอุณหภูมิในช่วงสั้นๆ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาว่าเป็นเสมือนค่าคงที่หนึ่งตลอดช่วงสัดส่วนโมลนั้นๆ ลักษณะของกราฟตามสมการ (2.30) นั้นจะมีแนวโน้มเดียวกันกับกรณีที่เป็นระบบไอโซเทอร์มอลในรูปที่ 2.5

การคำนวณสมดุลสำหรับระบบไอ – ของเหลว

ในการศึกษาระบบซึ่งเป็นโมเดลของสารละลายอุดมคติในทั้งวัฏภาคแก๊สและของเหลวนั้น ระบบส่วนใหญ่เป็นโมเดลสารละลายอุดมคติสำหรับวัฏภาคแก๊สที่มีความดันต่ำถึงปานกลาง แต่ระบบส่วนน้อยเป็นสารละลายอุดมคติสำหรับวัฏภาคของเหลว

ในระบบของเหลวที่ประกอบไปด้วยสารประกอบที่ใกล้เคียงกัน เช่น ไอโซเมอร์หรือพวกอนุกรมโฮโมโลกัส (เช่นไฮโดรคาร์บอนพาราฟิน) พบว่าเป็นไปตามโมเดลของสารละลายของเหลวอุดมคติ ดังนั้นสามารถประยุกต์สารละลายอุดมคติ ใช้กับระบบเกี่ยวกับอุตสาหกรรมปิโตรเลียม แต่สิ่งสำคัญก่อนการศึกษาระบบพวกนี้เราต้องทราบมโนทัศน์สมดุลวัฏภาคอย่างดีก่อนที่จะนำไปสู่การคำนวณอย่างละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ้าวัฏภาคไอและของเหลวอยู่ที่สมดุล ประยุกต์ฟิวกาซิตีได้

$$\hat{f}_i^V = \hat{f}_i^L \tag{2.31}$$

เมื่อโมเดลสารละลายอุดมคติประยุกต์กับแต่ละวัฏภาคจะได้

$$y_i f_i^V = x_i f_i^L \tag{2.32}$$

สำหรับองค์ประกอบใดๆ ฟิวกาซิตี f_i^V และ f_i^L ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน ดังอัตราส่วน

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{f_i^L}{f_i^V} \tag{2.33}$$

K_i เป็นอัตราส่วนสมดุลสำหรับองค์ประกอบหนึ่งและสามารถคำนวณได้ง่ายเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความดัน

ขณะที่มีความเป็นไปได้ในการคำนวณฟิวกาซิตีองค์ประกอบบริสุทธิ์โดยตรง อย่างไรก็ตามที่ความดันต่ำ ฟิวกาซิตีถูกแทนที่ได้โดยเทอมความดันที่เหมาะสม ฟิวกาซิตี f_i^Vของแก๊สบริสุทธิ์กลายเป็นเทอมความดันของระบบ เมื่อทั้ง P และ P^{sat} มีค่าต่ำทำให้ $f^L = f^{sat}$ และ f^{sat} กลายเป็นความดันไอ P^{sat} ดังนั้นที่ความดันต่ำจึงสามารถเขียนสมการที่ (2.33) ได้เป็นสมการ $y_iP = xi\ P^{sat}$ สมการนี้เรียกว่า กฎราอูลท์ กฎนี้สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบสมการที่ (2.34) ได้ดังนี้

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{P_i^{sat}}{P} \tag{2.34}$$

กฎของราอูลท์ มีสมมติฐานดังนี้

1. ระบบอยู่ที่ความดันต่ำสามารถแทนค่าฟิวกาซิตีด้วยความดันไอได้ สำหรับวัฏภาคไอ $\hat{f}_i$ แทนด้วย P ของระบบสำหรับวัฏภาคของเหลว f_i^Lแทนด้วยความดันไอของสารบริสุทธิ์ P_i^{sat} ที่อุณหภูมิของระบบ

2. วัฏภาคไอเป็นสารละลายอุดมคติ (Ideal solution) ดังนั้นสัมประสิทธิ์แอคทิวิตี (Activity coefficient) มีค่าเท่ากับ 1 ($\gamma_i^V = 1$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

119515

3. วัฏภาคของเหลวเป็นสารละลายอุดมคติ (Ideal solution) ดังนั้นสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีมีค่าเท่ากับ 1 ($\gamma_i^L = 1$)

เนื่องจากกฎของราอูลท์มีสมมติฐานสำหรับสารละลายอุดมคติ ดังนั้นเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับสารละลายจริงมากขึ้นจึงได้มีการปรับแก้กฎของราอูลท์ โดยการเพิ่มสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีเข้ามาคูณในส่วนของวัฏภาคของเหลว ดังสมการ

$$y_i P = \gamma_i x_i P_i^{sat} \tag{2.35}$$

2.7 สารละลายจริง [9]

แอคทิวิตีและสัมประสิทธิ์แอคทิวิตี

แอคทิวิตี (Activity) คือพารามิเตอร์ไม่มีหน่วยซึ่งค่าของมันขึ้นกับสถานะมาตรฐาน แอคทิวิตีเป็นประโยชน์ เนื่องจากสามารถเชื่อมโยงกับพารามิเตอร์ของส่วนประกอบ เช่น สัดส่วนโมล ความเข้มข้นหรือความดันย่อย

นิยามแอคทิวิตี คือ อัตราส่วนของฟิวกาซิตีของสารประกอบที่สถานะหนึ่งหารด้วยฟิวกาซิตีที่สถานะอ้างอิง

$$\left[a_i = \frac{\hat{f}_i}{f_i^0}\right]_T \tag{2.36}$$

สัมประสิทธิ์แอคทิวิตีเป็นแฟกเตอร์แก้ไขซึ่งวัดการเบี่ยงเบนของสารละลายจากพฤติกรรมอุดมคติสำหรับสถานะมาตรฐานหนึ่ง นิยามในวิธีการต่างๆเทียบกับพารามิเตอร์ความเข้มข้นแบบต่างๆ

$$\gamma_i = \frac{a_i}{x_i} = \frac{\hat{f}_i}{f_i^0 x_i} \tag{2.37}$$

$$\gamma_i' = \frac{a_i'}{x_i} = \frac{\hat{f}_i'}{f_i^0 x_i} \tag{2.38}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์แอคทิวิตี มักเป็นอัตราส่วนอย่างง่ายของแอคทิวิตีกับพารามิเตอร์ความเข้มข้น เมื่อเทียบกับองค์ประกอบบริสุทธิ์ดังสมการที่ (2.37) เมื่อเทียบกับเศษส่วนโมลที่มีความเจือจางอนันต์ ดังสมการที่ (2.38)

การคำนวณสัมประสิทธิ์แอกทิวิตี

ในระบบของผสมนั้น กฎของราอูลห์สามารถประมาณค่าสัดส่วนขององค์ประกอบในแต่ละวัฏภาคได้ไม่ดีมากนัก แต่สามารถให้การประมาณค่าได้ดีในระบบที่มีองค์ประกอบของของผสมที่คล้ายคลึงกันหรือของผสมที่จัดอยู่ในรูปโฮโมโลกัส เนื่องจากทำให้สามารถสมมติได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แอกทวิตี มีค่าเป็นหนึ่งในทุกสัดส่วนของการผสม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีมีความสำคัญมากในการหาข้อมูลสมดุลในระบบของผสม

- สมการมากูลส์ (Marqules Equation)

สมการมากูลส์ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของของเหลว ซึ่งใช้ได้ดีกับของผสมที่มีขนาดของโมเลกุลหรือปริมาตรโมลาร์ไม่แตกต่างกันมากนัก ในการพิสูจน์เพื่อให้ได้มาซึ่งสมการมากูลส์นั้น จะอาศัยการสมมติว่าขนาดของโมเลกุลแต่ละโมเลกุลที่อยู่ในของผสมนั้นมีขนาดเท่ากัน

สมการมากูลส์ (Marqules Equation)

$$\ln \gamma_1 = x_2^2(A_{12} + 2(A_{21} - A_{12})x_1) \tag{2.39}$$

$$\ln \gamma_2 = x_1^2(A_{21} + 2(A_{12} - A_{21})x_2) \tag{2.40}$$

- สมการแวนลาร์ (Van Laar Equation)

สมการแวนลาร์เป็นสมการที่สามารถนำมาใช้ทำนายสมดุลวัฏภาคได้ดีและสามารถนำมาใช้ทำนายสมดุลได้หลายระบบ ซึ่งสมการแวนลาร์นี้ได้มาจากการพิสูจน์สมการสถานะของแวนเดอร์วาล์วแต่ค่าคงที่ของสมการแวนลาร์นั้นจะได้มาจากการคำนวณซึ่งจะต้องอาศัยข้อมูลสมดุลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นค่าคงที่ของสมการแวนลาร์จะเป็นค่าคงที่เฉพาะสำหรับระบบๆ หนึ่ง ณ อุณหภูมิที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการแวนลาร์เป็นสมการที่นำมาใช้หาค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีได้ดี ไม่ว่าระบบนั้นจะเบี่ยงเบนไปในทางบวกหรือเบี่ยงเบนไปในทางลบจากกฎของราอูลห์ แต่สำหรับระบบที่เกิดอะซีโอโทรปแล้ว พบว่าสมการแวนลาร์ไม่สามารถให้ค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีได้ดีนัก

- สมการวิลสัน (Wilson Equation)

ตาราง 2.1 แสดงตัวอย่างแนวคิดค่าพลังงานอิสระส่วนเกินและค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีสำหรับระบบหลายองค์ประกอบนั้นเป็นสมการที่นิยมใช้กันมาก เพราะสามารถที่จะให้ผลข้อมูลสมดุลสำหรับระบบที่ไม่เป็นอุดมคติอย่างมากได้เป็นอย่างดี เนื่องจากสมการวิลสันได้มาจากแนวคิดที่เกี่ยวกับสัดส่วนองค์ประกอบเฉพาะบริเวณ (Local Composition) โดยมีแนวคิดพื้นฐานที่ว่าโมเลกุลต่างๆ ที่อยู่ในสารละลายจะมีความแตกต่างทั้งขนาดของโมเลกุลและแรงกระทำระหว่างโมเลกุล ทำให้สัดส่วนองค์ประกอบที่อยู่ในบริเวณๆหนึ่งในสารละลายจะแตกต่างไปจากสัดส่วนองค์ประกอบที่อยู่บริเวณอื่นในสารละลายเดียวกัน

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างแนวคิดค่าพลังงานอิสระส่วนเกินและค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของระบบหลายองค์ประกอบ

Name	Molar excess Gibbs energy	Activity coefficient for component i
Wilson	$\frac{g^E}{RT} = -\sum_i^N x_i \ln\left(\sum_j^N x_j \Lambda_{ij}\right)$	$\ln \gamma_i = -\sum_{j=1}^N x_j \ln\left(\sum_{j=1}^N x_j \Lambda_{ij}\right) + 1 - \sum_{k=1}^N \frac{x_k \Lambda_{ki}}{\sum_{j=1}^N x_j \Lambda_{kj}}$
NRTL	$\frac{g^E}{RT} = \sum_i^N x_i \frac{\sum_j^N \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_k G_{ki} x_k}$	$\ln \gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^N \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{k=1}^N G_{ki} x_k} + \sum_{j=1}^N \frac{x_j G_{ij}}{\sum_{k=1}^N G_{kj} x_k}\left(\tau_{ij} - \frac{\sum_{k=1}^N \tau_{kj} G_{kj} x_k}{\sum_{k=1}^N G_{kj} x_k}\right)$
UNIQUAC	$\frac{g^E}{RT} = \sum_i^N x_i \ln \frac{\Phi_i}{x_i} + \frac{z}{2}\sum_i^N q_i x_i \ln \frac{\theta_i}{\Phi_i} - \sum_i^N q_i x_i \ln\left(\sum_j^N \theta_j \tau_{ji}\right)$	$\ln \gamma_i = \ln \frac{\Phi_i}{x_i} + \frac{z}{2} q_i \ln \frac{\theta_i}{\Phi_i} + l_i - \frac{\Phi_i}{x_i}\sum_{j=1}^N x_j l_j - q_i \ln\left(\sum_{j=1}^N \theta_j \tau_{ji}\right) + q_i - q_i \sum_{j=1}^N \frac{\theta_j \tau_{ij}}{\sum_{k=1}^N \theta_k \tau_{kj}}$ where $\Phi_i = \frac{x_i r_i}{\sum_{k=1}^N x_k r_k}$ and $\theta_i = \frac{x_i q_i}{\sum_{k=1}^N x_k q_k}$

ข้อจำกัดของสมการวิลสันโดยทั่วๆไปจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ คือ

1. สมการวิลสันเหมาะสำหรับระบบที่ละลายเข้ากันได้เป็นอย่างดี นั่นคือ ถ้าเป็นระบบของผสมที่ละลายกันได้บางส่วนแล้ว สมการวิลสันจะให้ผลค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีได้ไม่ดี
2. สมการวิลสันไม่เหมาะกับระบบที่เกิดอะซีโอโทรป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่สมการวิลสันมีข้อดีตรงที่มีช่วงอุณหภูมิของการใช้งานกว้าง เมื่อเทียบกับสมการมากูลส์และสมการแวนลาร์ อีกทั้งสามารถนำมาทำนายระบบที่ของผสมประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่มีขั้วได้

- สมการ NRTL (Non Random Two Equation)

สมการ NRTL ได้ถูกพัฒนาโดย Renon และ Prausnitz ซึ่งเป็นสมการที่ได้ขยายแนวคิดต่อจากสมการ Wilson โดยสมการ NRTL จะเหมาะสมกับระบบหลายองค์ประกอบของสมดุลไอ-ของเหลว สมดุลของเหลว-ของเหลว และสมดุลไอของเหลว-ของเหลว

สำหรับระบบหลายองค์ประกอบหลายองค์ประกอบ สมการ NRTL สำหรับใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์แอคทิวิตี แสดงได้ดังนี้

$$\ln \gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^{c} \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{k=1}^{c} G_{ki} x_k} + \sum_{j=1}^{c} \left[\frac{x_j G_{ij}}{\sum_{k=1}^{c} G_{kj} x_k} \left(\tau_{ij} - \frac{\sum_{k=1}^{c} x_k \tau_{kj} G_{kj}}{\sum_{k=1}^{c} G_{kj} x_k} \right) \right] \quad (2.41)$$

