สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง

การศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ ในระบบสององค์ประกอบ

STUDY OF VAPOR – LIQUID EQUILIBRIUM OF ETHYLENE GLYCOL AND WATER BINARY SYSTEM

นายชาตรี สุนทรเสนาะ
นายเชาวรินทร์ หาดเจียง

วน
ส5147ก
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....83203
วัน,เดือน,ปี.....- 6 ส.ค. 2551

b.....11962513
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอทิลีนไกลคอลกับน้ำ ในระบบสององค์ประกอบ

นายชาตรี สุนทรเสนาะ
นายเชาวรินทร์ หาดเจียง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF VAPOR – LIQUID EQUILIBRIUM OF ETHYLENE GLYCOL AND WATER BINARY SYSTEM

MR. CHATREE SOONTORNSNOR

MR. CHAOWARIN HADCHIANG

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบ
โดย	นายชาตรี สุนทรเสนาะ
	นายเชาวรินทร์ หาดเจียง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

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

.....กรรมการ
(อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

.....กรรมการ
(อ.ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบ
นักศึกษา	นายชาตรี สุนทรเสนาะ
	นายเชาวรินทร์ หาดเจียง
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ. ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester resin) พบว่าหอควบแน่น (partial condenser) ซึ่งทำหน้าที่ในการควบแน่นเอททิลีนไกลคอลที่เป็นสารตั้งต้นกลับสู่กระบวนการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพในการควบแน่นต่ำ โครงงานวิจัยนี้จึงศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบภายในหอควบแน่นชนิดนี้เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแยกเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ โดยการออกแบบอุปกรณ์การทดลองนั้นได้ลดขนาดของหอควบแน่นลงเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยมีอัตราส่วนของหอควบแน่นที่ใช้ในห้องปฏิบัติการกับหอควบแน่นจริงในโรงงานอุตสาหกรรมเป็น 1:13 จากนั้นทำการทดลองโดยทดลองกับหอควบแน่นที่ปราศจากวัสดุบรรจุและหอควบแน่นที่ใส่วัสดุบรรจุ จากนั้นโดยให้ความร้อนแก่สารละลายเอททิลีนไกลคอล 90% โดยปริมาตร เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเอททิลีนไกลคอลคงที่แล้วจะทำการเก็บสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์สัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอของแต่ละตำแหน่งความสูง ในส่วนของการคำนวณนั้นใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของราอูลท์ที่มีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีทำนายสัดส่วนของเอททิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอที่อุณหภูมิต่างๆ และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแวนเดอร์วาล์ว เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีที่มีค่าปรับแก้ของสมการ (k_{12}) เท่ากับ 0.048 ซึ่งพบว่าการคำนวณทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถนำสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ทำนายสัดส่วนโดยโมลของเอททิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอที่ความสูงต่างๆได้ และเมื่อพิจารณาถึงผลการใส่วัสดุบรรจุพบว่าการใส่วัสดุบรรจุเฉพาะในช่วง 0-40% ของหอควบแน่น ที่มีความหนาแน่นรวม (bulk density) 90.91 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถแยกเอททิลีนไกลคอล ออกจากน้ำได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Study of Vapor – Liquid Equilibrium of Ethylene Glycol and Water Binary System
Student	Mr. Chatree Soontornsnor
	Mr. Chaowarin Hadchiang
Degree	Bachelor Degree of Engineering
Major	Chemical Engineering
Advisor	Assist. Prof. Dr. Surat Areerat
Report for	Bachelor Degree of Chemical Engineering
	Department of Chemical Engineering
	Faculty of Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

In the unsaturated polyester resin manufacturing has low efficiency partial condenser. Partial condenser has duty to protect ethylene glycol loss out of process. This project aims to study vapor liquid equilibrium of ethylene glycol and water binary system in the partial condenser . This project has reduce size of partial condenser for suitable in labatory by ratio of partial condenser designed and real partial condenser is 1:13. Experiment by no packing condenser and have packing, heat 90%(v/v) of ethylene glycol solution. When the temperature of ethylene glycol solution constant take sample for analysis composition of ethylene glycol. In term of calculation uses Raout's law with activity coefficient for prediction mole fraction of ethylene glycol in vapor phase and temperature . Another model is Van der Waal equation of state for finding the activity coefficient by uses bainary interaction parameter (k_{12}) equal 0.048. The calculation and experimental data have same trend so the result is the mathematic model can predict composition of ethylene in gas phase in various high of partial condenser. When consider effect of packing can result that packing 40%high of condenser and bulk density 90.91 kg/m^3 is the most efficiency to separate ethylene glycol from water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณะอาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณ และขอขอบคุณท่านผู้ให้ความช่วยเหลือดังนี้

นายพงศ์ประภาส ปิยมโนชา นายนิกร เกิดทองหลาง และนายเศรษฐการ พรมศิริ ที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำโครงงานวิจัยมาโดยตลอด

นายพิสันต์ ผลโพธิ์ สำหรับการจัดหาและซ่อมแซมเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

นายจักรพฤ หิรัญญสมบัติ สำหรับการจัดหาสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน

อนึ่งยังมีผู้มีพระคุณอีกหลายท่านที่คณะผู้จัดทำไม่ได้กล่าวนาม ถ้าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขอน้อมรับและกราบขออภัยมา ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

นายชาตรี สุนทรเสนาะ

นายเชาวรินทร์ หาดเจียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย.....2

1.3 ขอบเขตของโครงงานวิจัย.....2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงานวิจัย.....2

บทที่ 2 ทฤษฎี.....3

2.1 การผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว.....3

2.2 สมดุลวัฏภาค (phase equilibrium).....4

2.3 ฟิวกาซิตีและสัมประสิทธิ์ฟิวกาซิตี.....5

2.4 การคำนวณสมดุลสำหรับระบบไอ – ของเหลว.....6

2.5 แอกทิวิตีและสัมประสิทธิ์แอกทิวิตี.....7

2.6 กฎวัฏภาค.....8

2.7 สมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์ว (Van der Waals equation of state).....8

2.8 เครื่องมือสำหรับการหาข้อมูลสมดุลไอ – ของเหลว.....10

2.9 ตรรชนีหักเหและเครื่องวัดดรรชนีหักเห.....11

บทที่ 3 การทดลอง.....12

3.1 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา.....12

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา.....12

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา.....12

3.4 วิธีการทดลอง.....13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์การทดลอง.....13
3.4.2 การทดลองเพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน.....14
3.4.3 การทดลองศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลวในระบบสององค์ประกอบ.....14

บทที่ 4 ผลการทดลอง.....16
4.1 ผลการออกแบบชุดอุปกรณ์การทดลอง.....16
4.2 การสร้างกราฟมาตรฐาน.....17
4.3 การสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....18
4.4 ผลการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำภายในหอควบแน่นปราศจากวัสดุบรรจุ.....20
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่น.....20
4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำกับความสูง.....21
4.5 ผลการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในหอควบแน่นใส่วัสดุบรรจุ.....22
4.5.1 ผลจากการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่น (100% packing).....22
4.5.2 ผลจากการบรรจุวัสดุบรรจุในช่วง 40% ของหอควบแน่น(40%packing)).....24

บทที่ 5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....29
5.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ.....29
5.2 การทำนายสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ.....33

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....35
6.1 การออกแบบเครื่องมือการทดลอง.....35
6.2 ผลการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในหอควบแน่นใส่วัสดุบรรจุ.....35
6.3 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของเอททิลีนไกลคอลในน้ำ.....36
6.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย.....36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....37
ภาคผนวก.....38
ภาคผนวก ก. การคำนวณหาค่าคงที่ของสมการสภาวะแวนเดอร์วาล์ว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ.....39
ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าสัดส่วนโดยโมลของเอททิลีนไกลคอล ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ จากการทดลอง.....41
ภาคผนวก ค. ข้อมูลผลการทดลองของลีและคณะ.....44
ภาคผนวก ง. คำสั่งที่ใช้ในการคำนวณบนโปรแกรม Visual Basic 6.5.....45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอที่อุณหภูมิและความสูงต่างๆ.....19
ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่ปรับแก้ k_{12} และค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของหอควบแน่นปราศจากวัสดุบรรจุกับหอควบแน่นใส่วัสดุบรรจุ.....34
ตารางที่ ก.1 ค่าสัมบัติวิกฤติของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำที่ใช้ในการหาค่าคงที่ของสมการสภาวะแวนเดอร์วาล์ว.....39
ตารางที่ ก.2 ค่าคงที่สมาการสภาวะของแวนเดอร์วาล์วของเอททิลีนไกลคอลและน้ำ.....40
ตารางที่ ข.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้หาค่าสัดส่วนโดยโมลของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ.....41
ตารางที่ ข.2 ค่าคงที่ของสมการอองตวน (antoine equation) 42
ตารางที่ ข.3 ค่าสัดส่วนโดยโมลของเอททิลีนไกลคอลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....43
ดารางที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองของ ลีและคณะ[6].....44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว....3

รูปที่ 2.2 เครื่องวัดดรรชนีหักเห....11

รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องมือการทดลอง....13

รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว สำหรับเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ....16

รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบระหว่างค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำกับค่าดรรชนีหักเหของแสง....17

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของหอควบแน่นกับเวลา....18

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับอุณหภูมิ....19

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับอุณหภูมิเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองของลีและคณะ [6]....20

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่น....21

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับอุณหภูมิภายในหอควบแน่น....22

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่นเมื่อความหนาแน่นรวมต่างกัน โดยการใส่วัสดุบรรจุตลอดช่วงความสูงของหอควบแน่น....23

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอเมื่อ ความหนาแน่นรวมต่างกันโดยการบรรจุวัสดุบรรจุตลอดช่วงความสูงของหอควบแน่น....23

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำกับความสูงของหอควบแน่น เมื่อความหนาแน่นรวมต่างกันโดยการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่น....24

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่นเมื่อความหนาแน่นรวมต่างกันโดยการใส่วัสดุบรรจุในช่วงความสูง 0-40% ของหอควบแน่น....25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอเมื่อความหนาแน่นรวมต่างกันโดยการใส่วัสดุบรรจุในช่วงความสูง 0-40% ของหอควบแน่น.....25
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำกับความสูงของหอควบแน่นเมื่อความหนาแน่นรวมต่างกันโดยการใส่วัสดุบรรจุในช่วงความสูง 0 - 40% ของหอควบแน่น.....26
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงหอควบแน่น โดยเปรียบเทียบการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่นกับการใส่วัสดุบรรจุเพียง 40% ของหอควบแน่น.....27
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับความสูงของหอควบแน่น โดยเปรียบเทียบการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่นและการใส่วัสดุบรรจุเพียง 40% ของหอควบแน่นรูปที่ 5.1 แผนภาพขั้นตอนการประมาณค่า k_{12}.....30
รูปที่ 5.1 แผนภาพขั้นตอนการประมาณค่า k_{12}.....31
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลอง.....32
รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบ ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผลที่ได้จากการทดลองและผลที่จากการทดลองของลีและคณะ [6].....32
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของเอททิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอ – ของเหลวกับความสูงของหอควบแน่นโดยการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ ลีและคณะ [6].....33
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของเอททิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอกับความสูงของหอควบแน่นเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง.....34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงงานวิจัย

พอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester resin) มีคุณสมบัติพิเศษในการทนกรดทนด่าง เป็นสารผสมเพื่อเพิ่มความแข็งแรง นิยมนำมาทำเป็นวัสดุเคลือบผิวแผ่นหลังคาพลาสติก ไฟเบอร์เพื่อเสริมความแข็งแรง ในการผลิตสามารถทำได้ทั้งในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยฉีดขึ้นรูปให้เป็นลักษณะต่างๆ และยังมีการผสมสารเติมแต่ง เพื่อให้มีสีสันสวยงามหลากหลายแล้วแต่วัตถุประสงค์ของการใช้งาน

ในการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว โดยทั่วไปเป็นการทำปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ (monomer) ที่มีหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) 2 หมู่ขึ้นไปกับมอนอเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) 2 หมู่ขึ้นไป ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้คือน้ำ เรียกว่าการเกิดพอลิเมอร์แบบกลั่นตัว ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีการควบคุมอุณหภูมิค่อนข้างสูง โดยทั่วไปประมาณ 200 องศาเซลเซียส ในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะมีการปล่อยแก๊สเฉื่อยเข้าไปในระบบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของออกซิเจนกับพอลิเมอร์ เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิสูง นอกจากน้ำที่ระเหยออกมาแล้วยังมีมอนอเมอร์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาและพอลิเมอร์โมเลกุลเล็กๆระเหยขึ้นมาด้วย เมื่อรวมกับแก๊สเฉื่อยก็จะกลายเป็นไอของของผสม โดยจะเข้าสู่เครื่องควบแน่น (partial condenser) ซึ่งภายในแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนล่างเป็นหอควบแน่นแบบบรรจุ และส่วนบนเป็นเครื่องควบแน่นแบบรีฟลักซ์ ที่อุปกรณ์นี้ไอของของผสมเกิดสมดุลในหอควบแน่นแบบบรรจุที่มีการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้การลดอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นแบบรีฟลักซ์ ซึ่งทำให้พอลิเมอร์โมเลกุลเล็กๆ และมอนอเมอร์ส่วนใหญ่กลั่นตัวกลับไปที่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยาต่อ ส่วนน้ำและมอนอเมอร์ที่เหลือจะถูกลดอุณหภูมิจนกลั่นตัวหมดที่อุปกรณ์ตัวต่อไปเรียกว่า เครื่องควบแน่นรวม น้ำและมอนอเมอร์ที่กลั่นตัวเป็นของเหลวนี้จะถูกส่งไปบำบัด ส่วนแก๊สเฉื่อยจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ จากระบบการผลิตที่กล่าวมาหากศึกษาสมดุลที่เกิดในเครื่องควบแน่น จะทราบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับสัดส่วนโดยโมลของสารละลายสารที่สนใจทั้งใน

วัฏภาคไอ และวัฏภาคของเหลวซึ่งจะทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการปฏิบัติการเพื่อลดการสูญเสียของมอนอเมอร์ที่จะออกนอกระบบและไม่กระทบกับคุณภาพของสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัย

1. ศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

2. ออกแบบสร้างหอควบแน่นจำลองเพื่อศึกษาสภาวะต่างๆ ที่มีผลต่อการแยกเอททิลีนไกลคอล จากน้ำ

3. พัฒนาและปรับปรุงหอควบแน่นที่ใช้ในการแยกเอททิลีนไกลคอลจากน้ำ เพื่อลดการสูญเสีย เอททิลีนไกลคอลออกจากหอควบแน่น ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว

1.3 ขอบเขตของโครงงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลวของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบ

2. สัดส่วนของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำที่ทำการศึกษา คือ 90:10 ตามลำดับ โดยจะทำการศึกษาที่สภาวะความดันคงที่ 1 บรรยากาศ

3. ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาข้อมูลที่สภาวะสมดุลของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ คือ 100-110 องศาเซลเซียส เนื่องจากข้อจำกัดทางเครื่องมือที่ใช้

4. ในส่วนของการออกแบบหอควบแน่นเพื่อใช้ในการศึกษาขนาดของหอควบแน่นที่ออกแบบจะมีการลดขนาดให้เป็นสัดส่วนกับหอควบแน่นที่ใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมในอัตราส่วน 1:13

5. ในการศึกษาการแยกเอททิลีนไกลคอลจากน้ำจะทำการศึกษาในรูปแบบของสมดุลระหว่างวัฏภาคไอ - ของเหลว โดยไม่พิจารณาถึงปรากฏการการสกัดด้วยของเหลว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงานวิจัย

1. มีความรู้ความเข้าใจในสมดุลระหว่างวัฏภาคไอ – ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ ในระบบสององค์ประกอบ

2. ปรับปรุงกระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัวให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยสามารถลดการสูญเสียเอททิลีนไกลคอลในกระบวนการแยกเอททิลีนไกลคอลจากน้ำ

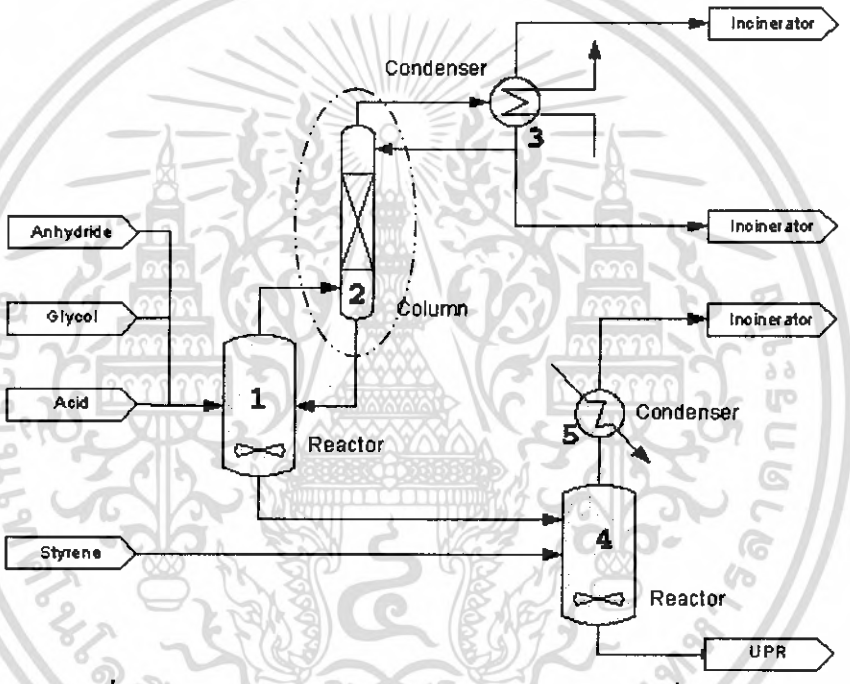
3. สามารถพัฒนาสมการที่เหมาะสมมาทำนายสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลใน วัฏภาคไอที่ตำแหน่งความสูงต่างๆของหอควบแน่น เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 การผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว [1]

พอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัวมีการใช้งานอย่างหลากหลายในการผลิตไฟเบอร์เสริมความแข็งแรง ทำวัสดุเคลือบผิว แผ่นหลังคาพลาสติกใส มีสมบัติทนกรดทนด่าง โดยในการผลิตสามารถทำได้ทั้งในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ สามารถขึ้นรูปให้เป็นลักษณะต่างๆได้ โดยการฉีดขึ้นรูปซึ่งจะมีการผสมสารเติมแต่งหรือสี เพื่อให้มีความสวยงามหลากหลายแล้วแต่วัตถุประสงค์ของการใช้งานโดยกระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัวแสดงดังรูปที่2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว [1]

หลักการในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว ขั้นแรกเริ่มโดยใช้กรด และเอทธิลีนไกลคอลทำปฏิกิริยาให้เกิดเป็นเอสเตอร์ ดังนี้

$$HOOCHC{=}CHCOOH{+}HOCH_2CH_2OH \rightarrow HOOCHC{=}CHCOOCH_2CH_2OH{+}H_2O$$

ในกระบวนการจริงจะมีการเกิดปฏิกิริยาเป็นลูกโซ่เชื่อมต่อกันไปเรื่อยๆ ทำให้ได้โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่าพอลิเอสเทอร์

+ acid + glycol + acid + glycol +... -> ...acidglycolacidglycol... + n water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการนี้ทำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมินี้ทำให้น้ำระเหย และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ความหนืดของสารเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นในการปฏิบัติจริงจึงต้องควบคุมภาวะต่างๆอย่างละเอียด

ขั้นตอนต่อมาพอลิเอสเทอร์จะถูกทำให้เจือจางโดยสไตรีนและมีการเติมสารเติมแต่งในขั้นนี้ด้วย โดยในขั้นนี้จะควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงมากจนเกินไปเพื่อป้องกันไม่ให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแข็งตัว สาเหตุที่ใช้สไตรีนในการทำให้เจือจางเพราะสไตรีนสามารถเป็นตัวทำละลายกับโมเลกุลของกรดมาเลอิก (maleic acid) ได้เพราะกรดมาเลอิกมีพันธะคู่ในโมเลกุลหรือเป็นโมเลกุลที่มีพันธะคู่ จึงเรียกกันว่าเป็นพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว เมื่อโมเลกุลของสไตรีนและกรดมาเลอิกเกิดปฏิกิริยากันที่พันธะคู่แล้วจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง ตรงกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเอสเทอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัวดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์โดยทำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าในกระบวนการนี้จะมีน้ำเกิดขึ้นในปฏิกิริยา โดยน้ำที่เกิดขึ้นจะระเหยออกจากระบบ อีกทั้งจะมีปริมาณไอของเอทธิลีนไกลคอลซึ่งมีจุดเดือด 198 องศาเซลเซียส ระเหยออกจากระบบด้วยจึงทำให้เกิดการสูญเสียเอทธิลีนไกลคอลบางส่วนจากกระบวนการนี้ ดังนั้นในโครงงานนี้จึงทำการศึกษาในส่วนของการแยกเอทธิลีนไกลคอลจากน้ำ

กระบวนการแยกสารดังกล่าว อาศัยหลักการที่สารองค์ประกอบหนึ่งกระจายระหว่างวัฏภาคทั้งสองที่อยู่อย่างสมดุลไม่เท่ากันดังเช่นน้ำกับเอทธิลีนไกลคอล จากธรรมชาติของระบบดังกล่าวทำให้สามารถสร้างกระบวนการกลั่นแบบเรคทิฟิเคชั่น (rectification) เพื่อให้น้ำสะสมอยู่ในวัฏภาคไอมากขึ้นตามลำดับของความสูงของหอกลั่น เนื่องจากความดันไอของน้ำที่มีค่ามากกว่าความดันไอของเอทธิลีนไกลคอล ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์แยกสารของกระบวนการต่างๆในอุตสาหกรรมจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลสมดุลวัฏภาค (phase equilibrium data) เพื่อให้การแยกเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 สมดุลวัฏภาค (phase equilibrium) [2]

ภายในระบบปิดใดๆซึ่งมีวัฏภาคต่างๆอยู่ แต่ละวัฏภาคเป็นระบบเปิดซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นหรือมวลเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามระบบปิดทั้งหมดต้องมีความเข้มข้นและมวลทั้งหมดคงที่ สำหรับสมดุลเกิดขึ้นในระบบทั้งหมดจำเป็นว่าสมดุลต้องเกิดสำหรับแต่ละวัฏภาคภายในระบบ ถ้าระบบสามารถรักษาภาวะปรกติของอุณหภูมิและความดันทำให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีต้องเป็นศูนย์ และไม่มีงานเกิดจากแรงภายนอก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีสำหรับระบบที่มี n องค์ประกอบ และ π วัฏภาค คือ

$$dG = \sum_{j} \left(-S^{(j)}dT + V^{(j)}dP + \mu_1^{(j)}dn_1^{(j)} + \ldots + \mu_n^{(j)}dn_n^{(j)} \right) \qquad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สำหรับอุณหภูมิและความดันคงที่

$$dG = \sum_j \left(\mu_1^{(j)} dn_1^{(j)} + ... + \mu_n^{(j)} dn_n^{(j)}\right) = 0 \tag{2.2}$$

สำหรับแต่ละองค์ประกอบ จำนวนโมลทั้งหมดคงที่

$$\left.\begin{aligned} dn_1^{(1)} &= -dn_1^{(2)} - dn_1^{(3)} - ... - dn_1^{(j)} \\ &\vdots \\ dn_n^{(1)} &= -dn_n^{(2)} - dn_n^{(3)} - ... - dn_n^{(j)} \end{aligned}\right\} \tag{2.3}$$

แทนที่สมการ 2.3 ในสมการที่ 2.2 สามารถแสดงได้ว่า

$$\left.\begin{aligned} \mu_1^{(1)} &= \mu_1^{(2)} = \mu_1^{(3)} = ... = \mu_1^{(n)} \\ &\vdots \\ \mu_n^{(1)} &= \mu_n^{(2)} = \mu_n^{(3)} = ... = \mu_n^{(j)} \end{aligned}\right\} \tag{2.4}$$

2.3 ฟิวกาซิตีและสัมประสิทธิ์ฟิวกาซิตี [2]

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

$$[d\overline{G}_i = d\mu_i = RTd\left(\ln \hat{f}_i\right)]_T \tag{2.5}$$

และ

$$\lim_{P\to 0} \frac{\hat{f}_i(P,T)}{y_i P} = 1 \tag{2.6}$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \hat{f}_1^{(1)} &= \hat{f}_1^{(2)} = \hat{f}_1^{(3)} = ... = \hat{f}_1^{(j)} \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \hat{f}_n^{(1)} &= \hat{f}_n^{(2)} = \hat{f}_n^{(3)} = ... = \hat{f}_n^{(j)} \end{aligned} \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ฟิวกาซิตีของแต่ละองค์ประกอบจะต้องเท่ากันในแต่ละวัฏภาคนี้มีประโยชน์มากกว่าสมการที่ 2.4 ของศักย์เคมี

ในทางปฏิบัตินิยมใช้สัมประสิทธิ์ฟิวกาซิตี (fugacity coefficient, ϕ) แทนฟิวกาซิตี นิยามของสัมประสิทธิ์ฟิวกาซิตี ของสารองค์ประกอบ i ในระบบของผสม คือ

$$\hat{\phi}_i = \frac{\hat{f}_i}{y_i P} \tag{2.8}$$

จากสมการสถานะทั่วไปโดยวิธีของ ลีเดอเซ็น ได้ว่า

$$\ln\phi = \int_0^P (Z-1)\frac{dP}{P} \tag{2.9}$$

ในการคำนวณอินทิกรัลของสมการ 2.9 นี้ที่ลิมิตต่ำ เมื่อ $Z/P \to \infty$ สมการถูกจัดใหม่เพื่อว่าลิมิตต่ำกว่าเป็นกรณีอุดมคติเมื่อ $\phi = 1$ ที่ความดันอ้างอิง P_0 ได้เป็น

$$\ln\phi = -\int_{P_0}^P \frac{1-Z}{P} dP \tag{2.10}$$

2.4 การคำนวณสมดุลสำหรับระบบไอ – ของเหลว [2]

การศึกษาระบบซึ่งเป็นโมเดลของสารละลายอุดมคติในทั้งวัฏภาคก๊าซและวัฏภาคของเหลว ระบบส่วนใหญ่เป็นโมเดลสารละลายอุดมคติสำหรับวัฏภาคก๊าซที่มีความดันต่ำถึงปานกลาง แต่ระบบส่วนน้อยเป็นสารละลายอุตมคติสำหรับวัฏภาคของเหลว

ในระบบของเหลวที่ประกอบไปด้วยสารประกอบใกล้เคียงกัน เช่น ไอโซเมอร์หรือพวกอนุกรมฮอมอโลกัส (เช่น ไฮโดรคาร์บอนพาราฟิน) พบว่าเป็นไปตามโมเดลสารละลายของเหลวอุดมคติ ดังนั้นสามารถประยุกต์สารละลายอุดมคติใช้กับระบบเกี่ยวกับอุตสาหกรรมปิโตรเลียม แต่สิ่งสำคัญก่อนการศึกษาระบบพวกนี้เราต้องทราบมโนทัศน์สมดุลวัฏภาคอย่างดีก่อนนำไปสู่การคำนวณอย่างละเอียด

ถ้าวัฏภาคไอและของเหลวอยู่ที่สมดุล การประยุกต์ภาวะฟิวกาซิตี

$$\hat{f}_i^V = \hat{f}_i^L \tag{2.11}$$

เมื่อโมเดลสารละลายอุดมคติประยุกต์กับแต่ละวัฏภาคจะได้

$$y_i f_i^V = x_i f_i^L \tag{2.12}$$

สำหรับองค์ประกอบใดๆ ฟิวกาซิตี f_i^V และ f_i^L ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน ดังอัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{f_i^L}{f_i^V} \tag{2.13}$$

K_i เป็นอัตราส่วนสมดุลสำหรับองค์ประกอบหนึ่งและสามารถคำนวณได้ง่ายเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความดัน

ขณะที่มีความเป็นไปได้ในการคำนวณฟิวกาซิตีองค์ประกอบบริสุทธิ์โดยตรง อย่างไรก็ตามที่ความดันต่ำ ฟิวกาซิตีถูกแทนที่ได้โดยเทอมความดันที่เหมาะสม ฟิวกาซิตี f_i^V ของก๊าซบริสุทธิ์กลายเป็นเทอมความดันของระบบ เมื่อทั้ง P และ P^{sat} ค่าต่ำทำให้ $f^L = f^{sat}$ และ f^{sat} กลายเป็นความดันไอ P^{sat} ดังนั้น ที่ความดันต่ำจึงสามารถเขียนสมการที่ 2.13 ได้เป็นสมการ $y_i P = x_i P_i^{sat}$ สมการนี้เรียกว่า กฎราอูลท์ (Raoult's law) กฎนี้สามารถเขียนใหม่ในรูปแบบสมการ 2.14 ได้ดังนี้

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{P_i^{sat}}{P} \tag{2.14}$$

กฎของราอูลท์ มีสมติฐานดังนี้ [3]

1. ระบบอยู่ที่ความดันต่ำสามารถแทนค่าฟิวกาซิตีด้วยความดันไอได้ สำหรับวัฏภาคไอ $\hat{f}_i$ แทนด้วย P ของระบบ สำหรับวัฏภาคของเหลว f_i^L แทนด้วยความดันไอของสารบริสุทธิ์ P_i^{sat} ที่อุณหภูมิของระบบ

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

3. วัฏภาคของเหลวเป็นสารละลายอุดมคติ (ideal solution) ดังนั้นสัมประสิทธิ์แอคทิวิตี (activity coefficient) มีค่าเท่ากับ 1 ($\gamma_i^L = 1$)

เนื่องจากกฎของราอูลท์มีสมมติฐานสำหรับสารละสายอุดมคติ ดังนั้นเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับสารละลายจริงมากขึ้นจึงได้มีการปรับแก้กฎของราอูลท์ โดยการเพิ่มสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีเข้ามาคูณในส่วนของวัฏภาคของเหลว ดังสมการที่ 2.15

$$y_i P = \gamma_i x_i P_i^{sat} \tag{2.15}$$

2.5 แอคทิวิตีและสัมประสิทธิ์แอคทิวิตี [3]

แอคทิวิตี (activity) คือพารามิเตอร์ไม่มีหน่วยซึ่งค่าของมันขึ้นกับสถานะมาตรฐาน แอคทิวิตีเป็นประโยชน์ เนื่องจากสามารถเชื่อมโยงกับพารามิเตอร์ของส่วนประกอบ เช่น เศษส่วนโมล กับ ความเข้มข้นหรือกับความดันย่อย

นิยามแอคทิวิตี คือ อัตราส่วนของฟิวกาซิตีของสารประกอบที่สถานะหนึ่งหารด้วยฟิวกาซิตีที่สถานะอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left[a_i = \frac{\hat{f}_i}{f_i^0} \right]_T \tag{2.16}$$

