

การแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอลด้วยวิธีการสตริปปีง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF WATER FROM SODIUM METHYLATE SOLUTION IN METHANOL USING
STRIPPING TECHNIQUE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทา นอลด้วยวิธีการสไตรปีง
โดย	นายศิวกร นามเขื่อนแพทย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พงษ์ธร เจริญศุภนิมิตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์)

ศิวกร นามเชื่อนแพทย์ : การแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล
ด้วยวิธีการสตริบปี้ง. (REMOVAL OF WATER FROM SODIUM METHYLATE
SOLUTION IN METHANOL USING STRIPPING TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ.
ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุณา

โซเดียมเมทิลเลทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โซเดียมเมทิลเลทสามารถผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาของเมทานอลกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง น้ำจะไปรบกวนกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทำให้เกิดสบู่ การศึกษานี้เป็นการศึกษาการแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอลด้วยวิธีการสตริบปี้ง การทดลองทำในหอสตริบปี้งต้นแบบที่สภาวะอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิจาก 100 ถึง 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) จาก 1:1.3 ถึง 1:2 เท่าของอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)max) และปริมาณน้ำในของเหลวที่ป้อนเข้าจากร้อยละ 3.23 ถึง 6.25 โดยน้ำหนัก (เทียบเท่าสารละลายโซเดียมเมทิลเลทที่ร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนัก) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของไอเมทานอล น้ำจะระเหยจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทได้มากขึ้น และปริมาณเมทานอลที่ควบแน่นจากไอเมทานอลลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)max) น้ำจะระเหยจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทได้มากขึ้น และปริมาณเมทานอลที่ควบแน่นจากไอเมทานอลลดลง และเมื่อปริมาณน้ำในสารละลายโซเดียมเมทิลเลทสายป้อนเพิ่มขึ้น ความสามารถในการระเหยน้ำจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทลดลง และปริมาณเมทานอลที่ควบแน่นจากไอเมทานอลเพิ่มขึ้น ผลการทดลองทั้งหมดยังแสดงให้เห็นว่าน้ำถ่ายเทจากสารละลายเข้าสู่ไอเมทานอลโดยน้ำจะระเหยกลายเป็นไวก่อนการถ่ายเท ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำได้รับมาจากไอของเมทานอล ส่งผลให้ไอเมทานอลบางส่วนเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวลงสู่สารละลาย

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5971022721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: sodium methyrate, stripping

Sivakorn Namkueanphat : REMOVAL OF WATER FROM SODIUM METHYLATE SOLUTION IN METHANOL USING STRIPPING TECHNIQUE . Advisor: JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D.

Sodium methyrate is a catalyst commonly used in biodiesel production process. It can be produced by reacting methanol with sodium hydroxide that produces water as a byproduct. Water interferes biodiesel production, resulting in soap formation. This study aims at removal of water from sodium methyrate in methanol solution using stripping technique. The experiments were conducted at superheated methanol vapor temperatures of 100 °C to 140 °C, L/V ratio of 1:1.3 to 1:2 of (L/V)_{max} and amount of water in sodium methyrate solution of 3.23 to 6.25%wt (equivalent to sodium methyrate concentration of 10 to 20%wt). The results show that increasing superheated methanol vapor temperature causes an increase in water removed from sodium methyrate solution and a decrease in methanol condensing from methanol vapor, increasing L/V ratio causes an increase in water removed from sodium methyrate solution and a decrease in methanol condensing from methanol vapor, and increasing amount of water in sodium methyrate solution causes a reduction of water removal efficiency from the solution and an increase in methanol condensing from methanol vapor. The results also show that water is vaporised from the solution before it is transfered to methanol vapor. Heat used for vaporization comes from methanol vapor resulting in condensation of a portion of methanol vapor into the solution.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ระหว่างการทำวิจัย เพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์ สุทธิธารวัช ประธานกรรมการในการสอบ วิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.พงศ์ธร เจริญสุขณมิตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ในการเพิ่มเติมรายละเอียด วิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนให้ คำแนะนำต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ตลอดการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท ปิยะศิริวานิช จำกัด ที่สนับสนุนเงินทุนในการสร้างหอสตรีปึงตันแบบ สารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัย และสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนที่ดีตลอดมา