โดย $G_{ij} = \exp(-a_{ij}\tau_{ji})$

และค่าสัมประสิทธิ์ τ หาได้โดย

$$\tau_{ij} = \frac{g_{ij} - g_{ii}}{RT} \quad (2.42)$$

$$\tau_{ij} = \frac{g_{ji} - g_{ii}}{RT} \quad (2.43)$$

โดยที่ g_{ij}, g_{ji} คือแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล

จากสมการที่แสดง $G_{ij} \neq G_{ji}$, $\tau_{ij} \neq \tau_{ji}$, $G_{ii} = G_{jj} = 1$ และ $\tau_{ii} = \tau_{jj} = 0$ และโดยส่วนใหญ่แล้วจะพบว่า $g_{ij} - g_{ji}$ จะเป็นค่าคงที่และแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิ สำหรับสารละลายอุดมคติแล้ว $\tau_{ji} = 0$

ตัวแปร a_{ij} เป็นตัวแปรที่แสดงลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลชนิด j กับโมเลกุลชนิด i โดยที่ $a_{ji} = 0$ จะมีความหมายว่า สัดส่วนโมลเฉพาะบริเวณหนึ่งๆนั้นจะเท่ากับสัดส่วนโมลที่อยู่ในสารละลาย ค่า a_{ij} โดยปกติจะเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของโมเลกุล โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2- 0.47 โดยส่วนใหญ่

- สมการยูนิแควก (UNIQUAC Equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abrams และ Prausnitz ได้ใช้วิธีทางสถิติกลศาสตร์ในการวิเคราะห์และแสดงการกระจายพลังงานอิสระกิบส์ เพื่อที่จะหาวิธีคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีในวัฏภาคของเหลว ซึ่งต่อมาได้นำมาสร้างแบบจำลองที่เรียกว่า ยูนิแควก (UNIQUAC: UNIVERSAL QUASI-CHEMICAL) ซึ่งก่อนหน้านี้ Guggenheim ได้แสดงว่าของผสมโมเลกุลต่างๆที่ผสมกันจะมีความแตกต่างทั้งขนาดและรูปร่างของโมเลกุล

ในสมการ Wilson และ NRTL ล้วนแต่ใช้แนวคิดในแบบของสัดส่วนโมลเฉพาะบริเวณหนึ่งๆ ในขณะที่สมการยูนิแควกจะใช้สัดส่วนพื้นที่เฉพาะบริเวณแทน (local area fraction, θ_{ij}) เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายสามารถเปลี่ยนแปลงได้

โดยสัดส่วนพื้นที่เฉพาะบริเวณ (θ_{ij}) สามารถคำนวณได้จากการใช้ข้อมูลของโมเลกุลแต่ละชนิด ซึ่งในโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีตัวแปรที่กำหนดลักษณะของโมเลกุลอยู่ด้วยกัน 2 ตัวแปร โดยจะกำหนดลักษณะทางด้านปริมาตรของโมเลกุล (r: Volume parameter) และพื้นที่ผิวของโมเลกุล (q: Surface parameter) โดยค่าของตัวแปรทั้งสองนี้จะคำนวณมาจากมุมระหว่างพันธะและความยาวของพันธะซึ่งถูกเสนอโดย Abrams , Prausnits , Gmehling และ Onken

สำหรับของผสมหลายองค์ประกอบของของเหลว สมการยูนิแควกได้แสดงการกระจายพลังงานอิสระกิบส์ ดังนี้

$$\frac{g^E}{RT} = \sum_{i=1}^{c} x_i ln\left(\frac{\varphi_i}{x_i}\right) + \frac{z}{2}\sum_{i=1}^{c} q_i x_i ln\left(\frac{\theta_i}{\varphi_i}\right) - \sum_{i=1}^{c} q_i x_i ln\left(\sum_{i=1}^{c} \theta_i \tau_{ij}\right) \qquad (2.44)$$

Combinatorial residual

โดยในเทอมคอมบิเนทอเรียลได้แสดงถึงความแตกต่างทางด้านขนาดและรูปร่างของโมเลกุลแต่ละชนิดที่อยู่ในของผสม ในขณะที่เทอมเรซิดวลจะแสดงถึงแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลแต่ละชนิด

สมการที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีสำหรับวัฏภาคของเหลวของสารแต่ละชนิดในของผสมสามารถคำนวณได้จาก

$$\ln \gamma_i = ln\gamma_i^C + \ln \gamma_i^R \qquad (2.45)$$

Combinatorial residual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\ln \gamma_i^C = ln\frac{\emptyset_i}{x_i} + \frac{z}{2} q_i ln\frac{\theta_i}{\emptyset_i} + l_i - \frac{\emptyset_i}{x_i}\sum_j x_j l_j$

$$\ln \gamma_i^R = q_i \left[1 - ln\left(\sum_j \theta_j \tau_{ji}\right) - \sum_j \frac{\theta_j \tau_{ij}}{\sum_k \theta_k \tau_{kj}}\right]$$

$$l_i = \frac{z}{2}(r_i - q_i) - (r_i - 1), z = 10 \text{ \{ z คือเลขโคออดิเนตแลคทิส \}}$$

$$\theta_i = \frac{q_i x_i}{\sum_j q_j x_j}$$

$$\emptyset_i = \frac{r_i x_i}{\sum_j r_j x_j}$$

$$\tau_{ij} = exp\left(-\frac{u_{ji} - u_{ii}}{RT}\right)$$

เมื่อ x_i = เศษส่วนโมลขององค์ประกอบ i

θ_i = เศษส่วนพื้นที่ขององค์ประกอบ i

$\emptyset_i$ = สัมประสิทธิ์ออสโมติกขององค์ประกอบ i

r_i = ปริมาตรของโมเลกุลในสารบริสุทธิ์ i

q_i = พื้นที่ของโมเลกุลในสารบริสุทธิ์ i

สมดุลไอและของเหลวของสารละลายจริง

สำหรับระบบสมดุลระหว่างของเหลว L และไอ V ฟิวกาซิตีขององค์ประกอบ i เท่ากันในแต่ละวัฏภาค

$$\hat{f}_i^V = \hat{f}_i^L \tag{2.46}$$

จาก

$$a_i = \frac{\hat{f}_i}{f_i^o} \tag{2.47}$$

ดังนั้น

$$a_i^V f_i^{oV} = a_i^L f_i^{oL} \tag{2.48}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปในเทอมของสัมประสิทธิ์แอกทิวิตี จาก

$$\gamma_i = \frac{a_i}{x_i} = \frac{\hat{f}_i}{f_i^o x_i} \tag{2.49}$$

เพราะฉะนั้น

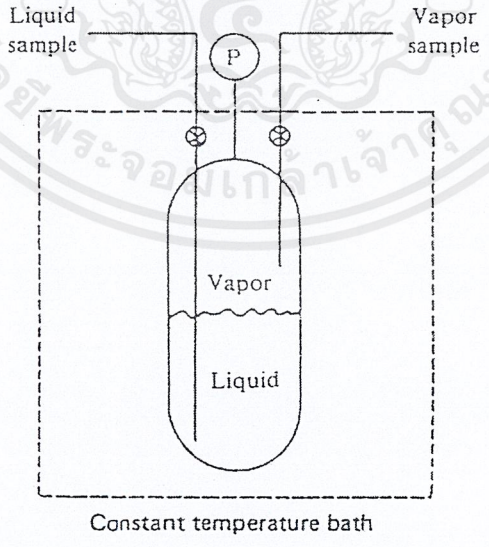
$$\gamma_i^V y_i f_i^{oV} = \gamma_i^L x_i \hat{f}_i^{oL} \tag{2.50}$$

การหาข้อมูลสมดุลไอและของเหลว

ในการหาข้อมูลสมดุลไอและของเหลว จะมีเครื่องมือที่ใช้ได้ 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. เครื่องมือสถิต (Static Apparatus)

หลักการคือ ให้ไอและของเหลวเข้าสู่สมดุล ณ อุณหภูมิที่กำหนดไว้ จากนั้นจะทำการวัดความดันและทำการเก็บตัวอย่างในแต่ละวัฏภาค ซึ่งตัวอย่างที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ส่วนประกอบต่อไป วิธีการนี้มีข้อเสียที่ระบบเข้าสู่สมดุลได้ช้าแต่สามารถเร่งการเกิดสมดุลได้โดยการกวนเชิงกล นอกจากนี้ยังมีความยุ่งยากคือการไล่แก๊สออกจากระบบเพื่อให้การอ่านค่าความดันที่เชื่อถือได้ ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้เหมาะสำหรับในการหาข้อมูลที่อุณหภูมิคงที่ และรูปเครื่องมือสถิตได้แสดงในรูปที่ 2.6

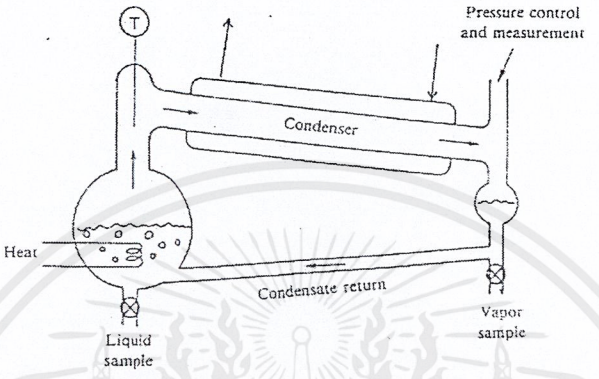


รูปที่ 2.6 เครื่องมือสมดุลไอของเหลวแบบสถิต

2. เครื่องกลั่นแบบไหลเวียน (Recirculating Still)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการคือ ไอที่เกิดจากหม้อต้มโดยการให้ความร้อนจะไหลเข้าสู่คอนเดนเซอร์และจะกลั่นตัวทั้งหมดและจะไหลกลับเข้าสู่หม้อต้มอีกครั้งด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นการไหลเวียนอย่างต่อเนื่องของไอ โดยที่เครื่องกลั่นแบบไหลเวียนนี้สามารถปรับความดันของระบบเพื่อกำหนดภาวะสมดุลได้ จากนั้นจะเก็บตัวอย่างไอและของเหลวเพื่อนำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบและอ่านค่าอุณหภูมิเพื่อบอกอุณหภูมิสมดุลของระบบ



รูปที่ 2.7 เครื่องมือสมดุลไอของเหลวแบบไหลเวียน

สัมประสิทธิ์แอกทิวิตีจากข้อมูลสมดุลไอและของเหลว

จากรูปที่ 2.6 สารละลายไอและของเหลวอยู่ร่วมกัน ณ สภาวะสมดุล โดยที่มีอุณหภูมิและความความดันคงที่ตลอดภาชนะ สารตัวอย่างของวัฏภาคไอและของเหลวจะถูกดึงออกมาเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี และการจากการวิเคราะห์จะให้ค่าการทดลองสำหรับสัดส่วนโมลในวัฏภาคไอ y_i และสัดส่วนโมลในวัฏภาคของเหลว x_i ที่สมดุล สำหรับระบบที่ความดันไม่สูงมากนักคือไม่เกิน 10 atm จะสามารถสมมติว่าวัฏภาคไอเป็นแก๊สอุดมคติ ทำให้สามารถประมาณค่า $\hat{\phi}_i^v \approx 1$, $f_i^{oL} \approx P$ และ $\hat{f}_i^{oL} \approx P^o$

ดังนั้น จากสมการ (2.51) ได้

$$\gamma_i = \frac{y_i P}{x_i P_i^o} \tag{2.51}$$

ซึ่งสมการอย่างง่ายนี้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์คือ การคำนวณอย่างง่ายของสัมประสิทธิ์แอกติวิตีจากข้อมูลการทดลองสมดุลไอของเหลวที่ความดันต่ำคือ $P \leq 10\ atm$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

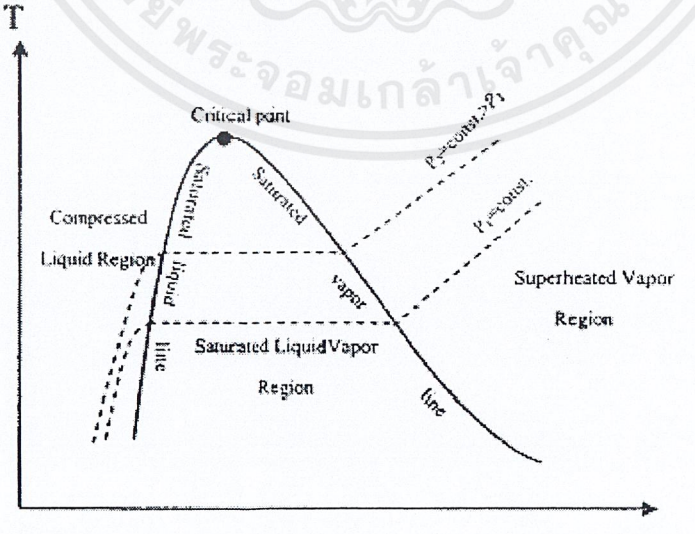
ในกรณีที่สมดุลไอและของเหลวมีความดันสูงกว่า 10 atm ปริมาณโมลาร์ย่อยในกรณีของผสมจะไม่เท่ากับปริมาณโมลาร์ย่อยในกรณีของเหลวบริสุทธิ์ ดังนั้นวิธีที่ใช้ในการคำนวณสมดุลไอของเหลวที่ความดันสูงอยู่ 3 วิธี ได้แก่

1. การใช้สมการสถานะ
2. การใช้สัมประสิทธิ์แอกติวิตี
3. วิธีการใช้ค่า K

2.8 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับของไหลเหนือวิกฤต [11]

ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical fluid) เริ่มได้รับความสนใจเมื่อ Baron Cagniard De La Tour ค้นพบจุดวิกฤต (Critical point) ของสารประกอบ โดยที่จุดวิกฤตนี้สารที่มีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัวจะมีสมบัติเหมือนกัน สำหรับสารต่างชนิดกันจะมีสภาวะที่จุดวิกฤตแตกต่างกันออกไป

เมื่อให้ความร้อนแก่สารที่ความดันเหนือจุดวิกฤต จะไม่พบการเปลี่ยนสถานะโดยจะสังเกตเห็นได้แต่เพียงว่าปริมาตรจำเพาะของสารจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และตลอดกระบวนการสารจะมีเพียงสถานะเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าสารนั้นมีสมบัติเป็นของเหลวหรือไอ และมักจะเรียกสารที่มีความดันสูงกว่าความดันที่จุดวิกฤตว่าเป็นของไหลเหนือวิกฤต