สัมประสิทธิ์แอคทิวิตี (activity coefficient) เป็นแฟกเตอร์แก้ไขซึ่งวัดการเบี่ยงเบนของสารละลายจากพฤติกรรมอุดมคติสำหรับสถานะมาตรฐานหนึ่ง นิยามในวิธีการต่างๆเทียบกับพารามิเตอร์ความเข้มข้นแบบต่างๆ

$$\gamma_i = \frac{a_i}{x_i} = \frac{\hat{f}_i}{f_i^0 x_i} \tag{2.17}$$

$$\gamma_i' = \frac{a_i'}{x_i} = \frac{\hat{f}_i'}{f_i^0 x_i} \tag{2.18}$$

สัมประสิทธิ์แอคทิวิตี มักเป็นอัตราส่วนอย่างง่ายของแอคทิวิตีกับพารามิเตอร์ความเข้มข้น เมื่อเทียบกับองค์ประกอบบริสุทธิ์ดังสมการ 2.17 เมื่อเทียบกับเศษส่วนโมลที่มีความเจือจางอนันต์ดังสมการ 2.18

2.6 กฎวัฏภาค [3]

กิบส์เสนอกฎวัฏภาคที่สำคัญครอบคลุมตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับปริมาณ (intensive) จำนวนหนึ่งซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงในระบบสมดุลโดยไม่เปลี่ยนแปลงจำนวนวัฏภาค หรือจำนวนองค์ประกอบจำนวนตัวแปรที่สามารถเปลี่ยนแปลงโดยไม่เปลี่ยนจำนวณวัฏภาคหรือองค์ประกอบเรียกว่า "จำนวนระดับขั้นความเสรี" (number of degree of freedom, F) ของระบบดังนี้

$$F = 2 - \pi + N \tag{2.19}$$

เมื่อ π คือจำนวนวัฏภาค

N คือจำนวนองค์ประกอบ

2.7 สมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์ว (Van der Waals equation of state) [4]

เป็นสมการประยุกต์ของสมการสภาวะโดยมีลักษณะสมการดังนี้

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2} \tag{2.20}$$

โดยที่ค่า a และ b เป็นค่าคงที่สำหรับสมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์ว

ที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ก๊าซจริงจะมีพฤติกรรมเบี่ยงเบนจากก๊าซอุดมคติ แวนเดอร์วาล์วใช้สมมติฐานของก๊าซจริง 2 ข้อ ในการหาสมการสภาวะของก๊าซจริงกล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ปริมาตรของอนุภาคก๊าซสามารถละทิ้งได้ (อนุภาคของก๊าซมีขนาดเล็กมาก)

2. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของก๊าซมีค่าเท่ากับศูนย์

สมมติฐานข้อแรกมีความเป็นไปได้เมื่อความดันมีค่าเข้าใกล้ 1 บรรยากาศและก๊าซนั้นต้องเป็นก๊าซที่อัดตัวได้ (compressed gas) ที่ความดันปกติ ปริมาตรที่ปกคลุมอนุภาคก๊าซอยู่นั้นสามารถละทิ้งส่วนเล็กน้อยของปริมาตรอนุภาคก๊าซได้ แต่ที่ความดันสูงจะไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากก๊าซจริงนั้นจะไม่สามารถอันตัวที่ความดันสูง ทำให้ปริมาตรของก๊าซจริงจะมีค่ามากกว่าก๊าซอุดมคติ สมการสภาวะของก๊าซอุดมคติ โดยเสนอค่าคงที่ b คือปริมาตรภายในอนุภาคก๊าซที่ถูกอนุภาคก๊าซเทอมที่จะนำไปลบออกจากปริมาตรของก๊าซจริงคือ nb โดยที่ค่า $(V-nb)$ ในสมการ คือปริมาตรภายนอกที่ปกคลุมอยู่ไม่นับรวมปริมาตรภายในของก๊าซ เพราะฉะนั้นสมการสภาวะของก๊าซอุดมคติจะเปลี่ยนไป คือ

$$P(V-nb)=nRT \tag{2.21}$$

สำหรับสมมติฐานที่ 2 จะไม่เป็นจริงกับก๊าซจริงซึ่งถ้าสมมติฐานเป็นจริงก๊าซจริงจะไม่สามารถควบแน่นเป็นของเหลว ในความเป็นจริงจะมีแรงน้อยๆดึงดูดระหว่างโมเลกุลของก๊าซเพื่อที่จะยึดจับโมเลกุลก๊าซไว้ด้วยกัน ซึ่งก่อให้เกิดผล 2 ประการคือ

1. ก๊าซควบแน่นเพื่อฟอร์มตัวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ
2. ความดันของก๊าซจริงจะมีค่าน้อยกว่าก๊าซอุดมคติ

เหตุผลที่ความดันของก๊าซจริงน้อยกว่าก๊าซอุดมคติ คือก๊าซจริงจะมีแรงแรงหนึ่งดึงดูดอนุภาคไว้ด้วยกัน ทำให้โอกาสการชนกันของอนุภาคและผนังที่บรรจุน้อยลงความดันที่ได้จึงน้อย สำหรับก๊าซอุดมคติซึ่งไม่มีแรงดึงดูดอนุภาค ทำให้อนุภาคชนกันเองมากขึ้นรวมถึงชนผนังภาชนะบรรจุมากขึ้นด้วย ทำให้ความดันมีค่ามาก และเนื่องจากก๊าซจริงมีค่าความดันน้อยกว่าความดันของก๊าซอุดมคติ แวนเดอร์วาล์วจึงทำการบอกค่าความดันด้วยเทอมหนึ่ง โดยเทอมนี้จะประกอบด้วยค่าคงที่ a อยู่ในรูป $\frac{aN^2}{V^2}$

เพราะฉะนั้นจะได้สมการแวนเดอร์วาล์วที่สมบูรณ์ดังนี้

$$\left[P+\frac{an^2}{V^2}\right](V-nb)=nRT \tag{2.22}$$

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของเอททิลีนไกลคอล สามารถหาได้โดยใช้สมการแวนเดอร์วาล์ว ที่ถูกพัฒนาโดย V.I.Harismaidis ดังนี้

$$\ln\gamma_1=\left[\ln\left(\frac{V_1-b_1}{V_2-b_2}\right)+1-\left(\frac{b_2-2b_{12}}{V_2-b_2}\right)\right]+\left[\frac{a_1}{V_1RT}-\frac{a_{12}}{V_2RT}\right] \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า a และค่า b เป็นค่าคงที่ของสมการแวนเดอร์วาล์ว และ V คือค่าปริมาตรจำเพาะโดยตัวแปรที่มีตัวห้อย 1 และ 2 แสดงค่าตัวแปรของแวนเดอร์วาล์วของสารละลายผสมที่ได้จากการใช้กฎการผสมแบบควอดราติก (Quadratic mixing rule) มาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยคำนวณหาค่าคงที่ของสมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์ว สำหรับสารละลาย โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

$$a_{ij} = \sqrt{a_i a_j}(1 - k_{ij}) \tag{2.24}$$

โดย $k_{ij}=k_{ji}$

$$b_{ij} = \frac{b_i + b_j}{2} \tag{2.25}$$

ซึ่ง a_{ij}, b_{ij} คือค่าคงที่ของสมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์วสำหรับสารละลาย

a_i, b_i คือค่าคงที่ของสมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์วสำหรับสารชนิดที่ 1

a_j, b_j คือค่าคงที่ของสมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์วสำหรับสารชนิดที่ 2

k_{ij} คือค่าปรับแก้ของสมการ (binary interaction parameter)

โดย a_i , a_j , b_i , b_j เรียกว่าตัวแปรขององค์ประกอบเดียว (pure-component parameter) หาได้จากสมบัติของสารเดี่ยวเท่านั้น

2.8 เครื่องมือสำหรับการหาข้อมูลสมดุลไอ – ของเหลว [3]

1. เครื่องมือแบบสถิต (static apparatus) หลักการ คือยอมให้ไอและของเหลวเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิกำหนด แล้ววัดความดันและเก็บตัวอย่างแต่ละวัฏภาค ตัวอย่างจะนำไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบ วิธีการนี้เข้าสู่สมดุลโดยการเร่งได้โดยการกวนเชิงกลภาวะสมดุลหาได้โดยการอ่านค่าความดัน เครื่องเมือชนิดนี้เหมาะในการหาข้อมูลอุณหภูมิคงที่แต่มีความยุ่งยากในการไล่ไอออกไปจากระบบเพื่อให้การอ่านค่าความดันเชื่อถือได้

2. เครื่องกลั่นแบบไหลเวียน (circulating apparatus) หลักการ คือไอเกิดจากหม้อต้มโดยการให้ความร้อน จากนั้นไอที่ได้จะไหลเข้าสู่คอนเดนเซอร์และกลั่นตัวทั้งหมดไหลกลับโดยความโน้มถ่วงกลับเข้าหม้อต้ม ดังนั้นเป็นการไหลเวียนอย่างต่อเนื่องของไอเราสามารถปรับความดันและค่าคงที่ของอุณหภูมิเพื่อกำหนดภาวะสมดุล สุดท้ายเก็บตัวอย่างของเหลวและไอที่กลั่นตัวเพื่อการวิเคราะห์ส่วนประกอบ เพื่อความมั่นใจว่าระบบเข้าสู่สมดุลไอที่เกิดขึ้นจะถูกบังคับให้ไหลผ่านหลอดซึ่งเก็บ slug ของของเหลว หลังจากไหลผ่านตลอดความยาวหลอดของผสม ของเหลว - ไอ สมมติว่าอยู่ที่สมดุลทำให้อ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์หรือเทอร์โมคัปเปิลบอกอุณหภูมิสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ดรรชนีหักเหและเครื่องวัดดรรชนีหักเห [3]

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่ง เช่นอากาศหรือแก้วเข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่ง เช่น ของเหลว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือถ้ามุมตกกระทบไม่เท่ากับ 90 องศา แสงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของการเคลื่อนที่ หากเรากำหนดค่าของอินเตอร์วัฏภาคมุมตกกระทบ อุณหภูมิ และความยาวคลื่นแสง ค่าการเบี่ยงเบนหรือค่าหักเหจะขึ้นกับองค์ประกอบของของเหลวนั้นๆ

ถ้าสารตัวอย่างโปร่งแสงสามารถวัดค่าการสะท้อนที่มีค่าใกล้กับมุมวิกฤตของอินเตอร์วัฏภาคของแก้วและสารละลายตัวอย่าง

ถ้าสารตัวอย่างขุ่นสามารถวัดได้จากการสะท้อนที่มีค่าใกล้กับมุมวิกฤตของอินเตอร์วัฏภาคของแก้วและสารตัวอย่าง

รูปที่ 2.2 เครื่องวัดดรรชนีหักเห [5]

เครื่องวัดดรรชนีหักเห (refractometer) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าการหักเหของแสง รูปที่ 2.2 โดยมีหลักการ คือเมื่อลำแสงถูกโฟกัสไปยังจุดหนึ่งในของเหลวทำให้เกิดลักษณะรูปทรงกรวยของแท่งที่ปริซึม มุมวิกฤตที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ ในของเหลว เมื่อมุมวิกฤตเปลี่ยนแปลงทำให้อัตราส่วนของการสะท้อนและการหักเหของแสงเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องวัดแสง ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่าดรรชนีหักเหของแสงโดยทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา

1. สมดุลระหว่างวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ

2. ความสัมพันธ์ของสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอกับความสูงของหอควบแน่นที่ตำแหน่งต่างๆ

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา

1. น้ำกลั่น
2. เอททิลีนไกลคอล

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

1. ชุดอุปกรณ์การทดลอง ประกอบด้วย
- หอควบแน่น (ท่อสแตนเลสสตีล)
- เครื่องควบแน่น
- เทอร์โมคัปเปิล ชนิด เค
- หลอดรูเล็กสำหรับเก็บตัวอย่าง (capillary)
- บิวเรต
- ขวดก้นกลมสามคอ (three – necks round bottom flask) ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- เครื่องให้ความร้อนอิเลคโตรเทอร์มอล รุ่น EM0500/C MK5 ขนาด 200 วัตต์
- ปั๊มน้ำ
- สายยางและข้อต่อ
- ชุดขาตั้งและแขนจับ
- ฝอยสแตนเลส
- ตะกั่วทรงกระบอก

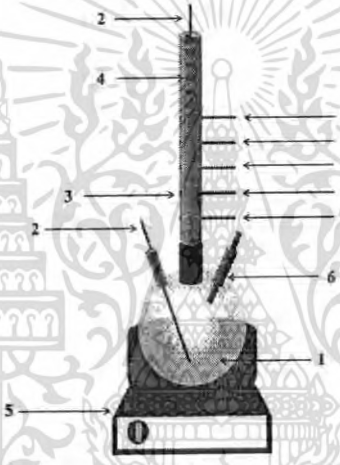
2. เครื่องวัดดรรชนีหักเหของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์การทดลอง

การออกแบบอุปกรณ์ได้ลดขนาดของเครื่องควบแน่นลงเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยมีอัตราส่วนของเครื่องควบแน่นที่ใช้ในห้องปฏิบัติการกับเครื่องควบแน่นจริงในโรงงานอุตสาหกรรมเป็น 1:13 หอควบแน่นจำลองประกอบไปด้วยท่อสแตนเลสสตีล ที่มีความยาว 30 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 32 มิลลิเมตร มีช่องสำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (type K) และสำหรับเก็บตัวอย่าง 5 ช่อง แต่ละช่องห่างกัน 3 เซนติเมตร ส่วนบนมีชุดควบแน่นทำจากท่อทองแดงขดเป็นเกลียว และมีอิเลคโตรเทอร์มอล รุ่น EM0500/C MK5 ขนาด 200 วัตต์ เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่สารละลาย จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนเป็นแผนภาพเครื่องมือ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องมือการทดลอง

จากรูปที่ 3.1 คือการออกแบบชุดอุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยมีหมายเลขแสดงถึงส่วนประกอบต่างๆของอุปกรณ์ ดังนี้

หมายเลข 1 ขวดก้นกลมสามคอ

หมายเลข 2 เทอร์โมคัปเปิล

หมายเลข 2.1 คือ ตำแน่งความสูง 20% ของหอควบแน่น อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จะเรียกว่า T_1

หมายเลข 2.2 คือ ตำแน่งความสูง 40% ของหอควบแน่น อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จะเรียกว่า T_2

หมายเลข 2.3 คือ ตำแน่งความสูง 60% ของหอควบแน่น อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จะเรียกว่า T_3

หมายเลข 2.4 คือ ตำแน่งความสูง 80% ของหอควบแน่นอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จะเรียกว่า T_4

หมายเลข 2.5 คือ ตำแน่งความสูง 100%ของหอควบแน่นอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จะเรียกว่า T_5

หมายเลข 3 ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง

หมายเลข 4 เครื่องควบแน่น

หมายเลข 5 เครื่องให้ความร้อน electro thermal รุ่น EM0500/C MK5 ขนาด 200 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลข 6 อุปกรณ์เติมสาร

3.4.2 การทดลองเพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน

เนื่องจากการหาค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลที่ได้จากการทดลองนั้น สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดดรรชนีหักเหแสง ดังนั้นจึงต้องทำการหาความสัมพันธ์ของดรรชนีหักเหของแสง กับ สัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ เพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำได้ดังนี้

1. เตรียมสารละลายเอททิลีนไกลคอล ที่ความเข้มข้น 0, 10, 20,...,100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

2. นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดค่าดรรชนีหักเหแสงโดยใช้เครื่องวัดค่าดรรชนีหักเหแสง

3. นำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดรรชนีหักเหแสงกับสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำเพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการเปรียบเทียบ

3.4.3 การทดลองศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลวในระบบสององค์ประกอบ

การทดลองเพื่อศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลวในระบบสององค์ประกอบนี้ มีจุดประสงค์เพื่อจะหาความสัมพันธ์ 3 ชนิด คือ

- ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา
- ความสัมพันธ์ระหว่าง ความสูงของหอควบแน่นกับอุณหภูมิ
- ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ กับสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอ

โดยการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ ข้างต้นนั้นจะทำการทดลองแบ่งเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลายเอททิลีนไกลคอลเข้มข้น 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2. เทสารละลายลงในขวดก้นกลมสามคอ

3. เปิดเครื่องให้ความร้อน พร้อมทั้งบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ

4. รอจนกระทั่งอุณหภูมิของสารละลายคงที่ แล้วจึงทำการเก็บสารตัวอย่างโดยใช้หลอดรูเล็ก

5. นำสารตัวอย่างที่เก็บได้ไปอ่านค่าการหักเหแสงโดยใช้เครื่องวัดดรรชนีหักเหของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. บันทึกผล

7. เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ ลีและคณะ [6]

ตอนที่ 2 การทดลองโดยไม่ใส่วัสดุบรรจุ (packing)

ทำการทดลองเช่นเดียวกันขั้นตอนที่ 1-6 ของการทดลองตอนที่ 1

ตอนที่ 3 การทดลองโดยใส่วัสดุบรรจุ

การทดลองแบบใส่วัสดุบรรจุ ทำในสองลักษณะ ดังนี้

1. ใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอดูดซับแน่น (100% ของความสูงหอดูดซับแน่น)

2. ใส่วัสดุบรรจุในส่วนล่างของหอดูดซับแน่น (40% ของความสูงหอดูดซับแน่น)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ใส่วัสดุบรรจุลักษณะต่างๆ กันดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

2. ทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

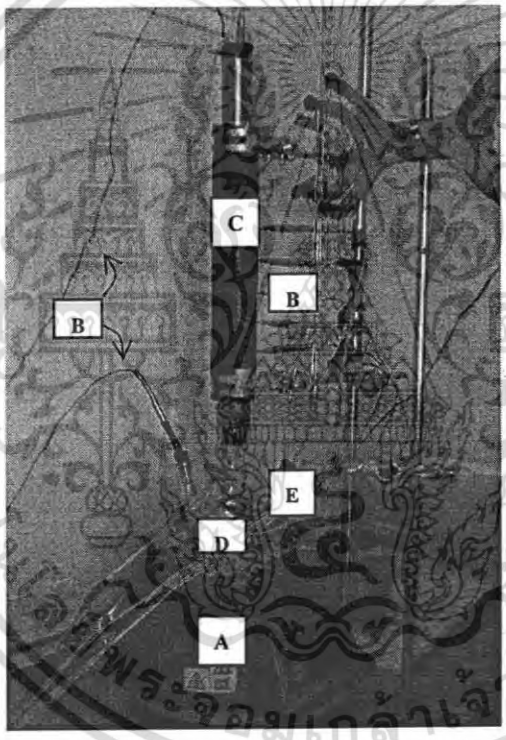
บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการนำเสนอผลการทดลองของโครงงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลวของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบ โดยใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นซึ่งให้ผลดังนี้

4.1 ผลการออกแบบชุดอุปกรณ์การทดลอง

จากการออกแบบชุดอุปกรณ์การทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4.1 สำหรับเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีลักษณะดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ

A คือ เครื่องให้ความร้อน electro thermal EM0500/C MK5 ขนาด 200 วัตต์

B คือ เทอร์โมคัปเปิลชนิด เค

C คือ หอควบแน่น

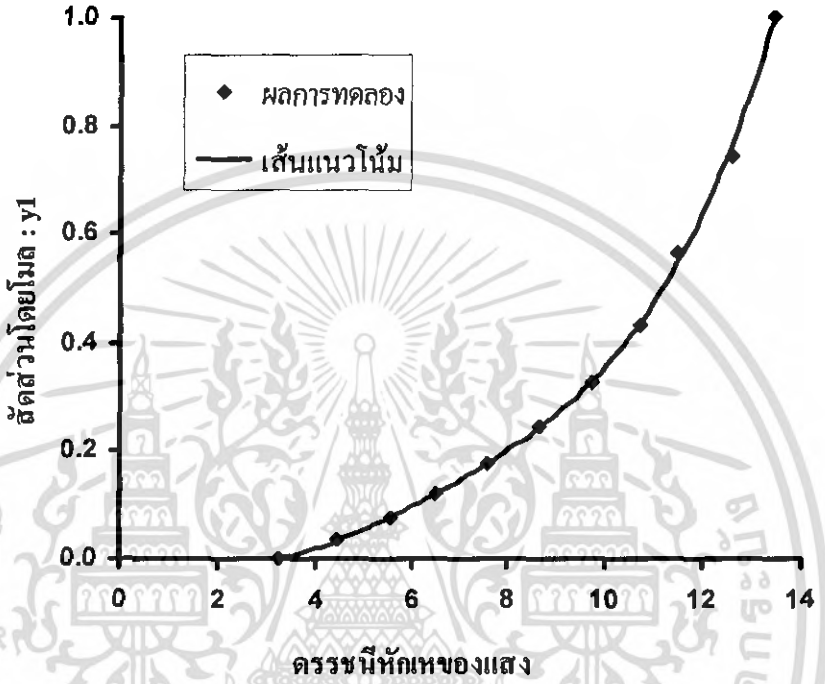
D คือ ขวดก้นกลม 3 คอ (three – necks round bottom flask) ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

E คือ บิวเรตเติมสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างกราฟมาตรฐาน

ในการสร้างกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำกับค่าดรรชนีหักเหแสง จากเครื่องวัดดรรชนีหักเหของแสง สามารถสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำกับค่าดรรชนีหักแหของแสงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบระหว่างค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำกับค่าดรรชนีหักเหของแสง

จากรูปที่ 4.2 เมื่อความเข้มข้นหรือสัดส่วนของเอททิลีนไกลคอลในน้ำมาก จะทำให้ค่าการหักแหของแสงที่วัดได้โดยเครื่องวัดดัชนีหักเหของแสงมีค่ามาก เนื่องจากมุมหักเหของแสงขึ้นอยู่กับความขุ่นของสารละลาย เมื่อองค์ประกอบของเอททิลีนไกลคอลในน้ำที่มากขึ้นทำให้สารละลายมีความขุ่นมากขึ้น โดยสมการที่แสดงเส้นแนวโน้มสำหรับหาสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ คือ

$$y_1 = 0.0001x^4 - 0.0035x^3 + 0.0351x^2 - 0.1186x + 0.12 \qquad (4.1)$$

Y_1 คือ สัดส่วนโดยโมลของเอทิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอ

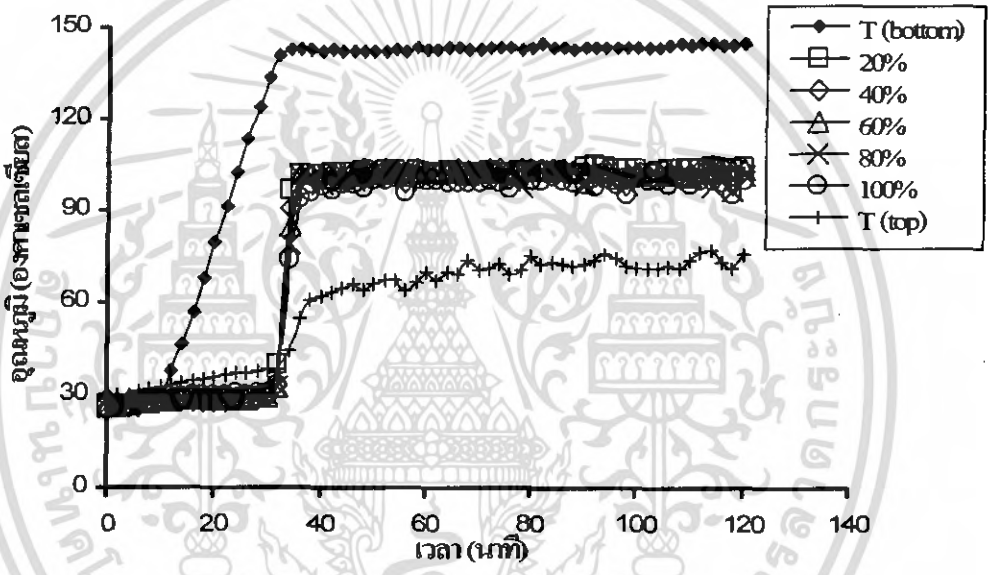
x คือ ค่าดรรชนีหักเหของแสงที่อ่านได้จากเครื่องวัดดรรชนีหักเหของแสง

สมการที่ 4.1 จะใช้สำหรับหาค่าสัดสัวนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
83203

4.3 การสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

จากอุปกรณ์การทดลองที่ออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้จากอุปกรณ์การทดลองมีความน่าเชื่อถือ จึงได้นำมาศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลวของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบ ที่เกิดขึ้นภายในหอควบแน่นเพื่อนำผลการทดลองในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอ มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยของ ลีและคณะ [6] ซึ่งค่าอุณหภูมิภายในหอควบแน่นที่ระดับความสูงต่างๆ จะใช้อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงที่ระบบเข้าสู่สมดุลโดยสามารถพิจารณาจุดสมดุลได้จากดังรูปที่ 4.3 พบว่าระบบจะเริ่มเข้าสู่สมดุลตั้งแต่นาทีที่ 40 เป็นต้นไป



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของหอควบแน่นกับเวลา

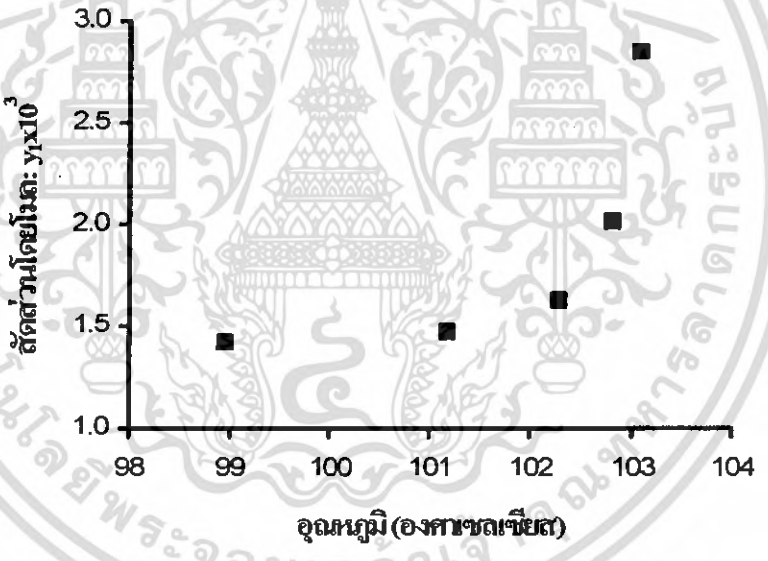
จากรูปที่ 4.3 ได้ทำการทดลองเก็บสารตัวอย่างที่ตำแหน่งร้อยละความสูงของหอควบแน่นต่างๆ นำไปวัดหาค่าดรรชนีหักเหของแสงเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานได้ความสัมพันธ์ของสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับอุณหภูมิ ดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอที่อุณหภูมิและความสูงต่างๆ

ความสูงของหอควบแน่น (%)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอ
20	103.07	0.0028
40	102.81	0.0020
60	102.28	0.0016
80	101.18	0.0015
100	98.96	0.0014

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 4.1 สร้างความสัมพันธ์ในรูปของกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับอุณหภูมิ

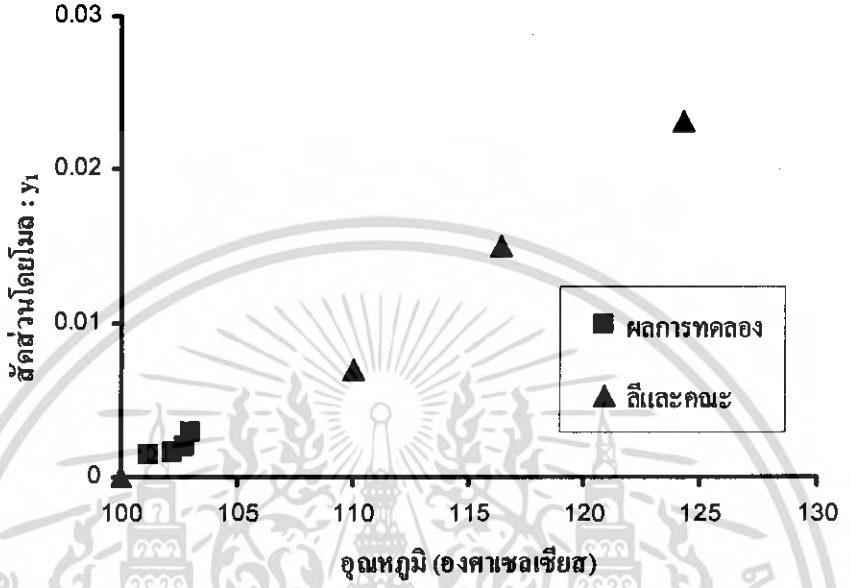
ตัวห้อย 1 แทนองค์ประกอบของเอททิลีนไกลคอล

ตัวห้อย 2 แทนองค์ประกอบของน้ำ

จากการศึกษางานวิจัยของลีและคณะ [6] ซึ่งศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลวของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบ ที่ความดันคงที่ 1 บรรยากาศ รายละเอียดของข้อมูลสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลว แสดงไว้ในภาคผนวก ค. เมื่อนำความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอที่ได้จากการทดลอง เทียบกับผลการทดลองของ ลีและคณะ [6] ดังรูปที่ 4.5 พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้ในการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลวของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบได้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับอุณหภูมิเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองของ ลีและคณะ [6]

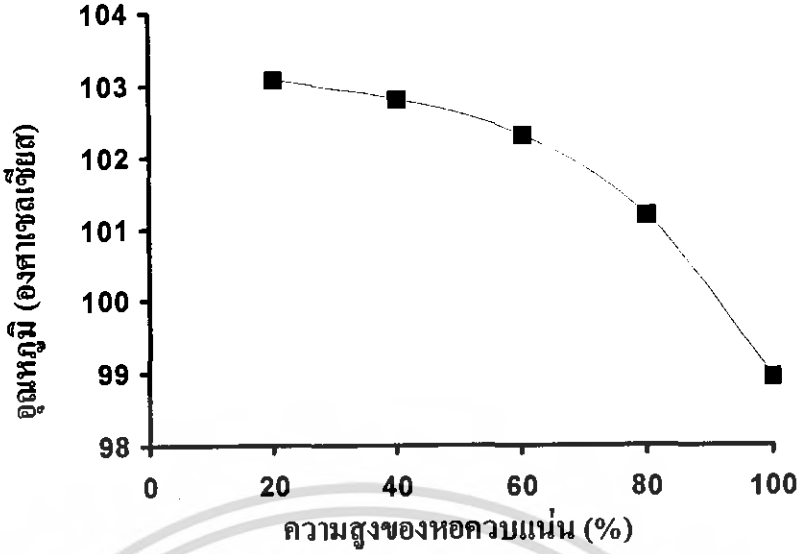
4.4 ผลการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำภายในหอควบแน่นปราศจากวัสดุบรรจุ

จากอุปกรณ์การทดลองที่ออกแบบและสร้างขึ้นได้นำมาศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลวของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในระบบสององค์ประกอบ ที่เกิดขึ้นภายในหอควบแน่น เพื่อหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่นและสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอ สามารถแสดงผลการทดลองที่ได้ดังนี้

4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่น

จากการทดลองวัดอุณหภูมิที่ความสูงตำแหน่งต่างๆ ของหอควบแน่นสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่นได้ดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่น