ศิวกร นามเชื่อนแพทย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การดูดซึม (Absorption) และการสทริปปิง (Stripping).....	4
2.2 การออกแบบหอสทริปปเปอร์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร.....	6
2.2.1 เส้นสมดุล (Equilibrium Curves).....	7
2.2.2 เส้นดำเนินการ (Operating Line).....	7
2.2.3 อัตราการไหลของแก๊สต่ำที่สุด (Minimum Gas Flow Rate).....	8
2.2.4 ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two film theory).....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10

บทที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์	11
3.1 อุปกรณ์.....	11
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	12
3.3 วิธีการทดลอง.....	13
3.3.1 ขั้นตอนการเริ่มต้นการทดลอง	14
3.3.2 ขั้นตอนการทดลองในสภาวะปกติ.....	14
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง	16
3.4.1 วิเคราะห์หาปริมาณน้ำในตัวอย่างด้วยเทคนิคไทเทรตด้วยเครื่องคาร์ล ฟิสเชอร์ (Karl Fischer).....	16
3.4.2 การไทเทรตเพื่อหาปริมาณโซเดียมเมทิลเลท.....	16
3.4.3 การไทเทรตหาความเข้มข้นที่ของกรดไฮโดรคลอริกที่แน่นอน	17
3.5 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน	18
3.6 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient (K_a)).....	21
3.7 การคำนวณค่าสภาวะที่ใช้หอstripping.....	22
3.7.1 การคำนวณความเร็วการไหลของไอเมทานอล	22
3.7.2 การคำนวณความเร็วการไหลในสภาวะการท่วม (Flooding)	22
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	24
4.1 ผลการทดลอง.....	24
4.1.1 การทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ	24
4.1.2 การทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ	28
4.2 ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลสารและการถ่ายเทความร้อน	32
4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง	38
4.4 ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio).....	40

4.5 ผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า	42
4.6 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient (K_{La})).....	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	46
5.1 สรุปผลการทดลอง	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม.....	48
ภาคผนวก ก ผลของอุณหภูมิต่อการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง กรณีการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ	49
ภาคผนวก ข ผลของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) กรณีการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ	52
ภาคผนวก ค ผลของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า กรณีการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ	55
ภาคผนวก ง ผลของอุณหภูมิต่อการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง กรณีการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ.....	58
ภาคผนวก จ ผลของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) กรณีการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ.....	61
ภาคผนวก ฉ ผลของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า กรณีการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	67

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 ชนิดของหอดูดซึม	5
รูปที่ 2 ชนิดของแพ็คกิ้ง	6
รูปที่ 3 สภาวะสมดุลของหอสตริปเปอร์ที่มีการดำเนินการด้วยการไหลแบบสวนทาง	6
รูปที่ 4 Equilibrium line, operating line และ (L/V)max ของหอสตริปเปอร์	8
รูปที่ 5 แสดงผลต่างของความเข้มข้นของทฤษฎีสองฟิล์ม	9
รูปที่ 6 หอสตริปป์จริงที่ใช้ในการทดลอง	11
รูปที่ 7 Metal Intalox IMTP Packing	12
รูปที่ 8 แผนภาพของระบบสตริปป์ที่ใช้ในการทดลอง	13