รูปที่ 2.8 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ แสดงบริเวณสถานะและ กระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 พบว่าเมื่อเชื่อมสภาวะของของเหลวอิ่มตัวที่ระดับความดันต่างๆเข้าด้วยกัน จะได้เส้นที่เรียกว่า เส้นของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid line) เช่นเดียวกัน เมื่อทำการเชื่อมสภาวะของไออิ่มตัวที่ระดับความดันต่างๆเข้าด้วยกันจะได้เส้นที่เรียกว่า เส้นไออิ่มตัว (Saturated vapor line) ซึ่งเส้นของสารอิ่มตัวทั้งสองจะมาบรรจบกันที่จุดวิกฤต ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งด้านซ้ายของเส้นของเหลวอิ่มตัวเป็นบริเวณที่แสดงสภาวะของสารที่มีสถานะเป็นของเหลวอัด (Compressed liquid region) ด้านขวาของเส้นไออิ่มตัวเป็นบริเวณของไอร้อนยิ่งยวด (Superheated vapor region) ส่วนบริเวณที่อยู่ภายในโดมเป็นบริเวณของผสมของของเหลว-ไออิ่มตัว (Saturated liquid-vapor mixture region)

สำหรับของไหลเหนือวิกฤตในปริญญานิพนธ์นี้คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งมีจุดวิกฤต คือ ความดันวิกฤต 7.4 MPa และอุณหภูมิวิกฤต 31.1 °C

ตารางที่ 2.2 สมบัติของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ

	แก๊ส	ของไหลเหนือวิกฤต	ของเหลว
อุณหภูมิ (^{o}C)	15-30	32	15-30
ความดัน (MPa)	0.1	28.0	0.1
ความหนาแน่น (g/ cm^{3})	0.0006-0.0002	0.4-0.9	0.6-1.6
ความหนืด (μ Pa.s)	10-30	30-90	200-300
สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^{2}/sec)	0.1-0.4	0.2	(0.2-2) x 10^{-5}

จากตารางที่ 2.2 พบว่าของไหลเหนือวิกฤต มีสมบัติบางประการอยู่ระหว่างสถานะของเหลวและแก๊ส เมื่อพิจารณาสมบัติของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 32 °C และความดัน 28 MPa พบว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความหนาแน่นที่สูงใกล้เคียงกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสภาวะของเหลว ดังนั้นจึงทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตมีความสามารถในการละลาย หรือการสกัดตัวทำละลายของเหลวทั่วไปสูง และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตยังมีความหนืดที่ต่ำใกล้เคียงกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส จึงทำให้มีความสามารถในการแพร่หรือการถ่ายเทมวลที่รวดเร็วในลักษณะของแก๊สทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณสมบัติต่างๆของของไหลเหนือวิกฤตที่กล่าวมา ทำให้มีการนำเอาของไหลเหนือวิกฤตมาประยุกต์ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและในงานวิจัยต่างๆ เช่น การสกัดเอาสารสำคัญออกจากพืชด้วยเทคนิคการสกัดด้วยของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical fluid extraction, SFE) ซึ่งสามารถสกัดเอาสารสำคัญออกมาได้ง่าย และมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากกว่าการสกัดโดยการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ เนื่องจากไม่สามารถแยกเอาตัวทำละลายอินทรีย์ออกมาได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้มีตัวทำละลายอินทรีย์ตกค้างอยู่ นอกจากนั้นยังได้นำเอาของไหลเหนือวิกฤตมาใช้ในการวิเคราะห์สารด้วยวิธีการทางโครมาโทรกราฟี (Supercritical fluid chromatography, SFC)

2.9 ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity) [12]

ในการศึกษาเกี่ยวกับของไหลเหนือวิกฤตในโครงงานนี้ได้มีการศึกษาถึงความจุความร้อนของของผสมของของไหลเหนือวิกฤตซึ่งความจุความร้อนคือ พลังงานความร้อนที่จำเป็นต่อการทำให้สสารมีอุณหภูมิสูงขึ้นส่วนค่าความจุความร้อนจำพาะ (Specific heat capacity) นั้นจะระบุต่อหน่วยปริมาณด้วย จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอโมไดนามิกส์จะเห็นได้ว่า ระบบจะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนหรืองาน ดังนั้นค่าความจุความร้อนจึงระบุได้สองแบบคือ

ค่าความจุความร้อนจำเพาะกรณีปริมาตรคงที่ (Specific heat capacity at constant volume, C_v)

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับระบบปิด

$$dU = \delta Q + \delta W \tag{2.52}$$

ภายใต้สภาวะปริมาตรคงที่ (dV = 0)

$$dU = \delta Q = mCdT \tag{2.53}$$

$$CdT = \frac{dU}{m} = dU \tag{2.54}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่าความจุความร้อนจำเพาะกรณีปริมาตรสารคงที่

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \tag{2.55}$$

ค่าความจุความร้อนจำเพาะกรณีความดันคงที่ (Specific heat capacity at constant pressure, C_p)

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ สำหรับระบบปิด

$$dU = \delta Q + \delta W \tag{2.56}$$

เนื่องจาก $$\delta W = -(PdV + VdP) \tag{2.57}$$

ดังนั้น $$\delta Q = d(U + PV) = dH \tag{2.58}$$

และ $$dH = mC_p dT \quad \text{หรือ} \quad dH = C_p dT \tag{2.59}$$

ดังนั้น ค่าความจุความร้อนจำเพาะกรณีความดันของสสารคงที่คือ

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \tag{2.60}$$

เนื่องจาก C_P เป็นฟังก์ชันของทั้งอุณหภูมิ (T) และความดัน (P) ดังนั้นที่ความดันคงที่ค่าหนึ่ง C_P จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ (T) โดยเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์อย่างง่ายได้เป็น

$$\frac{C_P}{R} = a + bT + cT^2 + DT^{-2} \tag{2.61}$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ a b และ c นั้นเป็นค่าเฉพาะของสสารต่างๆซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปดังตารางที่2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้แทนค่าเพื่อหาค่าความจุความร้อนของเฮกเซนและแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [10]

Chemical Species	T_{max}	$\frac{C_p}{R}$	A	10^3B	10^6C	10^{-5}D
n-hexane	1500	17.550	3.025	53.722	-16.791	
Carbon dioxide	2000	4.467	5.457	1.045	.....	-1.157

2.10 การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีกรณีความดันคงที่ (Enthalpy change under constant pressure) [11]

เอนทาลปีเป็นที่ขึ้นกับทั้งอุณหภูมิ (T) และความดัน (P) โดยเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ได้เป็น

$$dH = C_p dT + \left[V(1 - T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right] dP \tag{2.62}$$

แต่หากการเปลี่ยแปลงที่เราสนใจนั้นเกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดัน(P) คงที่ ส่วนของ ΔH ที่เกิดจาก dP นั้นจะเท่ากับศูนย์

2.10.1 กรณีอุณหภูมิอยู่ในช่วงของเฟสเดียวกัน

จาก
$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \tag{2.63}$$

ดังนั้น
$$\Delta H = \int_{T_i}^{T} C_p dT \tag{2.64}$$

$$H - H_i = \int_{T_i}^{T} C_p dT \tag{2.65}$$

และสมการรูปทั่วไปของ C_p สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_p = a + bT + cT^{-2} \tag{2.66}$$

และดังนั้น

$$\Delta H = H - H_i = \int_{T_i}^{T} (a + bT + cT^{-2}) dT \tag{2.67}$$

$$\Delta H = aT|_{T_i}^{T} + \frac{b}{2}T^2\Big|_{T_i}^{T} + cT^{-1}|_{T_i}^{T} \tag{2.68}$$

เขียนได้เป็น

$$\Delta H = a(T - T_i) + \frac{b}{2}(T^2 - T_i^2) - c\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_i}\right) \tag{2.69}$$

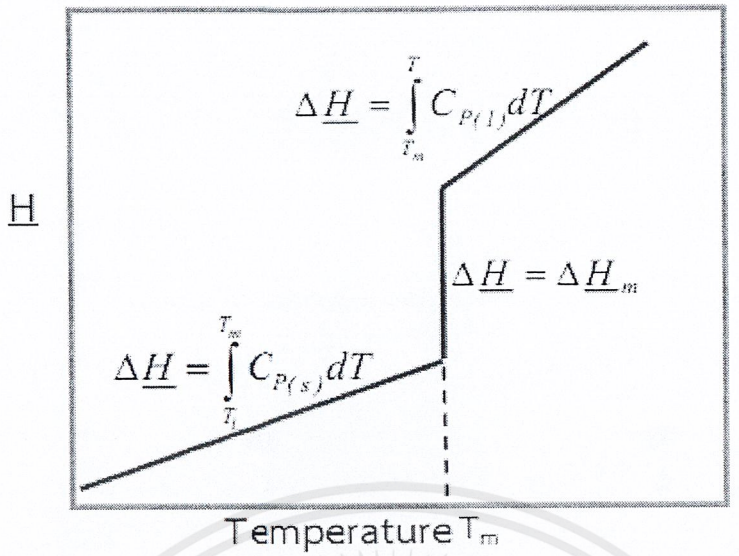
2.10.2 กรณีอุณหภูมิครอบคลุมช่วงของการเปลี่ยนวัฏภาค

ในช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสจะมีการดูดหรือคายความร้อนของวัสดุ ดังนั้นหากวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาและสร้างเป็นเส้นกราฟ ก็จะพบว่าความชันของเส้นกราฟจะเปลี่ยนไปจากช่วงที่ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.9 การคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีภายใต้ความดันคงที่ซึ่งครอบคลุมช่วงที่มีการเปลี่ยนเฟสจึงต้องนำค่าความร้อนแฝง (enthalpy of transformation หรือ latent heat of transformation, L) มาคิดร่วมด้วย เขียนในรูปสมการทั่วไปได้เป็น

$$H - H_i = \int_{T_i}^{T_C} C_p^{\alpha} dT + \Delta H_{T_C}^{\alpha/\beta} + \int_{T_C}^{T} C_p^{\beta} dT \tag{2.70}$$

เมื่อช่วงอุณหภูมิครอบคลุมอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟส (Critical temperature, T_C) จาก α ไปเป็น β

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีตามอุณหภูมิและเอนทาลปีของการหลอมเหลว หรือเรียกอีกอย่างว่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว

2.11 การนำโฟมพอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้งาน [13]

1. ฉนวนกันความร้อน สำหรับโฟมพอลิเมอร์ ที่มีความหนาแน่นต่ำ จะมีการนำความร้อน (Thermal conductivity) ประมาณ 10^{-2} W/m K โฟมพอลิเมอร์ประเภทนี้อาทิเช่นพอลิยูริเทนโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำ มีความคงตัวและเป็นเซลล์ปิด ซึ่งใช้ CFC-11 เป็นสารเกิดโฟมเนื่องจาก CFC-11 มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสารเกิดฟองตัวอื่นๆ ที่สามารถใช้ได้ ฉนวนกันความร้อนสามารถนำไปใช้ได้กับวัสดุ ทุกประเภท โดยจะใช้ได้ทั้งเป็นตัวกักเก็บความร้อน ตัวกักเก็บความเย็น หรือใช้ป้องกันการแข็งตัว ซึ่งฉนวนกันความร้อนนี้เป็นสิ่งที่เกิดจากการนำเอาโฟมพอลิเมอร์ มาใช้งานมากที่สุดโดยจะใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมการขนส่ง ตัวเรือนของเครื่องจักร และตู้เก็บอาหารและเครื่องดื่ม

โฟมพอลิเมอร์ที่มีความคงตัวและเป็นเซลล์ปิดจะเหมาะสำหรับทำฉนวนกันความร้อน เพราะว่ามีค่าการนำความร้อนต่ำ นอกจากนี้ยังดูดซึมความชื้นต่ำ ซึ่งโฟมพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาทำฉนวนกันความร้อน ได้แก่ พอลิสไตรีนโฟม พอลิยูรีเทนโฟม

2. วัสดุบรรจุภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ดีต้องสามารถดูดซับพลังงานของแรงกระแทกหรือแรงที่เกิดจากการลดความเร็ว โดยจำกัดการส่งผ่านความเครียดไปยังผลิตภัณฑ์ ซึ่งโฟมพอลิเมอร์ที่มีฟองขนาดเล็ก (Cellular Polymer) เป็นต้นแบบของวัสดุบรรจุภัณฑ์เพราะว่าสามารถดูดซับพลังงานของแรงกระแทกและทำให้พลังงานของแรงกระแทกสลายไป

สิ่งที่ต้องพิจารณาในการปรับปรุงแก้ไขโฟมพอลิเมอร์ได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ โครงสร้างของเซลล์ ความหนาแน่น ความหนาและพื้นที่ของตัวป้องกันแรงกระแทก ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟมพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาทำวัสดุบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ พอลิสไตรีนโฟม พอลิเอททิลีนโฟม และพอลิยูรีเทนโฟม

3. Cushioning คือโฟมพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่นได้ จะมีบทบาทที่สำคัญในเรื่องนี้ คุณสมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยเซลล์ในโครงสร้างนี้คือ พฤติกรรมการเบี่ยงเบนไปจากการบีบอัดตัวที่เหมาะสม ความยืดหยุ่นสูง การคงตัวต่อการบีบอัดตัวต่ำ ความต้านทานแรงดึงดี และการยืดตัวดี โดยการที่พฤติกรรมการบีบอักตัวของโฟมพอลิเมอร์ ที่ยืดหยุ่นได้มีช่วงกว้างนี้ ถือว่าเป็นหนึ่งในข้อดีที่สำคัญมาก โดยสมบัติเหล่านี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ให้ตรงกับความต้องการ ซึ่งโดยส่วนมากจะนำไปใช้ทำพวกเครื่องบุรองของรถยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ที่นั่ง พื้น พรม ที่ค้ำของนักกีฬา ซึ่งในหลายกรณีนี้จะเกี่ยวข้องกับการดูดซึมพลังงานด้วย

4. ความสามารถในการลอยตัว โฟมพอลิเมอร์ที่โครงสร้างแบบเซลล์ปิดถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมทางน้ำ เช่น ทุ่นลอย เรือช่วยพยุง โดยความสามารถในการลอยตัวนี้จะถูกเก็บไว้ จนเมื่อถูกทำลายไปมาก แต่จะไม่ทำให้เสื่อมสภาพ ขึ้นสนิม หรือกัดกร่อน สำหรับคุณสมบัติอื่นๆสำหรับการใช้โฟมพอลิเมอร์ที่สำคัญคือ ต้านทานความชื้นดี และความหนาแน่นที่ต่ำ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย พอลิยูรีเทน พีวีซี พอลิสไตรีน และพอลิโอเลฟินต่างๆ