จากรูปที่ 4.6 เมื่อความสูงของหอควบแน่นเพิ่มขึ้นอุณหภูมิภายในหอควบแน่นจะลดลง ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิที่เป็นฟังก์ชันกับความสูงดังสมการที่ 4.2 ซึ่งสามารถใช้สมการดังกล่าวทำนายอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ได้

$$T(h) = -8.04\times10^{-4}(h)^2 + 4.71\times10^{-2}(h) + 102.37 \qquad (4.2)$$

$T(h)$ คือ อุณหภูมิภายในหอควบแน่นเป็นฟังก์ชันกับความสูง

h คือ ความสูงของหอควบแน่น (%) สามารถคำนวณได้จาก

$$h = \left(\frac{L}{L_0}\right)\times 100\,\% \qquad (4.3)$$

L_0 คือ ความสูงของหอควบแน่น

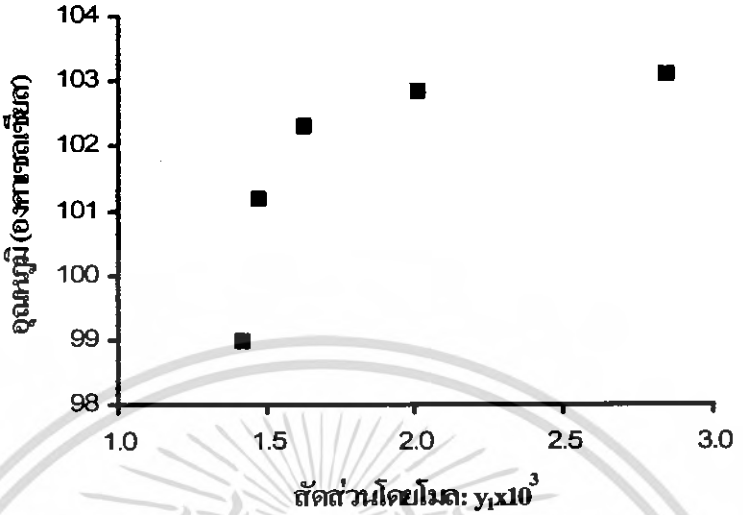
L คือ ความสูงของหอควบแน่นตำแหน่งที่พิจารณา

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอทธิลีนไกลคอลกับน้ำกับความสูง

ในการทดลองได้เก็บสารตัวอย่างนำไปวัดหาค่าดัชนีหักเหของแสงด้วยเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงเพื่อหาความเข้มข้นของเอทธิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอ จะพบว่าเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอทธิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอมีค่าลดลง โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละความสูงของหอควบแน่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของไอที่ระเหยขึ้นไป เมื่อสูงขึ้นปริมาณของสารที่ระเหยเป็นไอจะน้อยลงดังนั้นอุณหภูมิจึงลดลงตามระดับความสูง



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับอุณหภูมิภายในหอควบแน่น

4.5 ผลการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในหอควบแน่นใส่วัสดุบรรจุ

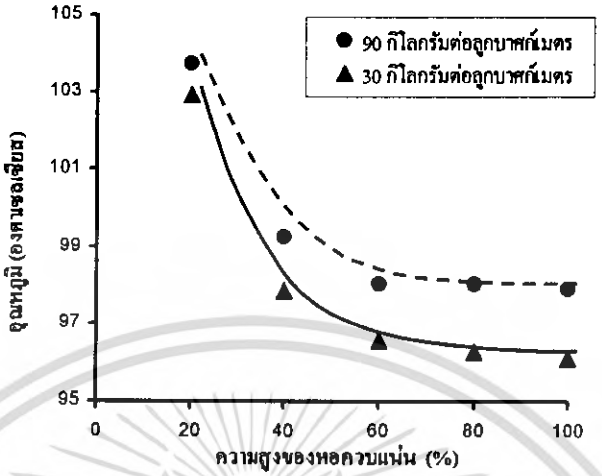
ในส่วนของการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำภายในหอควบแน่นปราศจากวัสดุบรรจุ ดังรูปที่ 4.6 พบว่าที่ระดับความสูง 0-40% ของหอควบแน่น อุณหภูมิจะลดลงอย่างช้าๆ และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความสูงมากกว่า 40% จึงได้มีการปรับเปลี่ยนวิธีการทดลองโดยการใส่วัสดุบรรจุ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงความสูงต่างๆ และเปรียบเทียบผลเนื่องจากความหนาแน่นรวม (bulk density) ของหอควบแน่นต่อความสามารถในการดักจับเอททิลีนไกลคอลออกจากน้ำ โดยวัสดุบรรจุที่ใช้เป็นฝอยสแตนเลส

4.5.1 ผลจากการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่น (100% packing)

การศึกษาการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงหอควบแน่นได้ทำการใส่วัสดุบรรจุให้มีลักษณะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงความสูงของหอควบแน่น เพื่อเปรียบเทียบผลของความหนาแน่นรวม จึงทำการทดลองเปรียบเทียบความหนาแน่นรวมสองค่าคือ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กับ 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่น ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าการใส่วัสดุบรรจุที่มี ความหนาแน่นรวม 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีอุณหภูมิเฉลี่ย 98 องศาเซลเซียส และการใส่วัสดุบรรจุที่มีความหนาแน่นรวม 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีอุณหภูมิเฉลี่ย 96 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยของความหนาแน่น

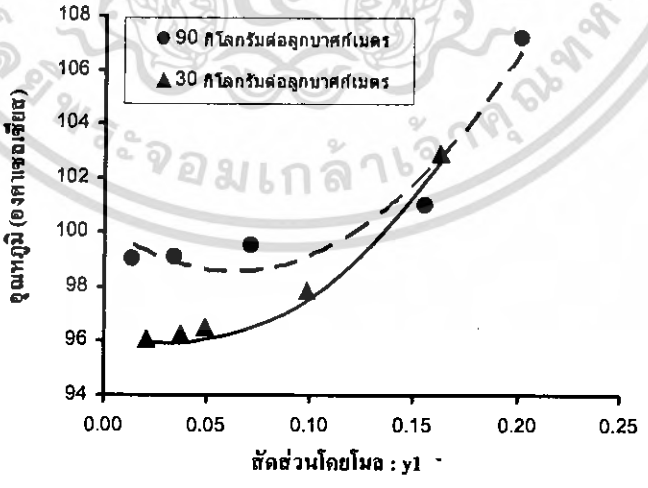
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมทั้งสองแตกต่างกัน 2 องศาเซลเซียส เนื่องจากผลของการนำความร้อนของวัสดุบรรจุที่ทำมาจากสแตนเลส ซึ่งมีค่าการนำความร้อนที่สูง ดังนั้นปริมาณของวัสดุบรรจุหรือ ความหนาแน่นรวมที่มากกว่าจะทำให้อุณหภูมิภายในหอควบแน่นสูงกว่า



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่นเมื่อ ความหนาแน่นรวมต่างกัน โดยการใส่วัสดุบรรจุตลอดช่วงความสูงของหอควบแน่น

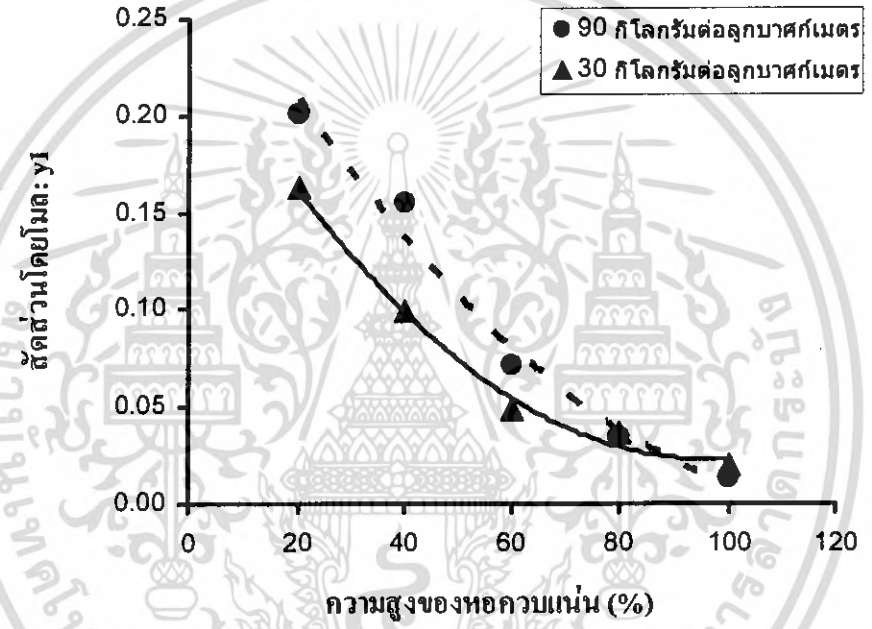
เมื่อศึกษาผลของสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอที่ลดลงซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.9 พบว่าการใส่วัสดุบรรจุที่มีความหนาแน่นรวม 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่มีช่วงอุณหภูมิ 99 – 107 องศาเซียลเซียส แต่การใส่วัสดุบรรจุที่มีความหนาแน่นรวม 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส คือ 96 – 102 องศาเซียลเซียส ดังนั้นการจึงมีความสามารถในการยอมปลดปล่อยน้ำน้อยกว่า



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอเมื่อ ความหนาแน่นรวมต่างกัน โดยการบรรจุวัสดุบรรจุตลอดช่วงความสูงของหอควบแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับร้อยละความสูงของหอควบแน่นดังรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อความสูงของหอควบแน่นมากขึ้นสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอจะมีค่าลดลงและที่ระดับความสูงเดียวกัน ความหนาแน่นรวมที่มากว่าจะมีสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏไอสูงกว่า โดยความแตกต่างจะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาแนวโน้มของกราฟเส้นทั้งสองพบว่าค่า ความหนาแน่นรวมที่มากกว่าจะมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ความหนาแน่นรวมที่น้อยกว่าจะมีแนวโน้มที่ลดลงในช่วงเริ่มต้นและจะมีแนวโน้มที่คงที่ในช่วงปลายของหอควบแน่น ดังนั้นจึงพบว่าการใส่วัสดุบรรจุเข้าไปในหอควบแน่นโดยที่ค่า ความหนาแน่นรวมที่มากกว่าจะมีประสิทธิภาพในการดักจับเอททิลีนไกลคอลที่ดีกว่า



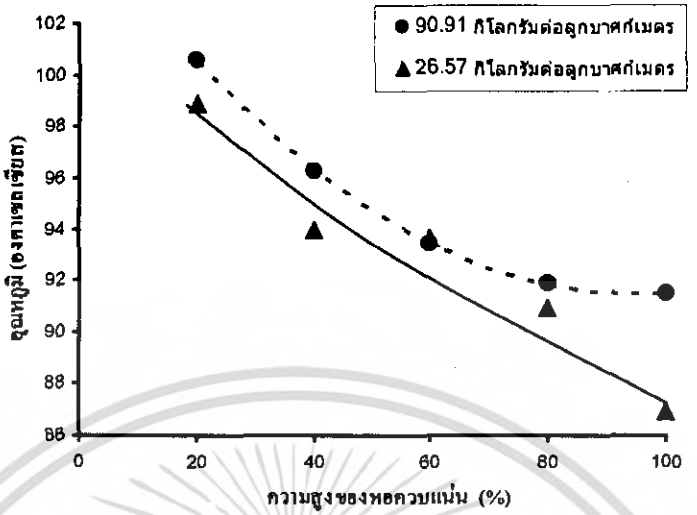
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ กับความสูงของหอควบแน่น เมื่อความหนาแน่นรวมต่างกันโดยการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่น

4.5.2 ผลจากการบรรจุวัสดุบรรจุในช่วง 40% ของหอควบแน่น (40% packing)

จากผลการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลวของเอททิลีนไกลคอลที่เกิดขึ้นภายในหอควบแน่นปราศจากวัสดุบรรจุ ดังรูปที่ 4.6 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ค่อนข้างน้อยในช่วงความสูง 0-40% ดังนั้นจึงมีการทดลองใส่วัสดุบรรจุในช่วง 0-40% ของหอควบแน่น เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่นดังรูปที่ 4.11 พบว่าให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับการใส่วัสดุบรรจุ

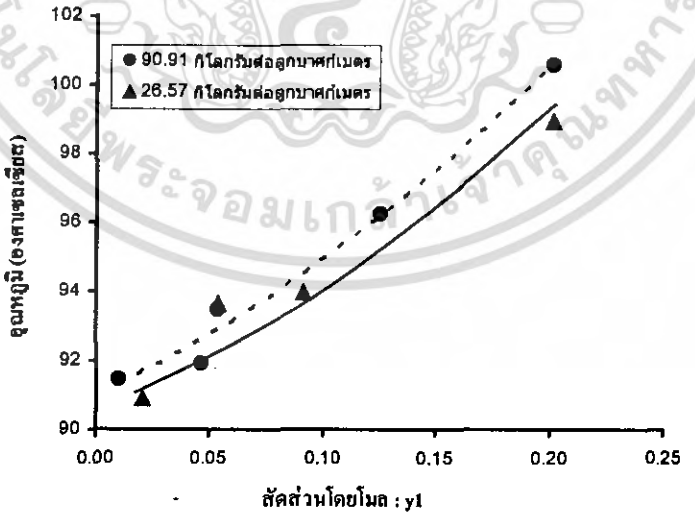
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เต็มความสูงของหอควบแน่น คือ การใส่วัสดุบรรจุ 90.91 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า การใส่วัสดุบรรจุ 26.57 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่นเมื่อ ความหนาแน่นรวมต่างกันโดยการใส่วัสดุบรรจุในช่วงความสูง 0-40% ของหอควบแน่น

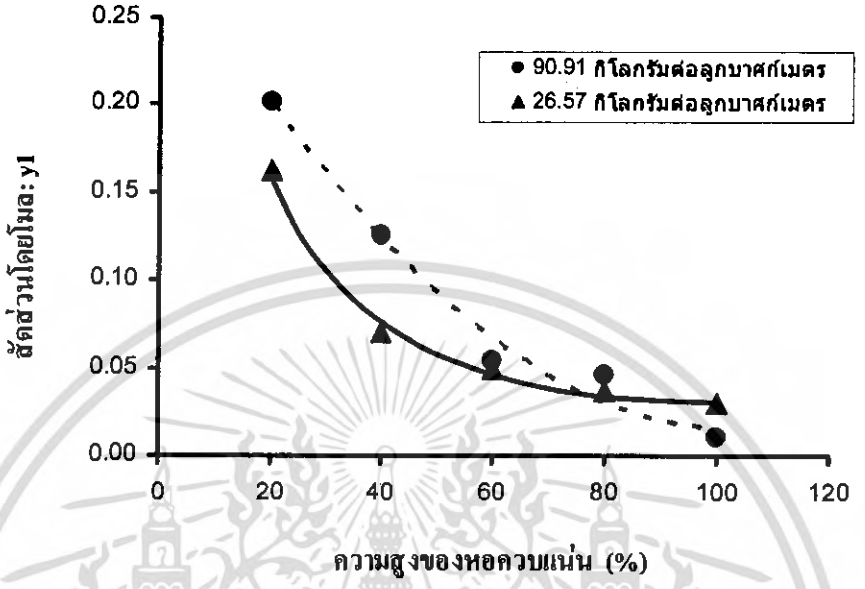
เมื่อศึกษาผลของสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอทธิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอที่ลดลงซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.12 พบว่ามีผลที่สอดคล้องกับการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่น นั่นคือ การใส่วัสดุบรรจุที่มีความหนาแน่นรวมมากกว่า (90.91 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) จะมีความสามารถในการยอมปลดปล่อยน้ำได้ดีกว่าการใส่วัสดุบรรจุที่มีความหนาแน่นรวมน้อย (26.57 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอทธิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอเมื่อความหนาแน่นรวมต่างกันโดยการใส่วัสดุบรรจุในช่วงความสูง 0-40% ของหอควบแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับร้อยละความสูงของหอควบแน่นดังรูปที่ 4.13 จะพบว่าให้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการใส่วัสดุบรรจุตลอดความสูงของหอควบแน่น