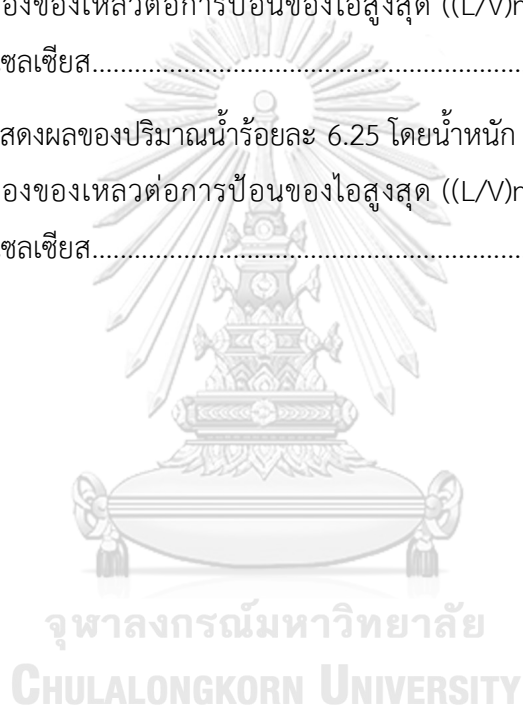


สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	12
ตารางที่ 3.2	สภาวะในการทดลอง.....	14
ตารางที่ 3.3	ความคาดเคลื่อนจากการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ.....	19
ตารางที่ 3.4	ความคาดเคลื่อนจากการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ	20
ตารางที่ 3.5	ตัวอย่างความคาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์	21
ตารางที่ 4.1.1.1	แสดงผลการทดลองของการเปลี่ยนอุณหภูมิไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง	25
ตารางที่ 4.1.1.2	แสดงผลการทดลองของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)	26
ตารางที่ 4.1.1.3	แสดงผลการทดลองของปริมาณน้ำในสารละลายป้อนเข้า	27
ตารางที่ 4.1.2.1	ผลการทดลองของการเปลี่ยนอุณหภูมิไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง	29
ตารางที่ 4.1.2.2	ผลการทดลองของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)	30
ตารางที่ 4.1.2.3	ผลการทดลองของปริมาณน้ำในของเหลวป้อนเข้า.....	31
ตารางที่ 4.2.1	แสดงค่าความดันและอุณหภูมิภายในหอสทรีปป์ที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ	32
ตารางที่ 4.2.2	แสดงค่าความดันและอุณหภูมิภายในหอสทรีปป์ที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ.....	33
ตารางที่ 4.2.3	แสดงผลการผลการคำนวณปริมาณน้ำและเมทานอลในสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ.....	34
ตารางที่ 4.2.4	แสดงผลการคำนวณปริมาณน้ำและเมทานอลในสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ	35
ตารางที่ 4.2.5	แสดงผลการคำนวณสมดุลพลังงานของระบบที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ	36
ตารางที่ 4.2.6	แสดงผลการคำนวณสมดุลพลังงานของระบบที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ.....	37

ตารางที่ 4.3.1 ผลการทดลองกรณีผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง 39	
ตารางที่ 4.4.1 ผลการทดลองกรณีผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)	41
ตารางที่ 4.5.1 ผลการทดลองกรณีผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า	43
ตารางที่ 4.6.1 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกรณีผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง	44
ตารางที่ 4.6.2 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกรณีผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)	44
ตารางที่ 4.6.3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกรณีผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า.....	45
ตารางที่ ก-1 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max)	49
ตารางที่ ก-2 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max).....	50
ตารางที่ ก-3 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 140 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max).....	51
ตารางที่ ข-1 ตารางแสดงผลของอัตราส่วน 1:1.3 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส	52
ตารางที่ ข-2 ตารางแสดงผลของอัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส	53

- ตารางที่ จ-3** ตารางแสดงผลของอัตราส่วน 1:2 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส..... 63
- ตารางที่ ฉ-1** ตารางแสดงผลของปริมาณน้ำร้อยละ 3.23 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส 64
- ตารางที่ ฉ-2** ตารางแสดงผลของปริมาณน้ำร้อยละ 4.76 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส..... 65
- ตารางที่ ฉ-3** ตารางแสดงผลของปริมาณน้ำร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส..... 66



บทที่ 1

บทนำ

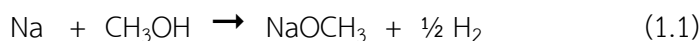
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

น้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่ได้รับการยอมรับมากชนิดหนึ่ง เพราะมีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลที่ผลิตได้จากปิโตรเลียมได้ และมีแนวโน้มที่จะมีการใช้น้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้นจากนโยบายของประเทศต่าง ๆ ที่ต้องการเพิ่มอัตราส่วนการผสมไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซลให้มากขึ้น โดยการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ที่ได้มาจากน้ำมันจากพืชหรือไขมันจากสัตว์ นำมาทำปฏิกิริยาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) กับเมทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นเบส ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันไบโอดีเซลและกลีเซอรอล

ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล เป็นส่วนประกอบที่ใช้ในปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 1 ถึง 2 แต่เป็นสิ่งจำเป็นมากในผลิตไบโอดีเซล เพราะช่วยลดระยะเวลาและลดอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหลากหลายชนิดในอุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซล เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) โซเดียมเมทิลเลท (Sodium methylate) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) โพแทสเซียมเมทิลเลท (Potassium methylate) เป็นต้น โดยปัจจุบันโซเดียมเมทิลเลทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดที่นิยมใช้กันมากที่สุด [1], [2]