5. วัสดุดูดซับเสียงและฉนวนกันเสียง โฟมพอลิเมอร์ ที่มีโครงสร้างแบบเซลล์เปิดและเซลล์ปิด ใช้สำหรับดูดซับเสียงและเป็นฉนวนกันเสียง สำหรับพอลิยูรีเทนโฟมที่มีโครงสร้างเป็นเซลล์เปิด ใช้สำหรับดูดซับเสียงตามผนังและเพดานเพื่อป้องกันเสียงก้องและเสียงสะท้อน พื้นที่ผิวสามารถเพิ่มได้โดยการใช้พื้นผิวที่ซับซ้อนเพื่อดูดซับเสียงได้ทุกทิศ แต่โฟมพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเซลล์เปิดไม่มีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันเสียง แต่เป็นโฟมพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิดเช่น พอลิสไตรีนโฟม พอลิเอททีลีนโฟม พอลิยูรีเทนโฟม เป็นต้น ที่ใช้เป็นฉนวนกันเสียงตามผนัง พื้นและเพดาน

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhihua Guo และคณะ [14] ศึกษาการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในพอลิสไตรีน นาโนคอมโพสิท (Polystyrene composites) และนาโนคอมโพสิทโฟม (Nanocomposite foam) โดยจะใช้เครื่อง PER-MATRAN-C Model 4/41 ในการวัดค่าการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวสำหรับพอลิสไตรีน (PS) และพอลิสไตรีนนาโนคอมโพสิท โดยทำการวัดที่ความดัน 0.01 MPa และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ค่า จากการศึกษาจะพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า ขนาดของฟองที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่า ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient) ของโฟมจะสูงกว่าใน Plates สำหรับพอลิสไตรีนนาโนคอมโพสิทที่ใช้คือ PS+5%20A (จาก nanoclay), PS+5% CNFS (Carbon nanofibers) และ PS+5% MHAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(nanoclay ที่ถูก treated ด้วย 2-methacryloyloxyethylhexadecyldimethylammonium bromide) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient) จะลดลงเมื่อมีการเพิ่ม nanoparticle ลงไปใน Plate และโฟม สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของนาโนคอมโพสิทโฟมนั้นจะขึ้นกับโครงสร้างของโฟมมากกว่า nanoparticle ที่ใส่ลงไป

Hani E. Naguibc และคณะ [15] ศึกษาการประพฤติตัวทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน (PP) ที่เป็นโซ่ตรงและโซ่กิ่งกับสารเติมแต่งซึ่งถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง DSC (Differential scanning calorimeter) ที่ความดันปกติและความดันสูง โดยเฉพาะผลของโซ่กิ่ง การกระจายตัวของสารเติมแต่ง อัตราการเย็นตัว (Cooling rates) และการละลายของสารทำให้เกิดฟองกับอุณหภูมิการตกผลึกของพอลิโพรพิลีนโซ่กิ่งระหว่างสายพอลิเมอร์สามารถเพิ่มอุณหภูมิการตกผลึกของพอลิโพรพิลีน รวมถึงตัวอัตราการเย็นตัวก็เป็นตัวแปรที่สำคัญระหว่างกระบวนการตกผลึกเช่นกัน ผลของการทดลองพบว่าอุณหภูมิการตกผลึกเพิ่มขึ้นถึง 30 °C โดยพอลิโพรพิลีนที่เป็นโซ่กิ่ง ทั้งที่ใส่ตัวสารเติมแต่งและไม่ใส่ลงในพอลิโพรพิลีนอุณหภูมิการตกผลึกจะลดลงเมื่อมีของไหลเหนือวิกฤต เช่น ไนโตรเจนหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในพอลิโพรพิลีนที่เป็นโซ่กิ่ง ผลของ hydraulic pressure ศึกษาโดยใช้ฮีเลียม (He) ซึ่งมีขีดจำกัดการละลายกับพอลิเมอร์อย่างมาก

Ming-Tsai และคณะ [16] ศึกษาถึงการผลิตโฟมของ PET (Polyethylene terephthalate) และ PC (Polycarbonate) ด้วยวิธีการลดความดันของระบบอย่างรวดเร็ว ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิและความดันในการเกิดโฟมของ PET และ PC มีค่าใกล้เคียงกันและค่าสัดส่วนการขยายตัว (Expansion ratio) ของโฟมที่ได้โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าน้อยกว่า 10 เสมอ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและความดันที่ส่งผลต่อการเกิดนิวเคลียสและผลของของอัตราการลดความดัน (Depressurization rate) และการเปลี่ยนวิธีการลดความดันของโฟม ซึ่งพบว่า ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเกิดนิวเคลียสเป็นผลมาจากการแข่งกันระหว่างผลของความหนืดและผลของความสามารถในการละลายของเรซิ่นและจากการศึกษาสังเกตถึงลักษณะโครงสร้างสามารถสรุปได้ว่า กระบวนการผลิตโฟมถูกควบคุมโดย nucleation kinetics

Ying-Hsiao Li และคณะ [17] ศึกษาถึงสมดุลไอของเหลวของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซน (C_6H_{14}) โดยวัดองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนที่อุณหภูมิ 40 80 และ 120 °C ซึ่งแต่ละอุณหภูมิจะใช้ช่วงความดันตั้งแต่ 6.8 บรรยากาศ จนถึงความดันที่ใกล้เคียงกับความดันวิกฤตทำให้สามารถคำนวณค่า K-value ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนได้ โดยข้อมูลจากปริญญานิพนธ์นี้ใช้สมการสภาวะของ Soave ในการคำนวณองค์ประกอบ ซึ่งพารามิเตอร์ C_{12} ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.131และค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการทำนายองค์ประกอบที่อุณหภูมิและความดันคงที่มีค่าเท่ากับ 0.012 และ 0.009 สำหรับของเหลวและไอตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทดลอง

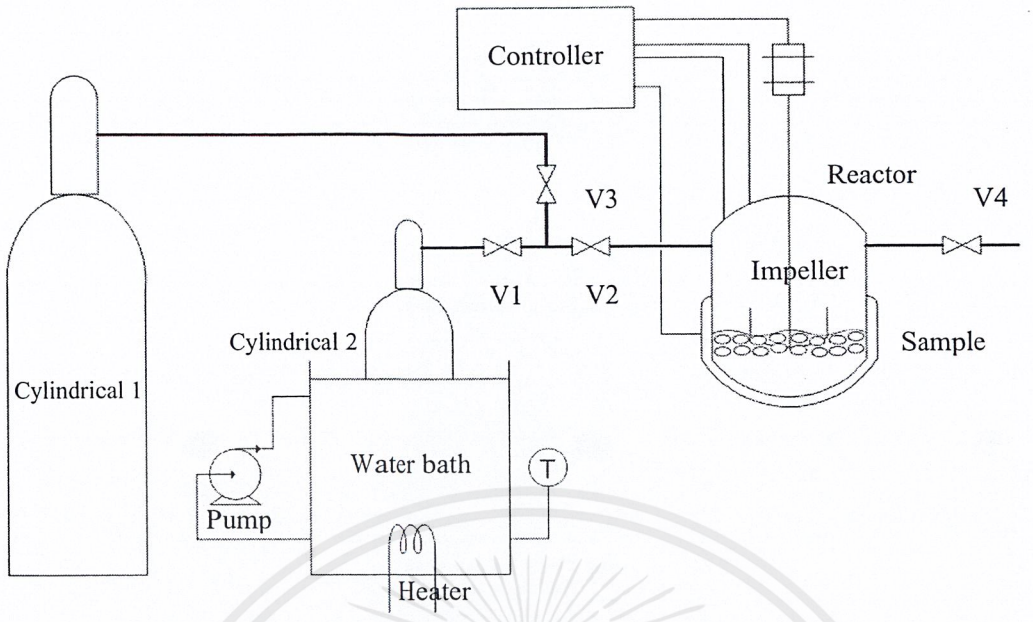
3.1 การทดลองการผลิตเม็ดโฟมพอลิเมอร์แบบกะโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการบดและไม่ผ่านการบดและวิเคราะห์ผล %Deposited material และค่าสัดส่วนการขยายตัว

3.1.1 การผลิตเม็ดโฟมพอลิเมอร์แบบกะโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการบด

- อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
  1. เครื่องปฏิกรณ์ผลิตเม็ดโฟมแบบกะ ขนาด 4 L
  2. ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
  3. ปั๊ม
  4. วาล์ว
  5. เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater)
  6. เครื่องวัดอุณหภูมิและความดัน
- สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา
  1. เม็ดพอลิโพรพิลีน (0.9 g/ml) ขนาด 3-4 mm
  2. น้ำ
  3. สารเติมแต่ง (สารเกิดนิวเคลียส, สาร Foam stabilization, สาร Anti-fusing, สารลดแรงตึงผิว)
  4. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.95%

บรรจุเม็ดพลาสติกและน้ำด้วยอัตราส่วนผสม 1:9 โดยน้ำหนัก พร้อมกับสารเกิดนิวเคลียส สาร Foam stabilization สาร Anti-fusing และสารลดแรงตึงผิวลงในเครื่องปฏิกรณ์ ดังรูปที่ 3.1 หลังจากนั้นทำการผสมให้เข้ากัน และทำการทดลองการผลิตเม็ดโฟมพอลิเมอร์แบบกะที่อุณหภูมิ 120 °C โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟองทางกายภาพ เมื่อได้เม็ดโฟมพอลิเมอร์แล้วจึงนำไปอบและนำไปวิเคราะห์เพื่อหา %Deposited material และสัดส่วนการขยายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพจำลองกระบวนการเกิดโฟมแบบกะ

3.1.2 การผลิตเม็ดโฟมพอลิเมอร์โดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการบดด้วยเทคนิค Ball mill

1. ชั่งน้ำหนักสารเกิดนิวเคลียส สาร Foam stabilization สาร Anti-fusing และสารลดแรงตึงผิว
2. เตรียมลูกบดโดยใช้จำนวน 50% ของปริมาตรหม้อบด ในที่นี้ใช้ลูกบดจำนวน 108 ลูก
3. เตรียมน้ำ 30% ของปริมาตรหม้อบด ซึ่งในที่นี้คือ 678 ml
4. ใส่ส่วนผสมจากข้อ 1 2 และ 3 ลงในหม้อบด แล้วบดเป็นเวลา 20 นาที ความเร็วรอบ 90 rpm
5. จากนั้นนำสารที่ได้ไปผสมน้ำให้ได้อัตราส่วนเม็ดพลาสติกต่อน้ำด้วยสัดส่วน 1:9 โดยน้ำหนัก
6. ทำการทดลองซ้ำในตอนที่ 3.1.1

3.1.3 การวิเคราะห์เพื่อหา %Deposited material และสัดส่วนการขยายตัว

- %Deposited material (%DM)

1. นำเม็ดโฟมที่ได้จากการอบมาทำการชั่งน้ำหนักเม็ดโฟม (m_1) แล้วนำไปล้างด้วยสารละลายอะซีโตน (Acetone)
2. นำไปอบไล่อะซีโตน ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. เมื่อผ่านเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง นำเม็ดโฟมที่ผ่านการอบนำมาชั่ง (m_2) และคำนวณหาค่า %DM ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\%DM = \frac{(m_2 - m_1) \times 100}{m_2} \quad (1)$$

- สัดส่วนการขยายตัว

$$\text{Expansion Ratio} = \frac{\rho_{polymer}}{\rho_{foam}} \quad (2)$$

โดยที่ $\rho_{Polymer} \approx 0.90\ g/cm^3$ โดยในการหา ρ_{foam} จะได้ดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักเม็ดโฟมหลังจากที่ล้างด้วยอะซีโตนแล้ว (m_s) และชั่งน้ำหนักพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) (m_0)

2. นำเม็ดโฟมที่ชั่งแล้วมาใส่ในขวดพิคโนมิเตอร์พร้อมชั่งน้ำหนัก (m_s+m_o)

3. นำขวดพิคโนมิเตอร์ที่มีเม็ดโฟมอยู่ภายในขวด จากข้อ 2 มาเติมน้ำแล้วชั่งน้ำหนักจะได้มวลรวม ($m_s+m_o+m_{H2O}$)

4. จากนั้นหาน้ำหนักของน้ำโดยนำน้ำหนักที่ได้จากข้อ 2 ลบออกจากข้อ 3 จะได้น้ำหนักของน้ำ (m_{H2O})

5. นำน้ำใส่ลงในขวดพิคโนมิเตอร์พร้อมชั่งน้ำหนัก แล้วนำน้ำหนักที่ได้ลบด้วย m_0 ได้น้ำหนักของน้ำ ($m_{H2O,\ p}$) จากนั้นนำไปหารด้วยปริมาตรพิคโนมิเตอร์ได้ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_{H2O})

6. หาปริมาตรน้ำได้จาก $\frac{m_{H2O}}{\rho_{H2O}}$

7. หาปริมาตรของเม็ดโฟมจาก $v_s = V_{Pycnometer} - V_{H_2O}$

8. หา ρ_{Foam} ได้จาก $\rho_{Foam} = \frac{m_s}{v_s}$

3.2 การ Visualization

3.2.1 การ Visualization เพื่อศึกษาตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของสารต่างๆในถังปฏิกรณ์

- อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. กระบอกอะครีลิค
2. เครื่องทำโฟม
3. กล้องวิดีโอและขาตั้งกล้องวิดีโอ
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. กระบอกตวง
6. แท่งแก้วคนสาร 1 อัน

- วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เม็ดพอลิโพรพิลีน (0.9 g/ml) 50 g

2. เฮกเซน AR. GRADE 99 % 100 ml

3. น้ำ 1350 g

4. สี 2 g

- วิธีการทดลอง

1. ผสมน้ำ 1350 g กับเม็ดพอลิโพรพิลีน 50 g ในกระบอกอะครีลิค

2. ใส่เฮกเซน 100 g และสีลงในกระบอกอะครีลิค

3. ทำการปั่นกวนจนระบบเริ่มเข้าสู่สมดุล

4. วิเคราะห์ผล

3.2.2 การ Visualization เพื่อศึกษาการเป็นของไหลเหนือวิกฤตของระบบเฮกเซน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1.เครื่องปฏิกรณ์ความดันปริมาตรขนาด 0.125 cm^3

2.วาล์วและหัวปรับแรงดัน (Regulator)

3.ปั๊มอัดแรงดัน (รุ่น Syringe Pump Isco Model 260D)

4. เทอร์โมคัพเปิล และ ชุดควบคุมอุณหภูมิ

5. ชุดบันทึกอุณหภูมิ (Datalocker)

- สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.95 %

2. เฮกเซน AR. GRADE 99 %

3. น้ำ

- วิธีการทดลอง

1. เตรียมเฮกเซนปริมาตร 0.1 ml และน้ำปริมาตร 0.1 ml ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ แล้วบันทึกผลด้วยภาพถ่ายและวีดีโอโดยใช้กล้องดิจิตอล ที่ความดัน 1200 psi และอุณหภูมิ 40 °C