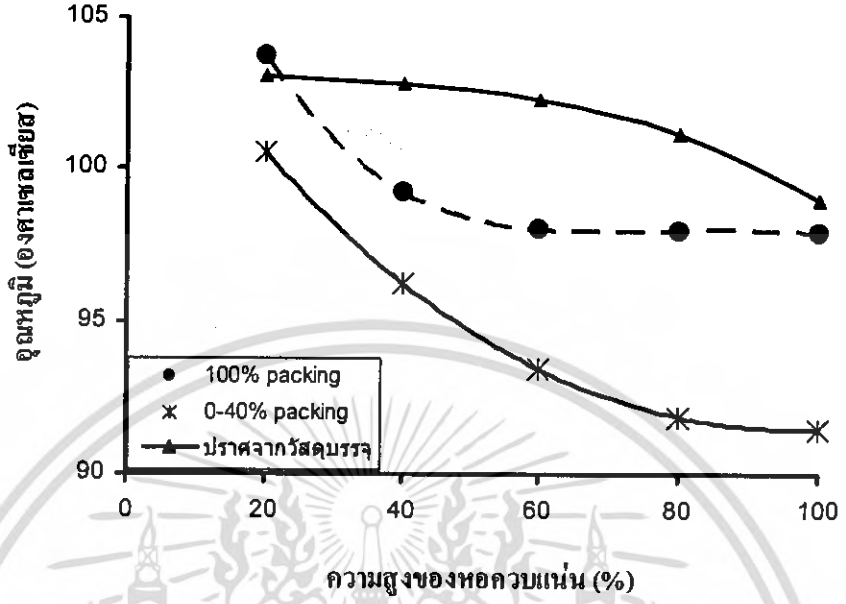


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำกับความสูงของหอควบแน่นเมื่อความหนาแน่นรวมต่างกันโดยการใส่วัสดุบรรจุในช่วงความสูง 0 - 40% ของหอควบแน่น

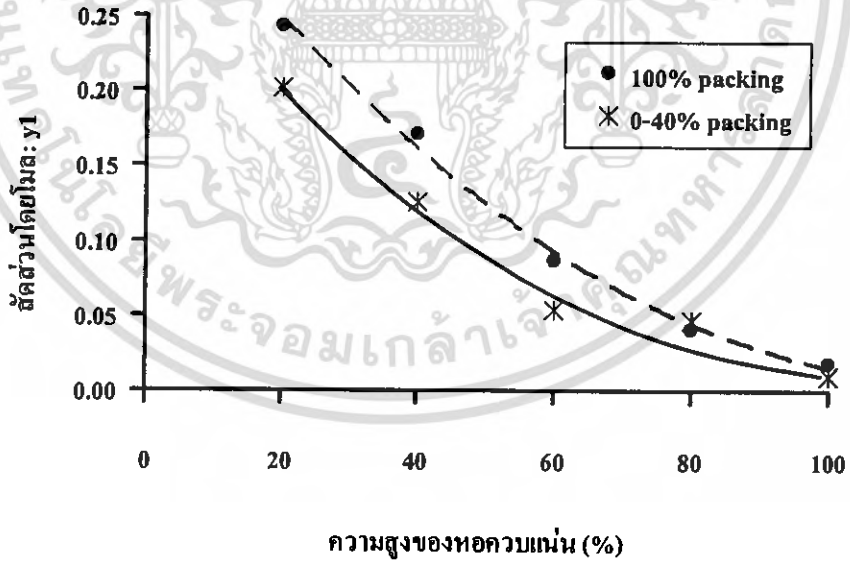
จากผลการทดลองการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในหอควบแน่นใส่วัสดุบรรจุ เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ในแต่ละกรณี คือกรณีการศึกษาใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่นและกรณีใส่วัสดุบรรจุ 0 - 40% ของหอควบแน่นโดยเลือกค่าความหนาแน่นรวมที่มีค่าใกล้เคียงกันคือ 90 และ 90.91 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อเปรียบเทียบผลของลักษณะการใส่วัสดุบรรจุดังรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่น พบว่าการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะลดลงและเริ่มคงที่ที่ 98 องศาเซลเซียส ที่ความสูง 40% ของหอควบแน่น เมื่อพิจารณาผลของการใส่วัสดุบรรจุในช่วงความสูง 0-40% ของหอควบแน่น เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ที่ 91.8 องศาเซลเซียส ที่ความสูง 90% ของหอควบแน่น และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการใส่วัสดุบรรจุ พบว่าหอควบแน่นที่ปราศจากวัสดุบรรจุอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ จะขึ้นอยู่กับค่าสัดส่วนโดยโมลเท่านั้น แต่เมื่อมีการใส่วัสดุบรรจุเข้าไปพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่นไม่ได้ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยโมลเพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุบรรจุด้วยจึงทำให้ผลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงมีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสูงหอควบแน่น โดยเปรียบเทียบการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่นกับการใส่วัสดุบรรจุเพียง 40% ของหอควบแน่น



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอทธิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับความสูงของหอควบแน่น โดยเปรียบเทียบการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่นและการใส่วัสดุบรรจุเพียง 40% ของหอควบแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำกับความสูงของหอควบแน่น ซึ่งให้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าที่ระดับความสูงเดียวกัน สัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกรณีที่ใส่วัสดุบรรจุเพียงแค่ 0-40% ของหอควบแน่นมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่น กล่าวคือการใส่วัสดุบรรจุเพียง 0-40% ของหอควบแน่นจะสามารถแยกเอททิลีนไกลคอลออกจากน้ำได้ดีกว่า เนื่องจากที่ระดับความสูงเดียวกันมีปริมาณของเอททิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอที่น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะอธิบายค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททีลีนไกลคอลกับน้ำ อุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและสมการที่เกี่ยวกับสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลว ที่ได้จากความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์และสมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์ว โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

- สมการสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว

$$y_1 P = \gamma_1 x_1 P_1^{sat} \tag{2.15}$$

- สมการหาสัดส่วนโดยโมลในวัฏภาคของเหลว

จากสมการในอุดมคติของราอูลท์จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังนี้

$$y_1 = \frac{x_1 P_1^{sat}}{P} \tag{5.1}$$

และจากผลรวมของสัดส่วนโมลในวัฏภาคไอของเอททิลีนไกลคอลและน้ำมีค่าเท่ากับ 1 จะได้

$$y_1 + y_2 = 1 \tag{5.2}$$

$$x_1 = \frac{P - P_2^{sat}}{P_1^{sat} - P_2^{sat}} \tag{5.3}$$

- สมการอองตวน (antoine equation) ใช้ในการหาค่าความดันไออิ่มตัว

$$\ln P_i^{sat} = A_i - \frac{B_i}{t + C_i} \tag{5.4}$$

- สมการสภาวะแวนเดอร์วาล์ว

$$\left[P + \frac{an^2}{V^2}\right](V - nb) = nRT \tag{2.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สมการหาค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีโดยอาศัยสมการแวนเดอร์วาล์ว

$$\ln \gamma_1 = \left[\ln\left(\frac{V_1 - b_1}{V_2 - b_2}\right) + 1 - \left(\frac{b_2 - 2b_{12}}{V_2 - b_2}\right)\right] + \left[\frac{a_1}{V_1 RT} - \frac{a_{12}}{V_2 RT}\right] \quad (2.23)$$

- สมการกฎการผสมแบบควอดราติกเพื่อหาค่าคงที่สมการแวนเดอร์วาล์วของสารละลาย

$$a_{12} = \sqrt{a_1 a_2}(1 - k_{12}) \quad (2.24)$$

$$b_{12} = \frac{b_1 + b_2}{2} \quad (2.25)$$

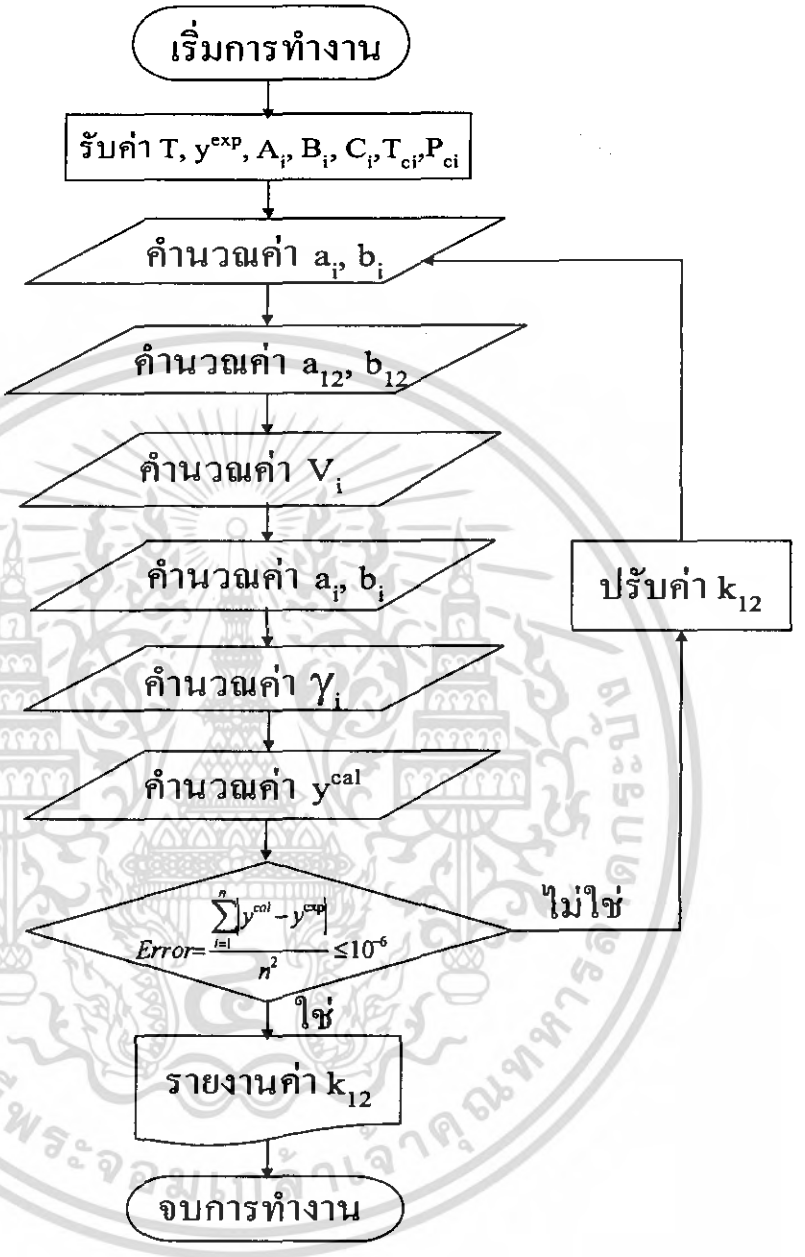
a_1 ,b_1 = ค่าคงที่แวนเดอร์วาล์วของเอททิลีนไกลคอล

a_2 ,b_2= ค่าคงที่แวนเดอร์วาล์วของน้ำ

จากสมการทั้งหมดข้างต้นจะพบว่าการคำนวณค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอ มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตี ซึ่งเป็นค่าปรับแก้ที่เพิ่มเข้าไปในสมการของราอูล เพื่อให้สามารถอธิบายหรือทำนายสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอ โดยค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีคำนวณได้จากการประยุกต์ใช้สมการสภาวะแวนเดอร์วาล์ว ดังสมการที่ 2.23 ร่วมกับกฎการผสมแบบควอดราติก

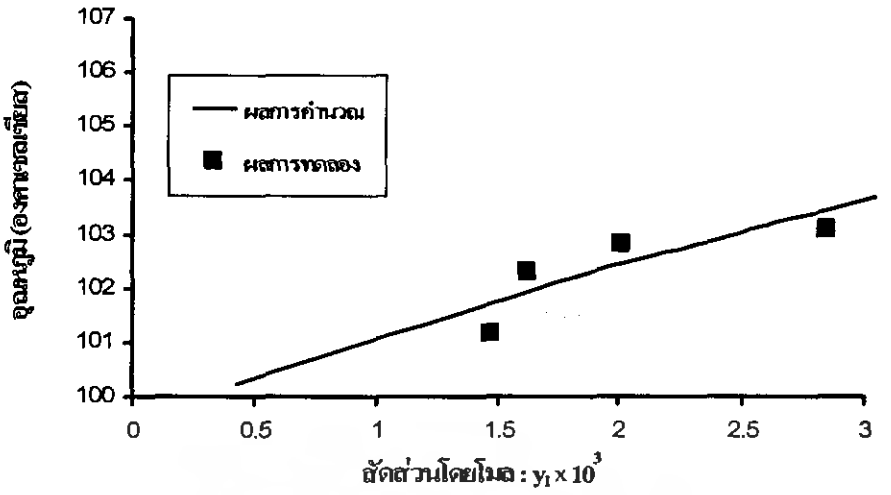
สำหรับกฎการผสมแบบควอดราติกถูกนำมาใช้หาค่าคงที่ของสมการสภาวะแวนเดอร์วาล์วของสารละลายในสมการที่ 2.24 และ 2.25 ซึ่งจะต้องมีการปรับแก้ค่า k_{12} เพื่อให้การทำนายค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอ มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยนำสมการสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว มาสร้างความสัมพันธ์ด้วยวิธีการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นกับค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการทดลองโดยใช้โปรแกรม visual basic 6.5 ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนในการคำนวณได้ ดังรูปที่ 5.1 ทำให้สามารถคำนวณค่าสัดส่วนโดยโมลของของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอที่อุณหภูมิต่างๆ ได้โดยคำสั่งที่ใช้ในโปรแกรม visual basic 6.5 จะกล่าวถึงรายละเอียดในภาคผนวก ง. ส่วนวิธีการคำนวณหาสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำจะอยู่ในภาคภนวก ข. จากผลการคำนวณพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น สามารถนำมาใช้ในการอธิบายค่าสัดส่วนโดย โมลของเอททิลีนไกลคอลในน้ำในวัฏภาคไอได้เป็นอย่างดี ดังแสดงผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองในรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



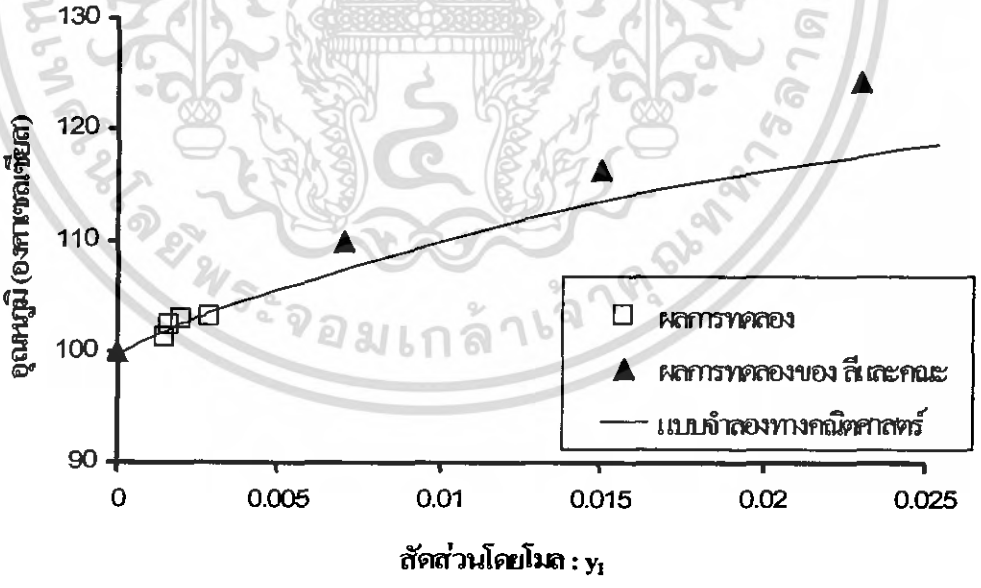
รูปที่ 5.1 แผนภาพขั้นตอนการประมาณค่า k_{12}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับแบบจำลองของลีและคณะ [6] ดังรูปที่ 5.3 พบว่าผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองของลีและคณะ [6] โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น ได้พัฒนามาจากผลการทดลองในช่วงประมาณ 100-103 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการประมาณค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอ จึงมีความใกล้เคียงมากกว่าสำหรับในช่วงอุณหภูมิต่ำ