2. นำภาพและวีดีโอที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

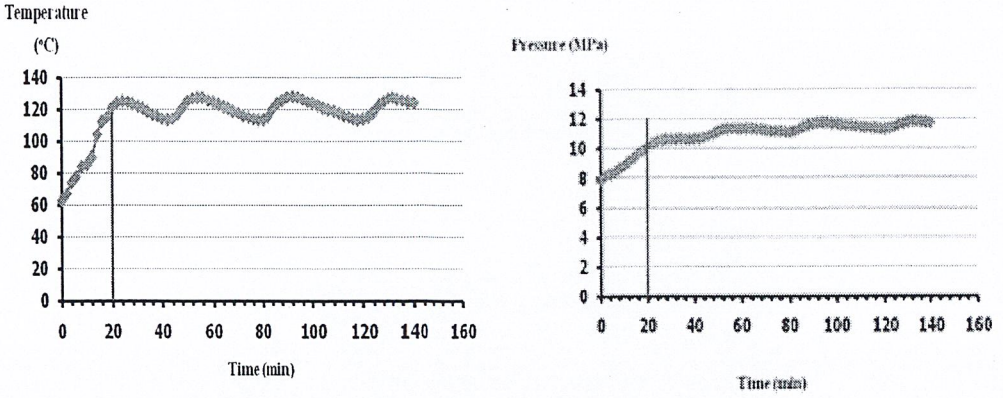
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 วิเคราะห์ผล %Deposited material และสัดส่วนการขยายตัว ของเม็ดโฟมที่เกิดจากกระบวนการ เกิดโฟมโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการบดและไม่ผ่านการบด

ในกระบวนการผลิตโฟมได้มีการใช้สารเติมแต่งต่างๆ เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตโฟมดีขึ้น เช่น เพื่อให้เม็ดพอลิโพรพิลีนไม่เกิดการเกาะติดกันและช่วยให้โฟมที่เกิดขึ้นมีความเสถียร โดยปริมาณของสารเติมแต่งที่เหลือติดอยู่บนเม็ดโฟมที่ผลิตจะสร้างความยุ่งยากในกระบวนการทำความสะอาดเม็ดโฟมก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โฟมต่อไป ซึ่งปริมาณของสารเติมแต่งที่เหลือติดอยู่บนเม็ดโฟมนี้จะแสดงอยู่ในรูป %Deposited Material โดยสารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิตโฟมนี้เป็นอนุภาคของแข็งดังนั้นจึงสนใจที่จะศึกษาผลของการลดขนาดของอนุภาคของสารเติมแต่งที่มีต่อ %Deposited Material และเนื่องจากช่วงอุณหภูมิและความดันในกระบวนการผลิตโฟมแบบกะนั้นมีค่าค่อนข้างแคบและส่งผลต่อสันฐานวิทยาของโฟม (Foam morphology) ที่ผลิตได้ เช่น ขนาดเซลล์ ความหนาแน่นเซลล์ การกระจายตัวของขนาดเซลล์ ความเป็นระเบียบของเซลล์ เป็นต้น

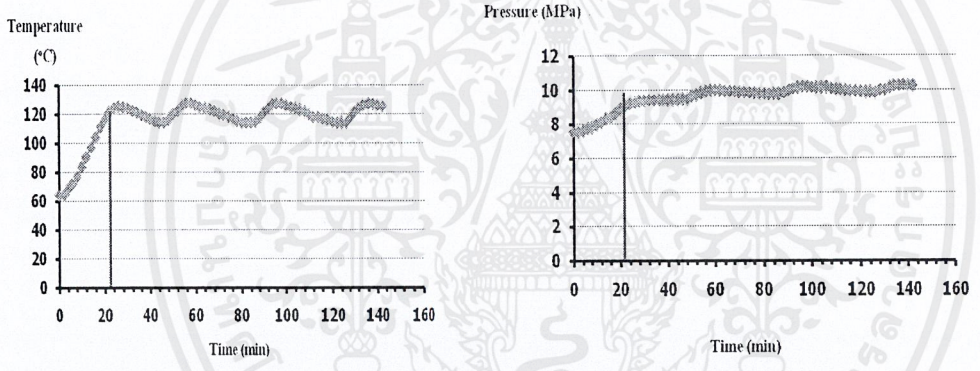
ดังนั้นจึงสนใจที่จะศึกษารูปแบบของอุณหภูมิและความดันที่เวลาต่างๆซึ่งในการผลิตโฟมแบบกะได้มีการใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.1ก.) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของกระบวนการผลิตโฟมโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการบดซึ่งจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิของระบบมีช่วงการแกว่งอยู่ระหว่าง 110°C ถึง 130°C โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 120°C ทั้งนี้การแกว่งของอุณหภูมิของระบบเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิคือเทอร์โมคัปเปิลเกิดการดีเลย์ของอุปกรณ์ทำให้อ่านค่าของอุณหภูมิช้ากว่าความเป็นจริง ซึ่งที่อุณหภูมิ 130°C ที่อ่านได้นั้น อุณหภูมิ ณ จุดที่เม็ดพอลิโพรพิลีนอยู่จริงอาจจะมีค่าใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของเม็ดพอลิโพรพิลีนคือ 136°C จึงอาจทำให้เม็ดพอลิโพรพิลีนเกิดการหลอมมากเกินไปส่งผลให้โฟมที่ผลิตได้นั้นมีคุณสมบัติไม่ดี ส่วนที่อุณหภูมิ 110°C ก็อาจส่งผลให้เม็ดพอลิโพรพิลีนมีความอ่อนตัวไม่เพียงพอต่อการเกิดโฟม และในทำนองเดียวกันการที่อุณหภูมิของระบบมีการแกว่งจะส่งผลให้ค่าความดันมีการแกว่งตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.1ข.) โดยรูปแบบของอุณหภูมิและความดันที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการผลิตโฟมโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการบดแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่ามีลักษณะเดียวกันกับกระบวนการเกิดโฟมโดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) Temperature Profile ข.) Pressure Profile

รูปที่ 4.1 รูปแบบของอุณหภูมิและความดันที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการเกิดโฟม โดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการบด



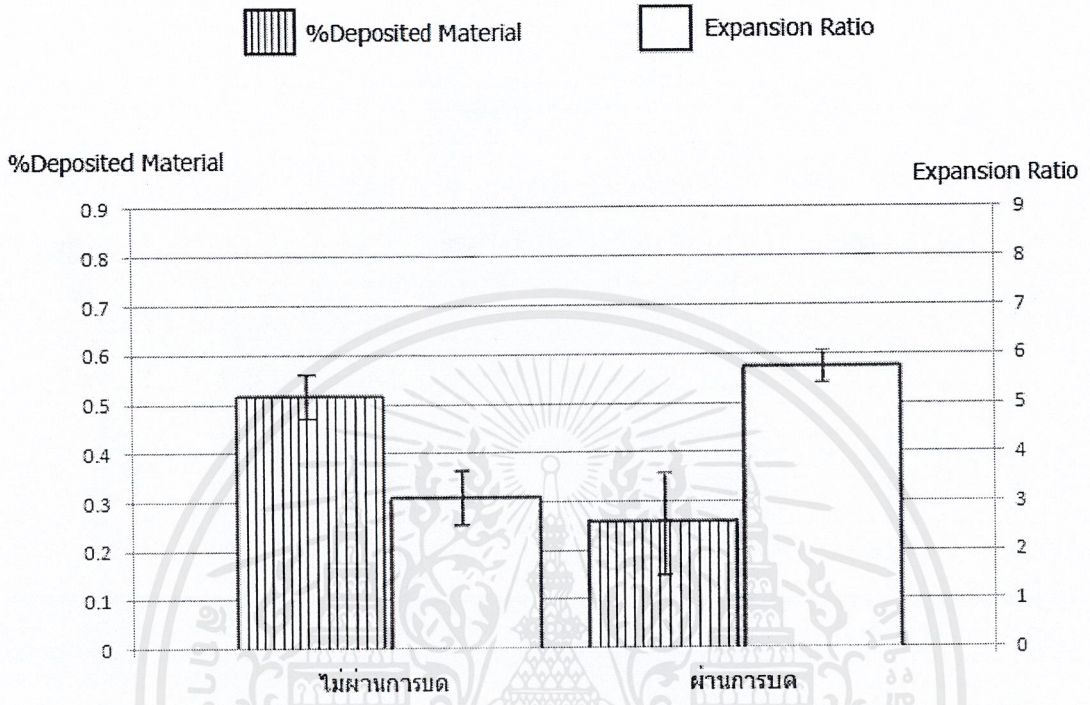
ก.) Temperature Profile ข.) Pressure Profile

รูปที่ 4.2 รูปแบบของอุณหภูมิและความดันที่เวลาต่างๆ ของกระบวนการเกิดโฟม โดยใช้มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการบด

และที่สภาวะการเกิดโฟมของมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ได้ผ่านการเตรียมด้วยการบดที่ ความดัน 11.3 MPa อุณหภูมิ 121.1°C ใช้เวลา 120 นาที ความเร็วใบพัด 195 rpm พบว่าให้ค่าของ %Deposited Material เท่ากับ 0.51% และมีสัดส่วนการขยายตัวคือ 3.1 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับการเกิดโฟมของมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการเตรียมด้วยการบด โดยใช้สภาวะการเกิดโฟมที่ความดัน 9.8 MPa อุณหภูมิ 121.0°C เวลา 120 นาที ความเร็วใบพัด 195 rpm พบว่าเมื่อทำการบดมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่ง แล้วให้ค่าของ %Deposited Material เท่ากับ 0.26% และมีสัดส่วนการขยายตัวคือ 5.7 แสดงดังรูปที่ 4.3 การที่โฟมที่ได้จากการเกิดโฟมของมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการเตรียมด้วยการบดนั้นมีค่า %Deposited Material น้อยกว่าโฟมที่มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการเตรียมด้วยการบด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเมื่อเกิดโฟมขึ้นแล้วสารเติมแต่งที่มีขนาดอนุภาคลดลงจะมีการกระจายตัวอยู่ในถังปฏิกรณ์ดีขึ้น ทำให้สารเติมแต่งไปเกาะติดที่เม็ดโฟมได้น้อยลง

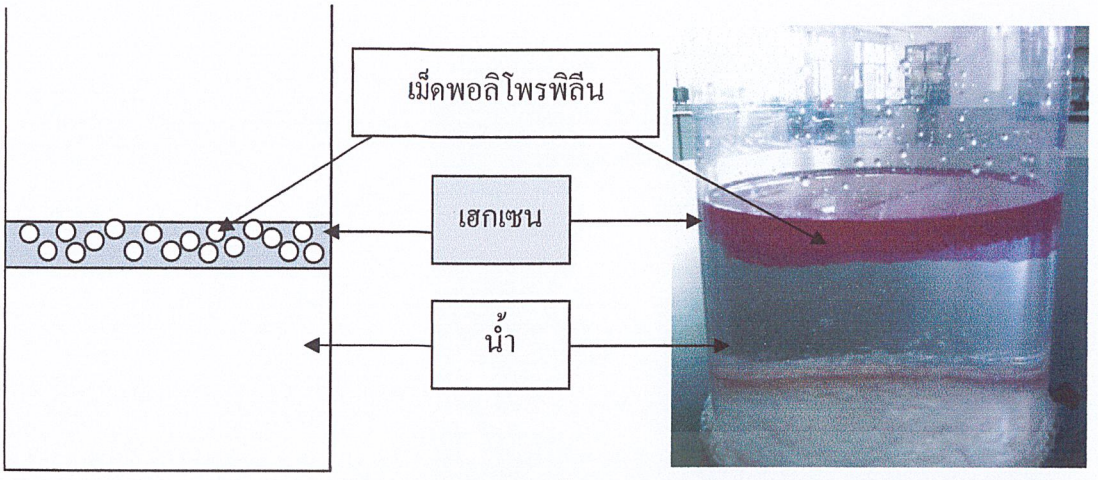


รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของการเกิดโฟมด้วยวิธีการเตรียมมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการบดและผ่านการบด

4.2 การ Visualization เพื่อศึกษาตำแหน่งและลักษณะการเคลื่อนที่ของสารต่างๆในถังปฏิกรณ์

กระบวนการผลิตโฟมแบบกะประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ เฮกเซน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เม็ดพอลิโพรพิลีน น้ำ และสารเติมแต่งอื่นๆ ซึ่งจากระบบดังกล่าวหากต้องการเพิ่มอัตราการแพร่ของสารเกิดฟอง (เฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) เข้าไปในเม็ดพอลิโพรพิลีน จะต้องศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ เช่น การออกแบบใบพัด อุณหภูมิและความดัน เป็นต้น ซึ่งในการทดลองนี้ทำการศึกษาตำแหน่งและลักษณะการเคลื่อนที่ของสารต่างๆในถังปฏิกรณ์ โดยเมื่อทำการผสมน้ำกับเฮกเซนที่ผสมสีและเม็ดพอลิโพรพิลีนเข้าด้วยกัน จะสามารถสังเกตได้ว่าเม็ดพอลิโพรพิลีนและเฮกเซนจะลอยอยู่ด้วยกันด้านบนส่วนสารเติมแต่งอื่นๆและน้ำจะอยู่ด้านล่างเนื่องจากเม็ดพอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.9 g/cm^3 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าน้ำ และความไม่ชอบน้ำของเม็ดพอลิโพรพิลีนและเฮกเซน ดังแสดงในรูปที่ 4.4

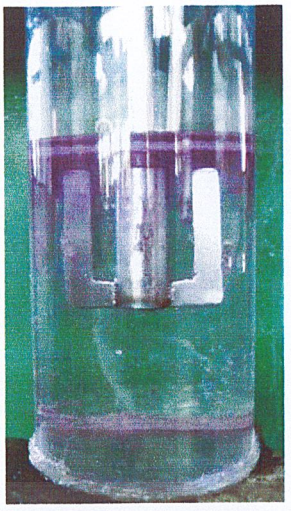
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



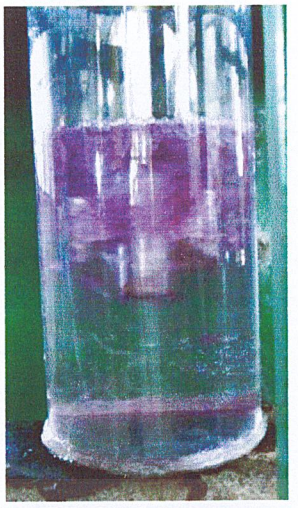
รูปที่ 4.4 กระบอกอะครีลิคที่มีส่วนผสมของน้ำ เม็ดพอลิโพรพิลีน และเฮกเซนที่ผสมสี

ก่อนเริ่มทำการปั่นกวนพบว่า เฮกเซนที่ผสมสีจะแยกชั้นกับน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.5ก.) จากนั้นเมื่อทำการปั่นกวนไปเป็นเวลา 24 วินาที เฮกเซนที่ผสมสีนั้นจะถูกปั่นกวนอย่างรุนแรงอยู่ทางด้านบน โดยเม็ดพอลิโพรพิลีนและเฮกเซนที่ผสมสีจะเคลื่อนที่วนรอบใบปั่นกวน ดังแสดงในรูปที่ 4.5ข.) ต่อมาเมื่อเวลาผ่าน ไปจนระบบเริ่มเข้าสู่สมดุลขึ้น การปั่นกวนจะมีความราบเรียบขึ้นกว่าในตอนเริ่มต้นทำการปั่นกวน ณ เวลา 27 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.5ค.) จนสุดท้ายระบบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีก นั่นคือระยะเริ่มเข้าสู่สมดุลแล้ว ณ เวลา 1 นาที 54 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.5ง.)ซึ่งการปั่นกวนนี้จะช่วยให้เพิ่มโอกาสการสัมผัสกันระหว่างเม็ดพอลิโพรพิลีน เฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะส่งผลให้การแพร่ของเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในเม็ดพอลิโพรพิลีนได้ดีขึ้น แต่การปั่นกวนยังไม่ช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ได้มากเท่าที่ควร ดังนั้นจึงทำการศึกษาสมดุลไอของเหลวของระบบเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสมมติได้ว่าไม่มีน้ำในระบบเนื่องจากน้ำที่เป็นของเหลวจะแยกชั้นอยู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) 0 วินาที



ข.) 24 วินาที

ค.) 27 วินาที

ง.)1นาที 54 วินาที

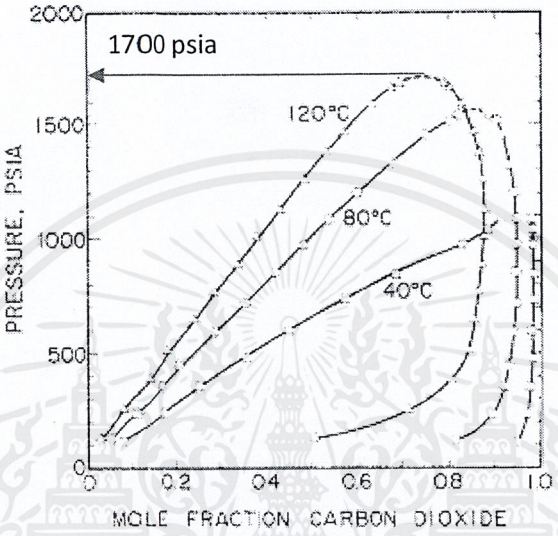
รูปที่ 4.5 ก.) – ง.) ภาพแสดงการปั่นกวนของเฮกเซน น้ำ และเม็ดพอลิโพรพิลีน

4.3 การศึกษาสมดุลไอของเหลวของระบบเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาสมดุลไอของเหลวของระบบเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ Ying-Hsiao Li และคณะ [17] พบว่าที่อุณหภูมิสมดุล 120°C ซึ่งมีค่าตรงกับสภาวะที่ใช้ในการผลิตโฟมนั้นมีความดันวิกฤต (Critical Pressure) ประมาณ 1,700 psia หรือ 117 bar ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แต่ความดันที่ใช้ในการผลิตโฟมอยู่ที่ประมาณ 170 bar ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าของผสมระหว่างเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ขณะทำการผลิตโฟมมีสภาพเป็นของผสมของของไหลเหนือวิกฤต จึงทำให้จำนวนวัฏภาคในระบบลดลง และเฮกเซนที่เป็นของไหลเหนือวิกฤตยังมีค่าอัตราการแพร่เข้าสู่เม็ดพอลิโพรพิลีนสูงกว่าเฮกเซนที่เป็นของเหลว หรือกล่าวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

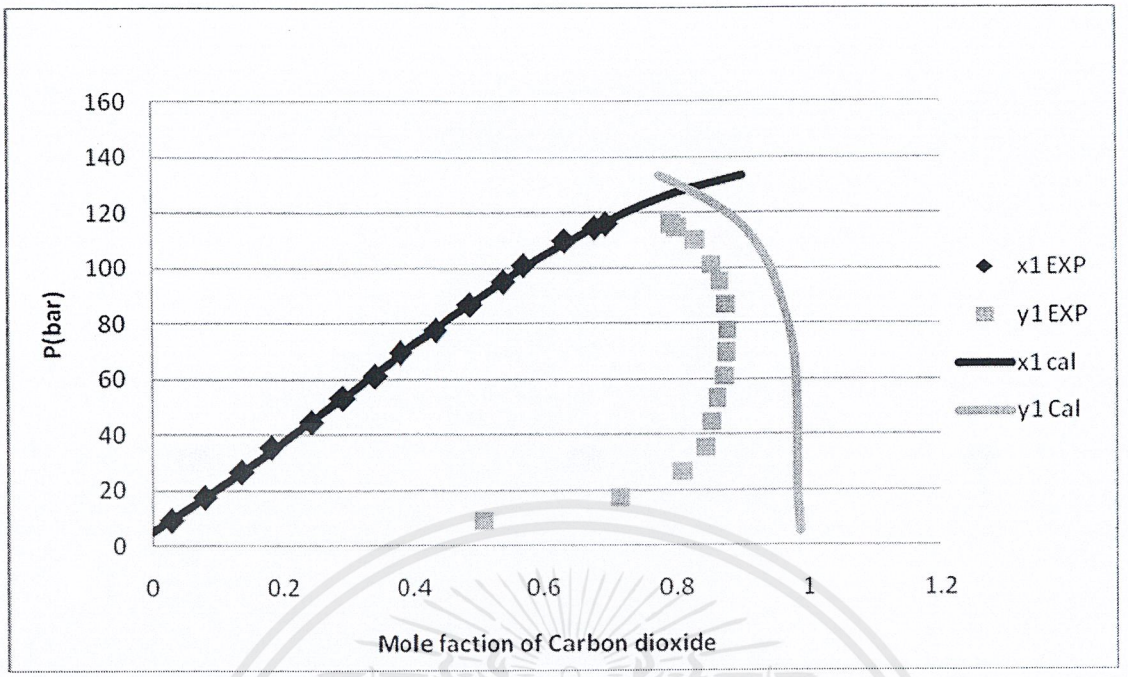
อีกนัยคือเฮกเซนในเฟสของของไหลเหนือวิกฤตใช้เวลาในการแพร่เข้ามาในเม็ดพอลิโพรพิลีนน้อยกว่าเฮกเซนในเฟสของของเหลว และหากเทียบที่เวลาเท่ากันพบว่าเฮกเซนในเฟสของไหลเหนือวิกฤตสามารถละลายเข้าไปในพอลิโพรพิลีนได้มากกว่าการละลายจากเฮกเซนในเฟสของเหลวมายังพอลิโพรพิลีน ซึ่งส่งผลให้โฟมที่ได้นั้นมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับสัดส่วนโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 40 80 และ 120 ^{o}C [17]

และจากการคำนวณค่า K-value ของเฮกเซนที่สัดส่วนโมลในของเหลวของเฮกเซน (x_1) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 120^{o}C สามารถนำข้อมูลมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับสัดส่วนโมลในเฟสของเหลวและแก๊สของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (P-xy diagram) ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงค่าที่ได้คำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองของ Ying-Hsiao Li และคณะ [17]โดยจะเห็นได้ว่าค่าสัดส่วนโมลในเฟสแก๊สของเฮกเซนที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองที่ความดันเดียวกัน ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากสมการมาตูลส์ที่ใช้ในการคำนวณมีความแม่นยำไม่มากพอในการทำนายพฤติกรรมสมดุลไอของเหลวของระบบ และจากกราฟนี้ยังแสดงให้เห็นถึงความดันวิกฤตของของผสมโดยมีค่าประมาณ 117 bar สำหรับค่าที่ได้จากการทดลอง และมีค่าประมาณ 130 bar สำหรับค่าที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



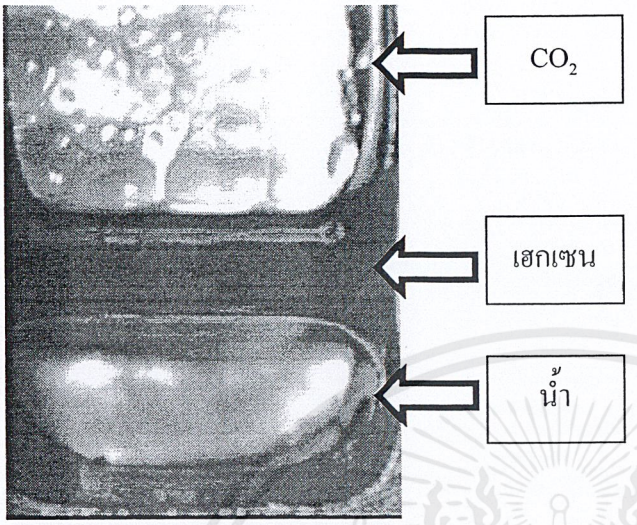
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับสัดส่วนโมลในเฟสของเหลว (x_1) และแก๊ส (y_1) ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 120 ^{o}C

4.4 การ Visualization เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ของไหลเหนือวิกฤตของระบบเฮกเซน-แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ – น้ำ

จากการที่ทราบว่าของผสมระหว่างเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ขณะทำการผลิตโฟมมีสภาพเป็นของผสมของของไหลเหนือวิกฤตในหัวข้อที่ 4.3 ดังนั้นจึงได้ทำ Visualization เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ของไหลเหนือวิกฤตของระบบเฮกเซน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยจากรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการเกิดของไหลเหนือวิกฤตของระบบที่ประกอบด้วยเฮกเซน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่อุณหภูมิ 40^{o}C ความดัน 8.27 MPa โดยรูปที่ 4.8 ก.) ในถังปฏิกรณ์จะประกอบไปด้วยเฮกเซนและน้ำเพียงสององค์ประกอบเท่านั้นจะสังเกตได้ว่าเฮกเซนจะลอยอยู่เหนือน้ำ เนื่องจากความหนาแน่นของเฮกเซนมีค่าน้อยกว่าน้ำ จากนั้นทำการฉีดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในถังปฏิกรณ์ ทำให้เฮกเซนและน้ำเกิดการปั่นกวนดังแสดงในรูปที่ 4.8ข.) เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนจะกลายเป็นของไหลเหนือวิกฤตโดยที่สังเกตได้จากระดับความหนาของเฮกเซนลดลงดังรูปที่ 4.8 ค.) จนระดับความหนาของเฮกเซนหายไปดังรูปที่ 4.8 ง.) ซึ่งในความเป็นจริงนั้นที่อุณหภูมิ 40^{o}C ความดัน 8.27 MPa น้ำจะต้องอยู่ในรูปของเหลวด้านล่าง ซึ่งสาเหตุที่ไม่เห็นน้ำอยู่ในรูปของเหลวนั้นอาจมีสาเหตุมาจากน้ำในระบบกระจายตัวอยู่ทั่วถังปฏิกรณ์ในลักษณะเป็นละอองน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสังเกตเห็นเพียงของไหลเหนือวิกฤตของของผสมระหว่างเฮกเซนกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



ก.) อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ

เวลา 0 นาที

ข.) อุณหภูมิ 40°C ความดัน8.27 MPa

เวลา 2 นาที

ค.) อุณหภูมิ 40°C ความดัน8.27 MPa

เวลา 10 นาที

ง.) อุณหภูมิ 40°C ความดัน8.27 MPa

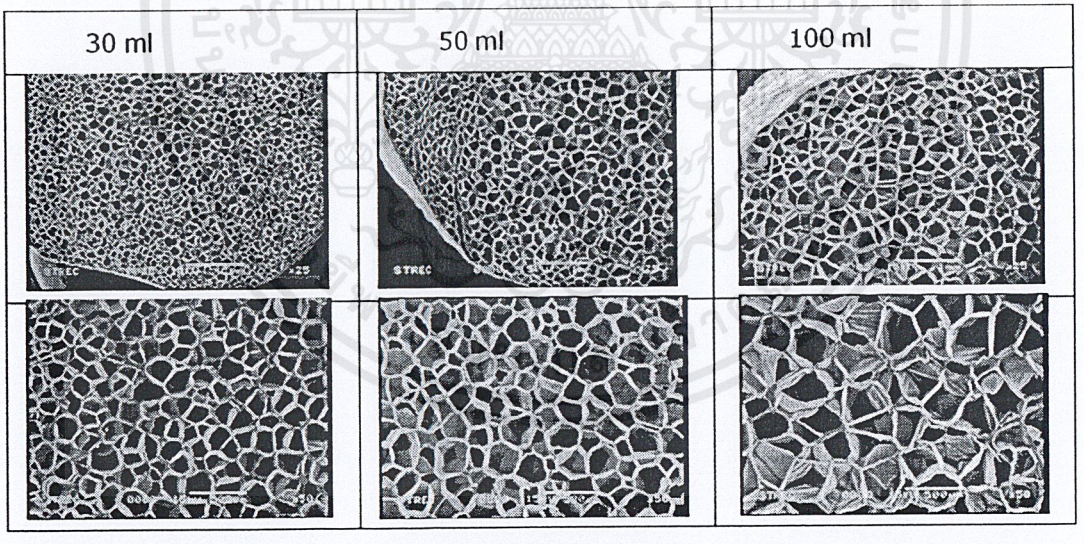
เวลา 18 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 ก.) – ง.) แสดงลักษณะการเกิดของไหลเหนือวิกฤตของระบบที่ประกอบด้วยเฮกเซน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่อุณหภูมิ 40°C ความดัน 8.27 MPa

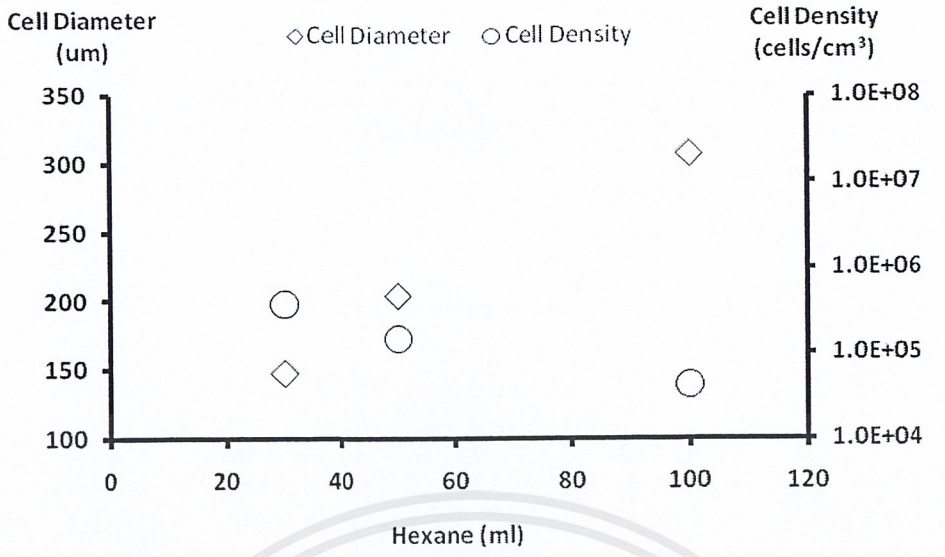
4.5 สัณฐานวิทยาของโฟมที่ปริมาตรเฮกเซนต่างๆ และการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของของไหลเหนือวิกฤต ($C_{P_{mix}}$) ที่ปริมาตรเฮกเซน 30 50 และ 100 ml (สัดส่วนโมล 0.04 0.06 และ 0.11 ตามลำดับ)