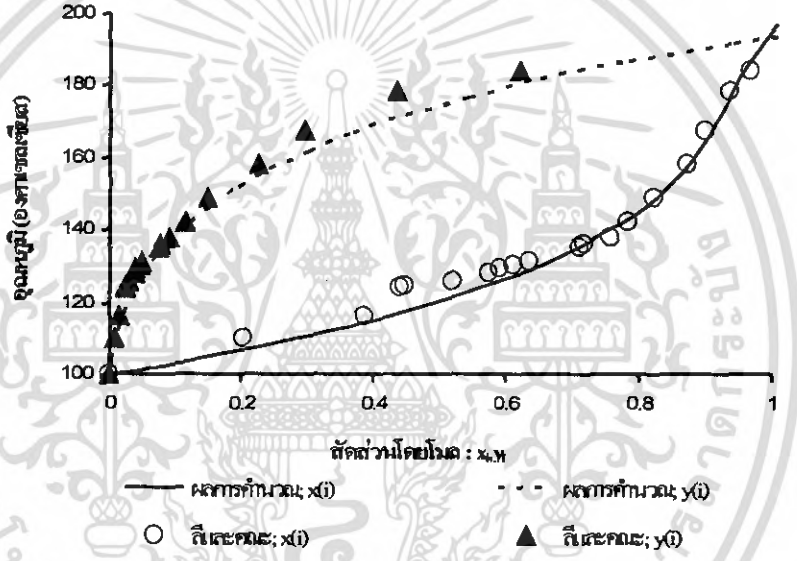
รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบ ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลที่ได้จากการทดลองและผลที่จากการทดลองของลีและคณะ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 พบว่าสามารถประมาณค่าคงที่ k_{12} ได้เท่ากับ 0.048 ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีที่ประมาณได้มีค่าอยู่ในช่วง 1.00-1.01 สำหรับช่วงอุณหภูมิทำการทดลอง 100-103 องศาเซลเซียส

5.2 การทำนายสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ

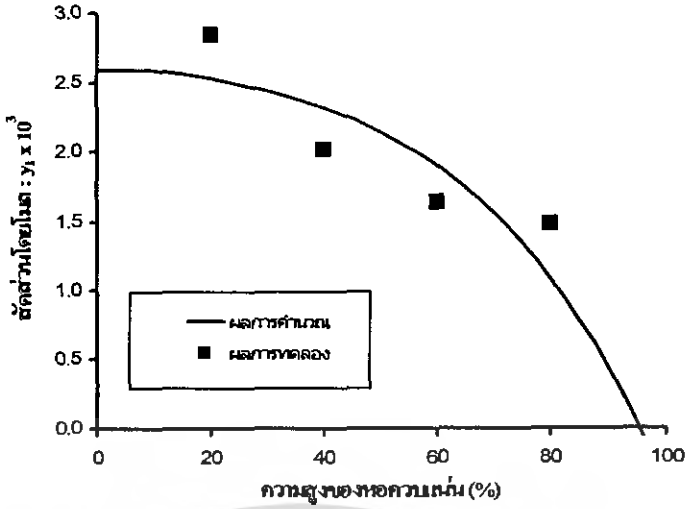
เมื่อนำค่าคงที่ k_{12} ที่ได้จากการประมาณค่ามาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีโดยใช้สมาการ 2.23 และใช้สมการที่ 2.15 ทำนายสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเทิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอและของเหลวที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของลีและคณะ [6] ได้ผลการทดลอง ดังรูป 5.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีค่าคงที่ k_{12} เท่ากับ 0.048 สามารถนำมาใช้ทำนายสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคต่าง ๆ ได้



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของเอททิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอ - ของเหลวกับความสูงของหอควบแน่นโดยการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ ลีและคณะ [6]

จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความสูงของหอควบแน่นโดยแสดงให้อยู่ในรูปแบบของสมการได้ดังสมการที่ 4.1 ซึ่งสามารถหาค่าอุณหภูมิที่ความสูงต่างๆ ได้ แล้วนำค่าอุณหภูมิไปหาค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีในสมาการ 2.23 และใช้สมการที่ 2.15 ทำนายสัดส่วนโดยโมลของสาระลายเอททิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอ จะได้ความสัมพันธ์ของสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอกับความสูงของหอควบแน่น โดยแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปที่ 5.5 เมื่อนำผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลการคำนวณที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของเอทธิลีนไกลคอลในวัฏภาคไอกับความสูงของหอควบแน่นเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

จากผลการหาค่าคงที่ปรับแก้ k_{12} ซึ่งให้ค่าเท่ากับ 0.048 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีอยู่ในช่วง 1.00-1.01 สำหรับอุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ 100-103 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าคงที่ปรับแก้ k_{12} และค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีดังกล่าวหาได้จากผลการทดลองในส่วนของหอควบแน่นปราศจากวัสดุบรรจุ และเมื่อทำการหาค่า k_{12} และค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของหอควบแน่นที่ใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่นและมีความหนาแน่นรวม 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกันได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่ปรับแก้ k_{12} และค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของหอควบแน่นปราศจากวัสดุบรรจุกับหอควบแน่นใส่วัสดุบรรจุ

ค่าคงที่ k_{12} และ สัมประสิทธิ์แอคทิวิตี (γ_1)	หอควบแน่นที่ ปราศจากวัสดุบรรจุ	หอควบแน่นใส่วัสดุ บรรจุเต็มความสูง
k_{12}	0.048	0.929
γ_1	1.00-1.03	46.93-48.30

จะพบว่าจากตารางที่ 5.1 ค่าคงที่ k_{12} และค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของหอควบแน่นไม่ใส่วัสดุบรรจุ กับหอควบแน่นใส่วัสดุบรรจุมีค่าที่แตกต่างกันมาก ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าหอควบแน่นที่ใส่วัสดุบรรจุไม่สามารถอธิบายการแยกองค์ประกอบของเอทธิลีนไกลคอลออกจากน้ำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามาจากสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสมดุลวัฏภาคของเหลว - ไอ ของเอททิลีนไกลคอลในน้ำในระบบสององค์ประกอบ โดยการจำลองหอควบแน่นเพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความสูง และสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอ เพื่อหาความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าสัดส่วนของเอททิลีนไกลคอลในน้ำในวัฏภาคไอที่ความสูงและอุณหภูมิต่างๆ ภายในหอควบแน่นโดยใช้สมการของราอูล ที่มีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีเข้าไป เพื่อปรับเปลี่ยนสมการสำหรับสารละลายอุดมคติให้สามารถใช้ได้กับสารละลายจริง ทำนายค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในวัฏภาคไอค่าสัมประสิทธ์แอคทิวิตีสามารถหาได้จากการประยุกต์ใช้สมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์ว ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 การออกแบบและเครื่องมือการทดลอง

ในการออกแบบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองได้มีการเปรียบเทียบผลการทดลองจากเครื่องมือที่จัดทำขึ้น กับผลการทดลองจากเอกสารทางวิชาการของ ลีและคณะ [6] พบว่าผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้ในการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ – ของเหลวของเอททิลีนไกลคอล กับน้ำ ในระบบสององค์ประกอบได้

6.2 ผลการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำในหอควบแน่นใส่วัสดุบรรจุ

จากผลการทดลองในส่วนของการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นรวมเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะการใส่วัสดุบรรจุ 2 ลักษณะคือ

- การใส่วัสดุบรรจุตลอดช่วงความสูงของหอควบแน่นโดยมี ความหนาแน่นรวมที่แตกต่างกันคือ 90 และ 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในช่วง 20 – 90 เปอร์เซ็นต์ของหอควบแน่นการแยกเอททิลีนไกลคอลเกิดขึ้นได้ดีเมื่อวัสดุบรรจุมีค่าความหนาแน่นรวมต่ำ แต่เมื่อพิจารณาที่ช่วงปลายของหอพบกว่าวัสดุบรรจุที่มีความหนาแน่นรวมสูงสามารถแยกเอททิลีนไกลคอลได้ดีกว่า ดังนั้นจึงสรุปว่าการใส่วัสดุบรรจุที่มีความหนาแน่นรวมที่ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรสามารถแยกเอททิลีนไกลคอลได้ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การใส่วัสดุบรรจุเฉพาะในช่วงความสูง 0-40% ของหอควบแน่น โดยมีความหนาแน่นรวมที่แตกต่างกันคือ 90.91 และ 26.57 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่น ดังนั้นการใส่วัสดุบรรจุ 90.91 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถแยกเอททิลีนไกลคอลได้ดีกว่าการใส่วัสดุบรรจุ 26.57 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการใส่วัสดุบรรจุสองลักษณะ คือใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่น และใส่วัสดุบรรจุเฉพาะในช่วง 0-40% ของหอควบแน่น โดยความหนาแน่นรวมมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 90 และ 90.91 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใส่วัสดุบรรจุเฉพาะในช่วง 0-40% ของหอควบแน่นและมีความหนาแน่นรวม 90.91 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถแยกเอทิลีนไกลคอลได้ดีกว่าการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่น

6.3 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีของเอททิลีนไกลคอลในน้ำ

การทำนายค่าสัดส่วนโมลของเอททิลีนไกลคอล พบว่าการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลที่ใกล้เคียงกับการผลการทดลอง และสามารถประมาณค่าคงที่ k_{12} ได้เท่ากับ 0.048 ซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แอคทิวิตีในช่วงของการทดลอง 100-103 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วงประมาณ 1.00-1.01

6.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลวของเอททิลีนไกลคอลในน้ำในระบบสององค์ประกอบที่เกิดขึ้นภายในหอควบแน่นจำลอง โดยทำการเปรียบเทียบผลของการใส่วัสดุบรรจุเต็มความสูงของหอควบแน่นและการใส่วัสดุบรรจุในช่วงความสูง 0-40 % ของหอควบแน่น อย่างไรก็ดีหากมีการใส่วัสดุบรรจุเข้าไปการศึกษาจะไม่ใช่สมดุลระหว่างวัฏภาคไอของเหลวเพียงอย่างเดียวแต่จำเป็นจะต้องมีการศึกษาการแลกเปลี่ยนมวลสารและพลังงานควบคู่กันไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] **"Licensing Unsaturated PolyesterResin"** [Online]. Available: http://www.stamicarbon.com/Technology/_en/upr.htm

[2] J. M. Smith. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics.** 6th ed. Singapore: McGraw-Hill. 2001.

[3] เอกสารประกอบการทดลอง. **Practice in chemical engineering 1.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง. 2549.

[4] ประพนธ์ ปรียารัตนโชติ, ปิติภัทร ไทพิทักษ์ และอรรจน์ กลับน่วม. **การประยุกต์ใช้สมการสภาวะแวนเดอร์วาล์วเพื่อแยกพาราฟินแวกซ์ออกจากน้ำมันหล่อลื่นในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่น.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.

[5] **"Abbe Refractometer"** [Online]. Available: http://www.mastrad.com/refrac.htm

[6] Lee,H.S., J.H.Yoon and H..Lee, **Isobaric P-T-X-Y Data : Water + Ethylene Glycol at 1.0 atm.** J. KIChE., vol.30, 1992. pp553

[7] Robert H. Perry. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 6th ed. N.Y.: Mcgraw-Hill. 1997.

[8] ภัทรพรรณ ปะศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกส์ วิศวกรรมเคมี. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การคำนวณหาค่าคงที่ของสมการสภาวะแวนเดอร์วาล์ว ของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ

ค่าคงที่สมการสภาวะแวนเดอร์วาล์ว สามารถคำนวณได้จากสมการ 2 สมการ คือ

$$a = \left(\frac{27}{64}\right) R^2 \frac{T_C^2}{P_C}$$

$$b = \left(\frac{1}{8}\right) R \frac{T_C}{P_C}$$

R = ค่าคงที่ของก๊าซ = $8.314 \frac{Pa \cdot m^3}{mol \cdot K}$

จากสมการจะเห็นได้ว่า ค่าคงที่ a, b ของสมการสภาวะของแวนเดอร์วาล์วจะสามารถ หาค่าได้เมื่อทราบค่าตัวแปร 2 ตัว คือ อุณหภูมิวิกฤติ (T_C) และความดันวิกฤติ (P_C) ของสารแต่ละตัว ซึ่งค่าตัวแปรทั้งสองของเอททิลีนไกลคอลและน้ำมีค่าดังนี้

ตารางที่ ก.1 ค่าสัมบัติวิกฤติของเอททิลีนไกลคอลกับน้ำที่ใช้ในการหาค่าคงที่ของสมการสภาวะแวนเดอร์วาล์ว

สมบัติวิกฤติ	เอททิลีนไกลคอล	น้ำ
อุณหภูมิวิกฤติ (K)	645.1	647.3
ความดันวิกฤติ (Pa)	7.53×10^6	2.209×10^7

ตัวอย่างการคำนวณ

เมื่อนำค่าอุณหภูมิวิกฤติ (T_C) และความดันวิกฤติ (P_C) ของสารแทนในสมการ จะหาค่าคงที่ a,b ของสารแต่ละชนิดได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ a,b ของเอททิลีนไกลคอล

$$a = \left(\frac{27}{64}\right)(8.314)^2 \frac{(645.1)^2}{(7.53x10^6)^2} = 1.61Pa\left(\frac{m^3}{mol}\right)^2$$

$$b = \left(\frac{1}{8}\right)(8.314)\frac{(645.1)}{(7.53x10^6)} = 8.9x10^{-5}\ \frac{m^3}{mol}$$

ค่าคงที่ a,b ของน้ำ

$$a = \left(\frac{27}{64}\right)(8.314)^2 \frac{(647.3)^2}{(2.209x10^7)^2} = 0.55Pa\left(\frac{m^3}{mol}\right)^2$$

$$b = \left(\frac{1}{8}\right)(8.314)\frac{(657.3)}{(2.209x10^7)} = 3.04x10^{-5}\ \frac{m^3}{mol}$$

ค่าคงที่ของสมการสภาวะแวนเดอร์วาล์วของเอททิลีนไกลคอลและน้ำสามารถสรุปแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ ก.2 ค่าคงที่สมาการสภาวะของแวนเดอร์วาล์วของเอททิลีนไกลคอลและน้ำ

สาร	a ($Pa.m^6/mol^2$)	b (m^3/mol)
เอททิลีนไกลคอล	1.61	$8.90x10^{-5}$
น้ำ	0.55	$3.04x10^{-5}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การคำนวณค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอล กับน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ จากการทดลอง

ตัวอย่างการหาค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส = 376.2 องศาเคลวิน (K)

$$y_1 P = \gamma_1 x_1 P_1^{sat} \tag{2.15}$$

ซึ่งจากการทดลองและการคำนวณในเบื้องต้นพบว่ามีค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ ข.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้หาค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ

สาร	P (Pa)	a (Pa.m^6/mol^2)	b (m^3/mol)	k_{12}
เอททิลีนไกลคอล (1)	101325	1.61	8.90×10^{-5}	0.048
น้ำ (2)	101325	0.55	3.04×10^{-5}	0.048