จากกระบวนการผลิตโฟมนั้นใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนเป็นสารเกิดฟอง ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณเฮกเซนที่ใช้ที่มีต่อสัณฐานวิทยาของโฟมซึ่งพบว่าขนาดเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลักษณะของเซลล์มีความเป็นระเบียบเหมือนกันเมื่อปริมาตรเฮกเซนที่ใช้เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9 และเมื่อนำไปทำการวิเคราะห์ขนาดเซลล์และความหนาแน่นของเซลล์โฟมดังในรูปที่ 4.10 พบว่าขนาดเซลล์เพิ่มขึ้นและความหนาแน่นของเซลล์มีค่าค่อนข้างคงที่ตามปริมาตรเฮกเซนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 ภาพไมโครกราฟ แสดงลักษณะของโฟมพอลิโพรพิลีนที่สภาวะความดัน 17 MPa อุณหภูมิ 120°C ที่ปริมาตรเฮกเซน 30 50 และ 100 ml ที่เวลาการทำโฟม 180 150 และ 180 นาที ตามลำดับ

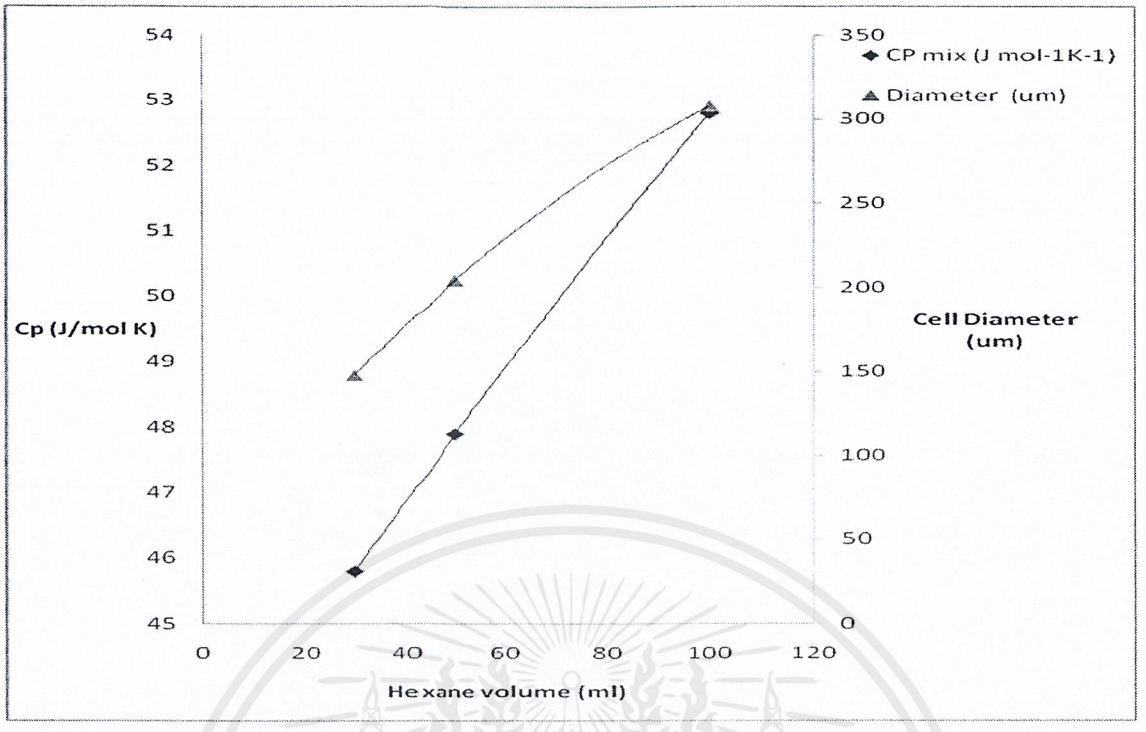
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



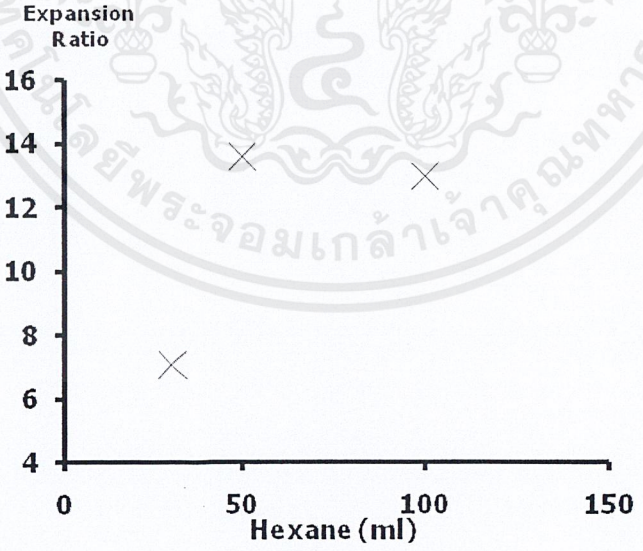
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเฮกเซนกับขนาดและความหนาแน่นของเซลล์โฟม

จากการที่พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้นตามปริมาตรเฮกเซนที่เพิ่มขึ้น ทำให้สันนิฐานได้ว่า เมื่อปริมาตรเฮกเซนเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้สัดส่วนโมลของเฮกเซนในของผสมของของไหลเหนือวิกฤตเพิ่มสูงขึ้น (เฮกเซนที่เติมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์กลายเป็นของไหลเหนือวิกฤตทั้งหมดที่สภาวะการทดลอง อ้างอิงจากการทดลอง Visualization ของการกลายเป็นของไหลเหนือวิกฤตของเฮกเซน) ทำให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของของผสมของของไหลเหนือวิกฤตมีค่าสูงขึ้นตามสัดส่วนโมลของเฮกเซนที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.11 ทั้งนี้อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากการที่ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเฮกเซนบริสุทธิ์มีค่าสูงกว่าค่าความจุความร้อนจำเพาะของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นเฟสของผสมของของไหลเหนือวิกฤตจึงมีความสามารถที่จะกักเก็บความร้อนได้ดีขึ้นและสามารถส่งผ่านความร้อนให้แก่เม็ดพอลิโพรพิลีนที่ลอยสัมผัสกับของผสมของของไหลเหนือวิกฤตได้มาก ทำให้เม็ดพอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการอ่อนตัวได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้ขั้นตอนการเจริญเติบโตของเซลล์ดีขึ้น ทำให้โฟมที่เกิดขึ้นมีขนาดเซลล์ใหญ่ขึ้น และเนื่องจากความหนาแน่นของเซลล์โฟมมีค่าค่อนข้างคงที่ตามปริมาตรของเฮกเซนที่ใช้ ดังรูปที่ 4.10 ดังนั้นจึงส่งผลให้เม็ดโฟมที่ได้มีสัดส่วนการขยายตัวมากขึ้นตามปริมาตรของเฮกเซนที่ใช้ในการผลิตโฟมเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเฮกเซน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) และเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์โฟมที่สภาวะความดัน 17 MPa อุณหภูมิ 120 °C



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเฮกเซนกับสัดส่วนการขยายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โฟมที่ได้จากการเกิดโฟมของมาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบผ่านการเตรียมด้วยการบดมีค่า %Deposited Material เท่ากับ 0.26% ซึ่งน้อยกว่าโฟมที่มาสเตอร์แบตช์ของสารเติมแต่งแบบไม่ผ่านการเตรียมด้วยการบดซึ่งเท่ากับ 0.51% เนื่องจากเมื่อเกิดโฟมขึ้นแล้วสารเติมแต่งที่มีขนาดอนุภาคลดลงจะมีการกระจายตัวอยู่ในถังปฏิกรณ์ดีขึ้น ทำให้สารเติมแต่งไปเกาะติดที่เม็ดโฟมได้น้อยลง และจากการทำการทดลอง Visualization เพื่อศึกษาลักษณะการอยู่ในถังปฏิกรณ์ของเฮกเซนพบว่าเม็ดพอลิโพรพิลีนจะลอยอยู่ด้านบนและน้ำจะอยู่ด้านล่าง ซึ่งเม็ดพอลิโพรพิลีนจะแขวนลอยอยู่บนชั้นของเฮกเซนในด้านบน แต่จะไม่ละลายในน้ำโดยน้ำจะแยกชั้นอยู่ด้านล่าง ซึ่งการที่ชั้นเฮกเซนและเม็ดพอลิโพรพิลีนลอยตัวอยู่ด้านบนสัมผัสกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาสมดุลไอของเหลวสำหรับเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป โดยสมดุลไอของเหลวของระบบเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความดันวิกฤต (Critical Pressure) ประมาณ 1,700 psia หรือ 117 bar แต่ใช้ความดันที่ในการผลิตโฟมประมาณ 170 bar ดังนั้นของผสมระหว่างเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ขณะทำการผลิตโฟม มีสภาพเป็นของผสมของของไหลเหนือวิกฤต เมื่อทำวิเคราะห์ขนาดเซลล์และความหนาแน่นของเซลล์โฟม พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์เพิ่มขึ้นคือ 147 203 และ 307 μm และความหนาแน่นของเซลล์มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วง $10^{-4} - 10^{-5}$ cells/cm^3 ตามปริมาตรเฮกเซน 30 50 และ 100 ml ตามลำดับและจากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาตรของเฮกเซนมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของของไหลเหนือวิกฤตระหว่างเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นคือ 45.8 47.9 และ 52.8 J mol^{-1}K^{-1} ตามลำดับ และพบว่าค่าสัดส่วนการขยายตัวของโฟมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาตรเฮกเซนที่ใช้เพิ่มขึ้นคือ 7.1 13.6 และ 13 ดังนั้นการเพิ่มประสิทธภาพของการผลิตโฟมซึ่งในที่นี้มีเป้าหมายคือการลดวัฏภาคของระบบด้วยการทำให้สารไฮโรคาร์บอนกลายเป็นของไหลเหนือวิกฤตซึ่งส่งผลให้ค่าสัดส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขยายตัวของเม็ดโฟมพอลิโพรพิลีนสามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาตรของเฮกเซนที่ใช้ในการผลิตโฟม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับค่าการละลายจำกัดของเฮกเซนในแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ในเฟสของไหลเหนือวิกฤต

2. จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับสัดส่วนโมลในเฟสของเหลวและแก๊สของเฮกเซน(P-xy diagram) ซึ่งได้แสดงค่าที่ได้คำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยเห็นได้ว่าค่าสัดส่วนโมลในเฟสแก๊สของเฮกเซนที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองที่ความดันเดียวกัน ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากสมการที่ใช้ในการคำนวณ (สมการมากูลส์) มีความแม่นยำไม่เพียงพอในการทำนายพฤติกรรมสมดุลไอของเหลวของระบบ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำอาจใช้สมการอื่นๆในการทำนาย เช่น สมการแวนลาร์ สมการวิลสัน สมการ NRTL และสมการยูนิแควก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สุภัทร์ชัย แสงวงษ์. 2550. **"สมบัติเชิงกลพลวัตและสันฐานวิทยาของโฟมคอมโพสิทพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพารา"** : pp.6-13

[2] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2527. " **เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน**". โอเดียนสโตร์. กรุงเทพมหานคร.

[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** 41 299–310, pp.299-300, 2007.

[4] นายไพศาล นาคพิพัฒน์. **"ส่วนประกอบสำคัญในอุตสาหกรรมพลาสติก"**. 2550; สืบค้น 7 กย. 2553 [1 หน้า].เข้าถึงได้ที่ URL: http://guru.sanook.com/enc _preview.php

[5] Jaakko I. Raukola. "A new technology to manufacture polypropylene foam sheet and biaxially oriented foam film." **VTT Publications** 361.101 s, pp.11-12, 1998.

[6] Dongsik Kim, Jun S. Lee, Carol M.F. Barry and Joey L. Mead. "Effect of Fill Factor and Validation of Characterizing the Degree of Mixing in Polymer Nanocomposites." **POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE-2007**, pp.2049-2057, 2007.

[7] วิรัช เลิศพรม. **"ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบดด้วยหม้อบด (ตอนที่ ๑) Ball Mill: How to consider factors to its performance."** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[8] วิรัช เลิศพรม. **"ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบดด้วยหม้อบด (ตอนที่ ๒) Ball Mill: How to consider factors to its performance."** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[9] ศิริวัฒน์ เตชะวัฒนาพาณิชย์ และอธิป ถายานุวัตร. "โปรแกรมการคำนวณสัมประสิทธิ์แอกติวิตีโดยวิธียูนิแฟก.", สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[10] J.M. Smith, H.C. Van Ness and M.M. Abbott. "**Introduction to chemical engineering thermodynamics".** 7th Edition. Avenue of the Americas, New York: McGraw-Hill, 2005.

[11] วัชรีพร แสงวัชรพันธุ์. "การศึกษาการย้อมสีเส้นใยพอลิเอสเทอร์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต." สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

[12] เอกสารประกอบการสอนบทที่ 4 วิชาเทอร์โมไดนามิกส์. (4 กุมภาพันธ์ 2554). Available URL: http://www.sut.ac.th/engineering/metal/pdf/...I/Chapter%20III.pdf

[13] Duanghathai Pentrakoon and John W. Ellis. 2005. **"An Introduction To Plastic Foams, Chulalongkorn University Press."**: pp.22-26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Zhihua Guo, L. James Lee, and David L. Tomasko. "CO_2Permeability of Polystyrene Nanocomposites and Nanocomposite Foams." **Ind. Eng. Chem. Res.**, Vol. 47, No. 23, pp.9636-9643, 2008.

[15] Hani E. Naguib, Chul B. Park and Seung-Won Song. "Effect of Supercritical Gas on Crystallization of Linear and Branched Polypropylene Resins with Foaming Additives." **Ind. Eng. Chem. Res.**, Vol. 44, No. 17, pp.6685-6691, 2005.

[16] Ming-Tsai Liang and Chang-Ming Wang. "Production of Engineering Plastics Foams by Supercritical CO_2." **Ind. Eng. Chem. Res.**, Vol. 39, No. 12, pp.4622-4626, 2000.

[17] Ying-Hsiao Li, Kenneth H. Diilard and Robert L. Robinson, Jr. "Vapor-Liquid Phase Equilibrium for Carbon Dioxide-n-Hexane at 40, 80, and 120 ^{o}C." **Journal of Chemical and Engineering Data**, Vol.26, No.1, pp.53-55, 1981.

[18] CRC Handbook of Chemistry and Physics. 44th edition, 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณจำนวนโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในถังปฏิกรณ์

กำหนดให้ในระบบมีคาร์บอนไดออกไซด์และเฮกเซนเพียง 2 องค์ประกอบเท่านั้น

จากสมการแก๊สอุดมคติ

$$PV = nRT \qquad \text{(ก.1)}$$

โดยที่ P = ความดันในระบบ (bar)

V = ปริมาตรส่วนของไอในถังปฏิกรณ์ (ml)

T = อุณหภูมิในระบบ (K)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส ($\frac{ml \cdot bar}{mol \cdot K}$)

เมื่อ P = 82 bar , V = 2,000 ml , R = 83.14 $\frac{ml \cdot bar}{mol \cdot K}$ และ T = 313.15 K

(82 bar)(2,000 ml) = n_{CO_2}(83.14 $\frac{ml \cdot bar}{mol \cdot K}$)(313.15 K)

n_{CO_2} = 6.29 mol

<u>จำนวน Mole ของแต่ละองค์ประกอบ</u>

Mole CO_2 = 6.29

Mole Hexane (C_6H_{14}) 30 ml = 0.23

Mole Hexane (C_6H_{14}) 50 ml = 0.38

Mole Hexane (C_6H_{14}) 100 ml = 0.76

<u>ค่า Mole Fraction</u>

Mole fraction ของ Hexane (C_6H_{14}) 30 ml = 0.04

Mole fraction ของ Hexane (C_6H_{14}) 50 ml = 0.06

Mole fraction ของ Hexane (C_6H_{14}) 100 ml = 0.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณความดันไอ (P^{sat}) ของแต่ละองค์ประกอบ

ค่าความดันไอ (P^{sat}) ของน้ำและเฮกเซนสามารถคำนวณได้จากสมการของอองตวน ลาวัวซิเยร์

$$\ln P^{sat}(kPa) = A - \frac{B}{t(^{\circ}C)+C} \qquad (ข.1)$$

โดยที่ P^{sat} = ความดันที่สภาวะอิ่มตัว (kPa)

t = อุณหภูมิ (°C)

A , B และ C = ค่าคงที่ของแต่ละองค์ประกอบ

H_2O: A = 16.3872, B = 3,885.70, C = 230.170

Hexane: A = 13.8193, B = 2,696.04, C = 224.317

และสามารถหาความดันไอของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการ [18]

$$\ln P^{sat}(mmHg) = \ln\left(\frac{760}{101.325}\right) - 24.03761\ln(t\,(^{\circ}C) + 273.15) - \frac{7,062.404}{t(^{\circ}C)+273.15} + 166.3861 + 3.368548\times 10^{-5}(t(^{\circ}C) + 273.15)^2 \qquad (ข.2)$$

ซึ่ง P^{sat} ของแต่ละองค์ประกอบที่อุณหภูมิ 120 °C มีค่าดังต่อไปนี้

P^{sat} H_2O	=	198.34	kPa
P^{sat} Hexane	=	399.41	kPa
P^{sat} CO_2	=	22,263.02	kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณค่า K-value ของเฮกเซนที่อุณหภูมิต่างๆ

วิธีการคำนวณค่า K-value ของเฮกเซนที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้ (กำหนดให้ระบบมีเพียงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเฮกเซน)

1) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (ρ) ของเฮกเซนกับอุณหภูมิ จากโปรแกรม Hysys แล้วนำมาพล็อตกราฟ

2) คำนวณค่าปริมาตรโมลาร์ (V^l) จากค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สมการ

3)

$$V^l = \frac{MW}{\rho} \qquad \text{(ค.1)}$$

โดยที่ MW คือ มวลโมเลกุลของเฮกเซน

4) คำนวณค่าอุณหภูมิอิ่มตัว (T^{sat}) และความดันไอ (P^{sat}) ของเฮกเซนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สมการของอองตวน ลาวัวซิเยร์

$$\ln P^{sat}(kPa) = A - \frac{B}{t(^{\circ}C)+C} \qquad \text{(ค.2)}$$

5) คำนวณค่า T_r P_r T_r^{sat} และ P_r^{sat} ของเฮกเซนโดยใช้สมการ

$$T_r = \frac{T}{T_c} \qquad \text{(ค.3)}$$

$$P_r = \frac{P}{P_c} \qquad \text{(ค.4)}$$

$$T_r^{sat} = \frac{T^{sat}}{T_c} \qquad \text{(ค.5)}$$

$$P_r^{sat} = \frac{P^{sat}}{P_c} \qquad \text{(ค.6)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ T_c และ P_c คือ อุณหภูมิและความดันวิกฤตของเฮกเซน ซึ่งมีค่า 507.6 K และ 30.25 bar ตามลำดับ

6) นำค่า T_r P_r T_r^{sat} และ P_r^{sat} ของเฮกเซนไปหาค่า $\emptyset^0$ $\emptyset^1$ $\emptyset^{0,sat}$ และ $\emptyset^{1,sat}$ จากตาราง E13-16 Appendix E. [10]

7) นำค่า $\emptyset^0$ $\emptyset^1$ $\emptyset^{0,sat}$ และ $\emptyset^{1,sat}$ มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟิวกาซิตี $\emptyset$ และ $\emptyset^{sat}$ โดยใช้สมการ

$$\emptyset = (\emptyset^0)(\emptyset^1)^{\omega} \qquad (ค.7)$$

$$\emptyset^{sat} = (\emptyset^{0,sat})(\emptyset^{1,sat})^{\omega} \qquad (ค.8)$$

โดยที่ ω คือ ค่า Acentric factor ซึ่ง ω ของเฮกเซนมีค่า 0.301

8) คำนวณค่า K-value ของเฮกเซน โดยใช้สมการ

$$K = \frac{\gamma \emptyset^{sat} P^{sat}}{\emptyset P} \exp \frac{V^l (P - P^{sat})}{RT} \qquad (ค.9)$$

โดย γ คือ สัมประสิทธิ์แอกติวิตีของเฮกเซน โดยในที่นี้สมมติให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การคำนวณค่า K-value ของเฮกเซนที่สัดส่วนโมลในเฟสของเหลวของเฮกเซน (x_1) ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 120°C

(สมมติให้ระบบมีเพียงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเฮกเซน)

1) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน สัดส่วนโมลในเฟสของเหลว (x_1) และสัดส่วนโมลในเฟสแก๊ส (y_1) ของเฮกเซนจากการทดลอง (Vapor-Liquid Phase Equilibrium for Carbon Dioxide-n-Hexane at 40,80, and 120°C) [17]

ตารางที่ ง.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับสัดส่วนโมลในเฟสของเหลวและแก๊ส

P (bar)	x_1	y_1
8.963	0.972	0.493
17.305	0.920	0.285
26.406	0.865	0.192
35.232	0.820	0.157
44.402	0.757	0.147
53.020	0.711	0.138
61.018	0.661	0.127
69.499	0.620	0.125
77.565	0.567	0.123
86.804	0.514	0.126
95.078	0.462	0.134
100.93	0.430	0.147
109.833	0.368	0.172
114.521	0.324	0.199
115.969	0.307	0.207

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) คำนวณค่าความดันไอ (P^{sat}) ของเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 120°C โดยใช้สมการของอองตวน ลาวัวซิเยร์ (ข.1)

$$\ln P^{sat}(kPa) = A - \frac{B}{t(°C) + C}$$

3) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้จากการทดลอง (γ_i^{Exp}) โดยใช้สมการ

$$\gamma_i^{Exp} = \frac{y_i P}{x_i P_i^{sat}} \quad (ง.1)$$

4) คำนวณค่า G^E/RT โดยใช้สมการ

$$\frac{G^E}{RT} = x_1 \ln \gamma_1^{Exp} + x_2 \ln \gamma_2^{Exp} \quad (ง.2)$$

5) พล็อตกราฟระหว่าง $G^E/(x_1 x_2 RT)$ $\ln \gamma_1^{Exp}$ และ $\ln \gamma_2^{Exp}$ กับ x_1 เพื่อหาค่า A_{12} และ A_{21}

6) คำนวณค่า $\ln \gamma_1$ และ $\ln \gamma_2$ โดยใช้สมการของมากูลส์ (Marqules Equation) [10]

$$\ln \gamma_1 = x_2^2(A_{12} + 2(A_{21} - A_{12})x_1) \quad (ง.3)$$

$$\ln \gamma_2 = x_1^2(A_{21} + 2(A_{12} - A_{21})x_2) \quad (ง.4)$$

7) นำความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนโมลในเฟสของเหลว (x_1) ของเฮกเซน ความดัน และสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของเฮกเซน (γ_1) ไปคำนวณค่า K-value ของเฮกเซนที่อุณหภูมิ 120°C ดังวิธีที่ได้แสดงในข้อที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของของผสม

<u>การคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของของผสมของของไหลเหนือวิกฤต</u> ($C_{p_{mix}}$)

- คำนวณหาค่า C_p ของเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จาก

$$\frac{C_{P_i}}{R} = A + BT + CT^2 + DT^{-2} \qquad (จ.1)$$

โดยที่ C_{p_i} คือ ความจุของร้อนจำเพาะของสารแต่ละองค์ประกอบ i ($J\ mol^{-1}\ K^{-1}$)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$)

A,B,C คือ ค่าคงที่ของแต่ละองค์ประกอบ i

T คือ อุณหภูมิ (K)

Hexane; $A = 3.025, B = 53.722 \times 10^{3}, C = -16.791 \times 10^{6}$

CO_2; $A = 5.457, B = 1.045 \times 10^{3}, D = -1.157 \times 10^{-5}$

ตารางจ.1 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะของเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สาร	A	B	C	D	R (J/mol K)	T (K)	C_p ($J\ mol^{-1}K^{-1}$)
Hexane	3.025	5.37E-02	-1.68E-05	0	8.314	393	1.79E+02
CO_2	5.457	1.05E-03	0	-1.16E+05	8.314	393	4.26E+01

- คำนวณหาเศษส่วนโมลของเฮกเซนปริมาตร 30 50 และ 100 ml

ตาราง จ.2 แสดงสัดส่วนโมลของเฮกเซนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

hexane (ml)	V_i (ml/mol)	n hexane (mol)	n CO_2 (mol)	y_1	y_2
30	143.3094	0.20933728	8.57	0.023844	0.9761557
50	143.3094	0.348895467	8.57	0.039119	0.9608813
100	143.3094	0.697790933	8.57	0.075292	0.924708

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คำนวณหาค่า $C_{p_{mix}}$

จาก

$$C_{p_{mix}} = \sum_{i=1}^{n} y_i C_{p_i} \quad \text{(จ.2)}$$

โดย y_i คือ สัดส่วนโมลของสารประกอบ *i*

ตาราง จ.3 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรเฮกเซนต่างๆกัน

V hexane (ml)	y_1	y_2	$C_{P\ Hexane}$ ($J\ mol^{-1}K^{-1}$)	$C_{P\ CO2}$ ($J\ mol^{-1}K^{-1}$)	$C_{P\ mix}$ ($J\ mol^{-1}K^{-1}$)
30	0.023844315	0.976155685	1.79E+02	4.26E+01	4.58E+01
50	0.039118685	0.960881315	1.79E+02	4.26E+01	4.79E+01
100	0.075292045	0.924707955	1.79E+02	4.26E+01	5.28E+01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
คุณสมบัติเบื้องต้นของเฮกเซน

เฮกเซน (Hexane; C_6H_{14})

เฮกเซนเป็นสาร เคมีที่ใช้เป็นตัวทำละลายอยู่ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ใช้ผสมสีหรือกาวในงานเฟอร์นิเจอร์ งานพ่นหรืองานทาสี งานทากาวรองเท้า สำหรับโรงงานที่ใช้เฮกเซนได้แก่โรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันพืช และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เฮกเซนเป็นของเหลวใสไม่มีสี ระเหยง่าย มีกลิ่นเฉพาะตัว ส่วนมากจะเข้าสู่ร่างกาย โดยการหายใจเอาไอระเหย แล้วถูกดูดซึมเข้ากระแสเลือด หรือเข้าสู่กระแสเลือดจากการสัมผัสทางผิวหนัง เมื่อสัมผัสสารที่เข้มข้นจะเกิดอาการแบบเฉียบพลัน คือ ปวดศรีษะ คลื่นไส้ อาเจียน ความรุนแรงของอาการขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของไอระเหยในอากาศ ซึ่งไม่ควรเกิน 1000 ส่วนในล้านส่วน (ppm) อาการเด่นชัดได้แก่ ผิวหนังบวมแดง อาจมีตุ่มใส ถ้าเข้าตาทำให้กระจกตาขุ่น ระคายเคือง ถ้าได้รับความเข้มข้นต่ำต่อเนื่องนานกว่า 1 เดือน จะเริ่มมีอาการเบื่ออาหาร น้ำหนักตัวลด ชาที่ปลายเท้าปลายนิ้ว ปวดกล้ามเนื้อคล้ายเป็นตะคริว กล้ามเนื้อจะอ่อนแรง ลีบถึงขั้นชาแขนเป็นอัมพฤกษ์อัมพาต อาการเหล่านี้ถ้ายังไม่ถึงขั้นรุนแรง จะทุเลาได้เมื่อหยุดสัมผัส และอาจกลับมาเป็นปกติได้ หลังจากหยุดสัมผัสประมาณ 10 เดือน

ข้อมูลทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Data)

จุดเดือด (°C) (Boiling Point)	69
จุดหลอมเหลว (°C) (Melting Point)	-95.6
ความดันไอ (Kpa) (Vapour Pressure)	13.33
การละลายได้ในน้ำ (Solubility in Water)	ไม่ละลาย
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity HO)	0.6603 ที่ 20°C
อัตราการระเหย (Evaporating Rate)	-
ลักษณะ สี และกลิ่น (Appearrance Colour and Odor)	เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายแก๊สโซลีน
ความเป็นกรดด่าง (pH-Value)	-
คุณสมบัติอื่น (Other properties)	ละลายในคลอโรฟอร์ม อีเทอร์ และแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้