R = ค่าคงที่ของก๊าซ = $8.314 \frac{Pa \cdot m^3}{mol \cdot K}$

การคำนวณค่าตัวแปรอื่นนอกจากตารางที่ ข-1 มีรายละเอียดดังนี้

1. หาค่า V_1 และ V_2 จากสมการแวนเดอร์วาล์ว 2.22 ที่ความดัน 101,325 Pa

$$\left(\frac{a}{V_1}\right)(V_1 - b) = RT$$

$$a_1 V_1 - a_1 b_1 = V_1 RT$$

$$(RT)V_1^2 - aV_1 + a_1 b_1 = 0$$

$$\frac{V_1 = a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4RTa_1 b_1}}{2RT}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_1 = \frac{1.61 + \sqrt{(1.61)^2 \pm 4(8.314)(376.2)(1.61)(8.9x10^{-5})}}{2(8.314)(376.2)}$$

$$V_1 = 4.00 \times 10^{-4} \ \mathrm{m^3/mol}$$

$$\frac{V_2 = a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4RTa_2b_2}}{2RT}$$

$$V_2 = \frac{0.55 + \sqrt{(0.55)^2 \pm 4(8.314)(376.2)(0.55)(3.04x10^{-5})}}{2(8.314)(376.2)}$$

$$V_2 = 1.38 \times 10^{-4} \ \mathrm{m^3/mol}$$

2. หาค่า a_{12} และ b_{12} จากสมการที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ

$$a_{12} = \sqrt{(1.61)(0.55)}(1 - 0.048) = 0.898 Pa \cdot m^6 / mol^2$$

$$b_{12} = \frac{8.90x10^{-5} + 3.04x10^{-5}}{2} = 5.974x10^{-5} m^3 / mol$$

3. หาค่า γ จากสมการที่ 2.23

$$\ln \gamma_1 = \left[\ln\left(\frac{4.0x10^{-4} - 8.90x10^{-5}}{1.38x10^{-4} - 3.04x10^{-5}}\right) + 1 - \left(\frac{b_2 - 2b_{12}}{1.38x10^{-4} - 3.04x10^{-5}}\right)\right] + \left[\frac{1.61}{4.0x10^{-4} RT} - \frac{0.898}{1.38x10^{-4} RT}\right]$$

$\gamma_1 = 1.015$

4. หาค่าความดันไออิ่มตัวของเอททิลีนไกลคอลและน้ำจากสมการ 5.4 โดยมีค่าคงที่ของสมการดังนี้

ตารางที่ ข.2 ค่าคงที่ของสมการอองตวน (antoine equation)

สาร	A	B	C
เอททิลีนไกลคอล (1)	15.7567	4187.46	178.65
น้ำ (2)	16.3872	3885.7	230.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln P_1^{sat} = \left(15.7567 - \frac{4187.46}{103+178.65}\right)1000 = 2{,}442.66Pa$$

$$\ln P_2^{sat} = \left(16.3872 - \frac{3885.7}{103+230.17}\right)1000 = 112{,}959.7Pa$$

5. การหาค่าสัดส่วนโมลของเอททิลีนไกลคอลในน้ำในวัฏภาคของเหลวจากสมการ 5.1

$$x_1 = \frac{P - P_2^{sat}}{P_1^{sat} - P_2^{sat}} = \frac{101{,}325 - 2{,}442.66}{112{,}959.7 - 2{,}442.66} = 0.105$$

6. นำค่าตัวแปรต่างๆ กลับไปแทนในสมการ 2.15

$$y_1 P = \gamma_1 x_1 P_1^{sat}$$

$$y_1^{cal} = \frac{(1.015)(0.105)(2{,}442.66)}{(101{,}325)}$$

$$y_1^{cal} = 0.00253$$

ตารางที่ ข.3 ค่าสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอล ; y_1^{exp}	γ_1	สัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอล ; x_1^{exp}	สัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอล ; y_1^{exp}
101.1	0.0014	1.0135	0.042102	0.00093
102.2	0.0016	1.0145	0.079485	0.00186
102.8	0.0020	1.0150	0.096769	0.00233
103.0	0.0028	1.0152	0.105275	0.00257

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ข้อมูลผลการทดลองของลีและคณะ[6]

ตารางที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองของ ลีและคณะ[6]

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สัดส่วนโดยโมลของสารละลายเอททิลีนไกลคอลกับน้ำ	
	วัฏภาคของเหลว	วัฏภาคไอ
110.0	0.202	0.007
116.4	0.387	0.015
124.3	0.441	0.023
124.5	0.447	0.024
126.0	0.518	0.029
128.1	0.574	0.037
129.5	0.589	0.038
130.5	0.612	0.045
131.2	0.635	0.048
135.2	0.711	0.074
136.0	0.717	0.076
138.0	0.759	0.091
142.5	0.784	0.113
149.0	0.822	0.148
158.1	0.871	0.224
167.4	0.898	0.294
178.6	0.935	0.437
184.2	0.966	0.621

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

คำสั่งที่ใช้ในการคำนวณบนโปรแกรม Visual Basic 6.5

```
Dim N9, M9, IJ
Dim Q9(5), X9(5), D9(5), O9(5), A9(5, 6), C9(5, 6), E9(100), R9(5), P9(5)
Dim G9(100), B9(100, 5), Z9(100), T9(10), Y9(5), S9(5), X(100)
Dim gamma1(100), Y_cal(100), X1_cal(100), X2_cal(100), Y_exp(100)
Dim RT(100), V1(100), V2(100), T(100), P_sat1(100), P_sat2(100)
Dim term1(100), term2(100), term3(100), term4(100)
Dim Sum(100), Err(100)

Sub cal()
Set dataArea = Worksheets("CurveFit").Range("A1")
'Initial adjustable parameter ; K12
        P9(1) = dataArea.Cells(4, 6).Value
'Check data numbers!
  For i = 1 To 100
    If dataArea.Cells(16 + i, 2).Value = "" Then
      N9 = i - 1
      Exit For
    Else
    End If
  Next i
'Input experimental data
  For i = 1 To N9
    T(i) = dataArea.Cells(16 + i, 3)
    Y_exp(i) = dataArea.Cells(16 + i, 4)
  Next i
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
M9 = 1
Marquardt
End
End Sub

Sub Marquardt()
'M9 = number of parameter, m
'N9 = number of data, n
'P9(J) = the jth parameter
'R9(J) = code of jth parameter (= 0; fix := 1; changable)
'U9 = code of printing (=0; print : = 1; not print)

Z9(1) = 2: Z9(2) = 0.2: V9 = 0.00001: T9(1) = 0: T9(2) = 0: Z9(4) = 0.0000001
Z9(3) = 0.00000005: F9 = 1.5: Y9(2) = M9 + 1

R9(1) = 1: R9(2) = 1
R9(3) = 1
For i = 1 To N9
  E9(i) = 0
Next i

Func
S9(1) = 0: T9(2) = T9(2) + 1: T9(4) = 0
For K9 = 1 To N9
   S9(1) = S9(1) + E9(K9) ^ 2
Next K9
For I9 = 1 To M9
   T9(4) = T9(4) + Abs(R9(I9))
Next I9
If T9(4) = 0 Then
  GoTo A2
End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
M1 = 1
Set dataArea = Worksheets("CurveFit").Range("A1")
   dataArea.Cells(M1 + 1, 17) = S9(1)
   dataArea.Cells(M1 + 1, 18) = T9(1)
   dataArea.Cells(M1 + 1, 19) = T9(2)
   dataArea.Cells(M1 + 1, 20) = P9(1)
   dataArea.Cells(M1 + 1, 21) = P9(2)

A3:
'----------Calculation of Jacobian Matrix----------
T9(1) = T9(1) + 1
Z9(1) = 2
S9(2) = S9(1)
For J9 = 1 To M9
   Q9(J9) = P9(J9)
Next J9
For K9 = 1 To N9
   G9(K9) = E9(K9)
Next K9
For J9 = 1 To M9
   If R9(J9) <> 0 Then
      Y9(1) = (Abs(P9(J9)) + Z9(4)) * Z9(4)
      P9(J9) = P9(J9) + Y9(1)
      Func
      For K9 = 1 To N9
         B9(K9, J9) = (E9(K9) - G9(K9)) / Y9(1)
      Next K9
      P9(J9) = Q9(J9)
   End If
Next J9
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'----------Changing scale of matrix----------
For I9 = 1 To M9
  X9(I9) = 0: O9(I9) = 1
  If R9(I9) <> 0 Then
    For K9 = 1 To N9
      X9(I9) = X9(I9) + B9(K9, I9) * G9(K9)
    Next K9
    For J9 = I9 To M9
      A9(I9, J9) = 0
      If R9(J9) <> 0 Then
        For K9 = 1 To N9
          A9(I9, J9) = A9(I9, J9) + B9(K9, I9) * B9(K9, J9)
        Next K9
      End If
      A9(J9, I9) = A9(I9, J9)
    Next J9
    O9(I9) = Sqr(A9(I9, I9))
    X9(I9) = X9(I9) / O9(I9)
    GoTo A1
  End If
  A9(I9, I9) = 1
  For J9 = I9 + 1 To M9
    A9(I9, J9) = 0
    A9(J9, I9) = 0
  Next J9
A1:
Next I9
For I9 = 1 To M9
  For J9 = I9 To M9
    A9(I9, J9) = A9(I9, J9) / (O9(I9) * O9(J9))
    A9(J9, I9) = A9(I9, J9)
  Next J9
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Next I9
Z9(5) = 0
'-------------------------------------------------------------
A4:
For I9 = 1 To M9
   For J9 = 1 To M9
      C9(I9, J9) = A9(I9, J9)
   Next J9
   C9(I9, Y9(2)) = -X9(I9)
   C9(I9, I9) = C9(I9, I9) + V9
Next I9
'----------------------Gauss Jordan----------------------

For I9 = I To M9
   H9 = I9 + 1
   For J9 = H9 To Y9(2)
      C9(I9, J9) = C9(I9, J9) / C9(I9, I9)
   Next J9
   For J9 = 1 To M9
      If I9 <> J9 Then
         For K9 = H9 To Y9(2)
            C9(J9, K9) = C9(J9, K9) - C9(I9, K9) * C9(J9, I9)
         Next K9
      End If
   Next J9
Next I9
'---------------------------------

For I9 = 1 To M9
   D9(I9) = C9(I9, Y9(2)) / O9(I9)
   P9(I9) = Q9(I9) + D9(I9)
Next I9
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Func
T9(2) = T9(2) + 1
S9(1) = 0
Z9(5) = Z9(5) + 1
For J9 = 1 To N9
   S9(1) = S9(1) + E9(J9) ^ 2
Next J9
Set dataArea = Worksheets("CurveFit").Range("A1")
   dataArea.Cells(M1 + 2, 17) = S9(1)
   dataArea.Cells(M1 + 2, 18) = T9(1)
   dataArea.Cells(M1 + 2, 19) = T9(2)
   dataArea.Cells(M1 + 1, 20) = P9(1)
   dataArea.Cells(M1 + 1, 21) = P9(2)
If S9(1) < S9(2) Then
'----------------------Judgement of convergence----------------------------

  T9(3) = 0
  For J9 = 1 To M9
     If Abs(D9(J9)) / (Abs(P9(J9)) + Z9(4)) > Z9(3) Then
        T9(3) = T9(3) + 1
     End If
  Next J9
  If T9(3) = 0 Then
     If N9 - T9(4) > 0 Then
        S9(3) = Sqr(S9(1) / (N9 - T9(4)))
A2:
     End If
     GoTo A5
  End If
  GoTo A6
End If
'----------------------Increase the value of lampda----------------------
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Z9(1) = Z9(1) * F9
V9 = V9 * Z9(1)
Set dataArea = Worksheets("CurveFit").Range("A1")
   dataArea.Cells(M1 + 1, 21) = V9
If V9 > 1000 Then
  For I9 = 1 To M9
     P9(I9) = Q9(I9)
  Next I9
  S9(1) = S9(2)
  GoTo A2
End If
  M1 = M1 + 1
GoTo A4

A6:
'----------------------Decrease the value of lampda----------------------

M1 = M1 + 1
If Z9(5) = 1 Then
  V9 = V9 * Z9(2)
GoTo A3
End If
GoTo A3
A5:
End Sub
Sub Func()
Set dataArea = Worksheets("CurveFit").Range("A1")
IJ = 1
Do While IJ <= N9
A7:
 Set dataArea = Worksheets("CurveFit").Range("A1")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
' Data input
    A1 = dataArea.Cells(5, 2).Value
    B1 = dataArea.Cells(6, 2).Value
    C1 = dataArea.Cells(7, 2).Value
    A2 = dataArea.Cells(5, 3).Value
    B2 = dataArea.Cells(6, 3).Value
    C2 = dataArea.Cells(7, 3).Value
    RR = dataArea.Cells(8, 2).Value
    aa1 = dataArea.Cells(9, 2).Value
    aa2 = dataArea.Cells(9, 3).Value
    bb1 = dataArea.Cells(10, 2).Value
    bb2 = dataArea.Cells(10, 3).Value
    P_total = dataArea.Cells(12, 2).Value
    P_sat1(IJ) = Exp(A1 - B1 / (T(IJ) - 273.15 + C1)) * 1000
    P_sat2(IJ) = Exp(A2 - B2 / (T(IJ) - 273.15 + C2)) * 1000

'Calculation molar volume ; V1 ,V2 for VDW
    RT(IJ) = RR * T(IJ)
    V1(IJ) = (aa1 + (aa1 ^ 2 - 4 * (RT(IJ)) * aa1 * bb1) ^ 0.5) / (2 * RT(IJ))
    V2(IJ) = (aa2 + (aa2 ^ 2 - 4 * (RT(IJ)) * aa2 * bb2) ^ 0.5) / (2 * RT(IJ))

'Calculation VDW constant a12&b12 by mixing rule
    K12 = P9(1)
    aa12 = ((aa1 * aa2) ^ 0.5) * (1 - K12)
    bb12 = (bb1 + bb2) / 2

'Calculation Activity coefficient :1
    term1(IJ) = (V1(IJ) - bb1) / (V2(IJ) - bb2)
    term2(IJ) = Log(term1(IJ))
    term3(IJ) = (bb2 - (2 * bb12)) / (V2(IJ) - bb2)
    term4(IJ) = (aa1 / (V1(IJ) * RT(IJ))) - (2 * aa12 / (V2(IJ) * RT(IJ)))
    gamma1(IJ) = Exp(term2(IJ) + 1 - term3(IJ) + term4(IJ))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'Calculation mole fraction;X_cal
    X1_cal(IJ) = (P_total - P_sat2(IJ)) / (P_sat1(IJ) - P_sat2(IJ))

'Calculation mole fraction;Y_cal
    Y_cal(IJ) = X1_cal(IJ) * P_sat1(IJ) / P_total * gamma1(IJ)
Set dataArea = Worksheets("CurveFit").Range("A1")
  dataArea.Cells(IJ + 16, 6).Value = Y_cal(IJ)
  dataArea.Cells(IJ + 16, 8).Value = gamma1(IJ)
  dataArea.Cells(IJ + 16, 7).Value = X1_cal(IJ)
  dataArea.Cells(IJ + 16, 10).Value = V1(IJ)
  dataArea.Cells(IJ + 16, 11).Value = V2(IJ)
  dataArea.Cells(4, 7).Value = K12

IJ = IJ + 1
Loop
Sum(0) = 0
For i = I To N9
  E9(i) = Y_exp(i) - Y_cal(i)
  Set dataArea = Worksheets("CurveFit").Range("A1")
  dataArea.Cells(i + 16, 9) = E9(i)
  Err(i) = E9(i) / Y_exp(i)
  Err(i) = Abs(Err(i))
  Sum(i) = Sum(i - 1) + Err(i)
Next i

Set dataArea = Worksheets("CurveFit").Range("A1")
  Add = (100 / N9) * Sum(N9)
  dataArea.Cells(5, 6).Value = Add

End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้