โซเดียมเมทิลเลท (Sodium methylate) หรือโซเดียมเมทอกไซด์ (Sodium methoxide) เป็นสารเคมีประเภทต่างแก่ (Strongly base) มีลักษณะเป็นผงสีขาว และยังมีการใช้ในรูปแบบของสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล (Methanol) มีการนำโซเดียมเมทิลเลทไปใช้ในหลากหลายด้าน เช่น ใช้ในการสังเคราะห์ยา หรือใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล เป็นต้น

การผลิตโซเดียมเมทิลเลทสามารถผลิตได้ 2 วิธี วิธีแรกเป็นการทำปฏิกิริยาของโลหะโซเดียม (Sodium metal) กับเมทานอล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมเมทิลเลทและเกิดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen) เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังสมการที่ 1.1 โดยปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่มีการคายความร้อนสูง (Highly exothermic reaction) จึงต้องควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ให้สูงเกินไป และมีข้อจำกัดเรื่องต้นทุนของโลหะโซเดียมที่มีราคาสูง [3], [4]



วิธีที่สองเป็นการทำปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเมทานอล เกิดผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมเมทิลเลทและเกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังสมการที่ 1.2 น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาจะต้องถูกกำจัดออกจากสารละลายเพราะจะไปรบกวนกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากจะทำให้เกิดสบู่ ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลท



ปฏิกิริยาที่กล่าวมาข้างต้นแต่ละวิธีจะมีทั้งข้อดีข้อด้อยที่ต่างกันไป โดยเมื่อเปรียบเทียบกับด้วยราคาของวัตถุดิบที่ใช้ วิธีแรกจะมีต้นทุนที่สูงกว่าเนื่องจากโลหะโซเดียมราคาสูงกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีขั้นตอนที่ใช้ในการผลิตวิธีที่ 2 จะมีขั้นตอนที่ยากกว่าเพราะจำเป็นต้องมีวิธีในการแยกน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ 2 ออกก่อน เพื่อให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดไว้ให้มีน้ำน้อยกว่าร้อยละ 0.2 สาเหตุที่ต้องควบคุมปริมาณน้ำเนื่องจากโซเดียมเมทิลเลทจะผันกลับไปเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในการผลิตไบโอดีเซลที่มีไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง คือ ปฏิกิริยาซาฟอนิฟิเคชัน (Saponification) กับไตรกลีเซอไรด์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอล (Glycerol) กับสบู่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 1.3 ส่งผลให้ผลได้ (yield) ของการผลิตไบโอดีเซลลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีขั้นตอนที่ใช้ในการแยกน้ำออกก่อนนำไปใช้งาน



วิธีการแยกน้ำออกจากแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือการกลั่น แต่การแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทนั้นไม่สามารถใช้การแยกด้วยวิธีการกลั่นได้ เพราะในระบบมีสารที่ระเหยได้สองชนิดคือเมทานอลและน้ำ สารที่ไม่ระเหยอีกหนึ่งชนิดคือโซเดียมเมทิลเลท และเนื่องจากจุดเดือดของน้ำสูงกว่าเมทานอล ถ้านำไปกลั่นเมทานอลที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะระเหยก่อน สารละลายจะมีความเข้มข้นสูงขึ้น โซเดียมเมทิลเลทมีค่าการละลายในเมทานอลสูงสุดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 30 จึงมีโอกาสที่โซเดียมเมทิลเลทจะตกผลึกและติดค้างอยู่ในหอกกลั่นได้ ทำให้กระบวนการกลั่นไม่สามารถใช้แยกสารที่ต้องการได้

วิธีการสตริบปิ้งเป็นการแยกตัวถูกละลายออกจากของเหลวผสมโดยใช้สตริบปิ้งแก๊ส ที่มีคุณสมบัติในการเลือกที่จะแยกเฉพาะตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในสารละลายนั้นเท่านั้น ทำให้เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ให้เกิดงานวิจัยที่จะทำการศึกษากระบวนการแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทด้วยวิธีการสตริบปิ้งโดยอาศัยไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง (Superheated methanol vapor) เป็นสตริบปิ้งแก๊ส การที่เลือกใช้ไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการไม่มีการปนเปื้อนสารชนิดอื่น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษากระบวนการแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทด้วยวิธีการสตริบปิ้งโดยอาศัยไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งเป็นสตริบปิ้งแก๊ส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทด้วยวิธีการสตริบปิ้งโดยมีปัจจัยที่ต้องการศึกษาดังนี้

1. ผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง (Superheated methanol vapor) ที่อุณหภูมิ 100 120 และ 140 องศาเซลเซียส
2. ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมเมทิลเลทจากร้อยละ 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก
3. ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่ 1:1.3 1:1.5 และ 1:2 เท่าของอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)max) โดยการใช้การเปลี่ยนอัตราการป้อนของสารละลายโซเดียมเมทิลเลท

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้พัฒนากระบวนการผลิตโซเดียมเมทิลเลทจากโซเดียมไฮดรอกไซด์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

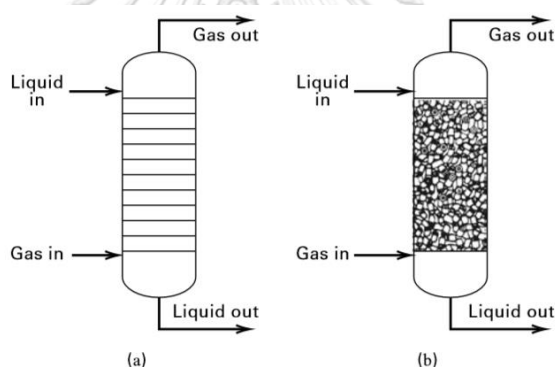
2.1 การดูดซึม (Absorption) และการstripping (Stripping)

การดูดซึมและการstripping เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับของเหลวและแก๊ส การดูดซึมเป็นการถ่ายโอนจากแก๊สไปยังของเหลว และการstrippingเป็นการถ่ายโอนจากของเหลวไปยังแก๊ส โดยใช้หลักการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer) ที่มีผลต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) ระหว่างของเหลวกับแก๊สเป็นแรงขับ (Driving force) การดูดซึมสามารถใช้งานเกี่ยวกับการขจัดสารสิ่งปลอมปนหรือสารพิษออกจากแก๊ส และการนำสารเคมีที่มีค่ากลับมาใช้ใหม่ สารที่ดึงตัวถูกละลาย (Solute) ออกจากแก๊สผสมจะถูกเรียกว่าตัวทำละลาย (Solvent) หรือของเหลวดูดซึม (Liquid absorbent) ซึ่งต้องมีความสามารถในการละลายตัวถูกละลายได้ดีกว่าตัวทำละลายเดิม และของเหลวดูดซึมที่นำมาใช้ควรราคาถูก เสถียร ไม่ระเหย ไม่กัดกร่อน ไม่มีพิษ ไม่หนืด ไม่เป็นฟอง และไม่ติดไฟ ตัวทำละลายที่ใช้ปกติจะเป็นน้ำ ใช้น้ำมันกับไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และตัวทำละลายพิเศษสำหรับแก๊สที่เป็นกรด ส่วนการstrippingที่เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการดูดซึม พบการใช้งานในด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสีย และใช้ควบคู่กับการดูดซึมในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเพื่อนำของเหลวดูดซึมกลับมาใช้ใหม่ โดยแก๊สที่จะใช้strippingแก๊สควรมีคุณสมบัติเหมือนกับของเหลวดูดซึม โดยทั่วไปจะเลือกใช้ไอน้ำ (Steam) และแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen) เป็นstrippingแก๊ส

การดูดซึมสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

1. การดูดซึมทางกายภาพ (Physical absorption) เป็นกระบวนการดูดซึมที่ของเหลวดูดซึมมีความสามารถในการละลายตัวถูกละลายมากกว่าตัวทำละลายเดิม โดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างของเหลวดูดซึมกับตัวถูกละลาย เช่น การแยกน้ำออกจากไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น
2. การดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption) เป็นกระบวนการดูดซึมที่ของเหลวดูดซึมกับตัวถูกละลายเกิดปฏิกิริยาเคมีกัน เช่น การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นของเหลวดูดซึมไอกรด (Acid gas) เป็นต้น

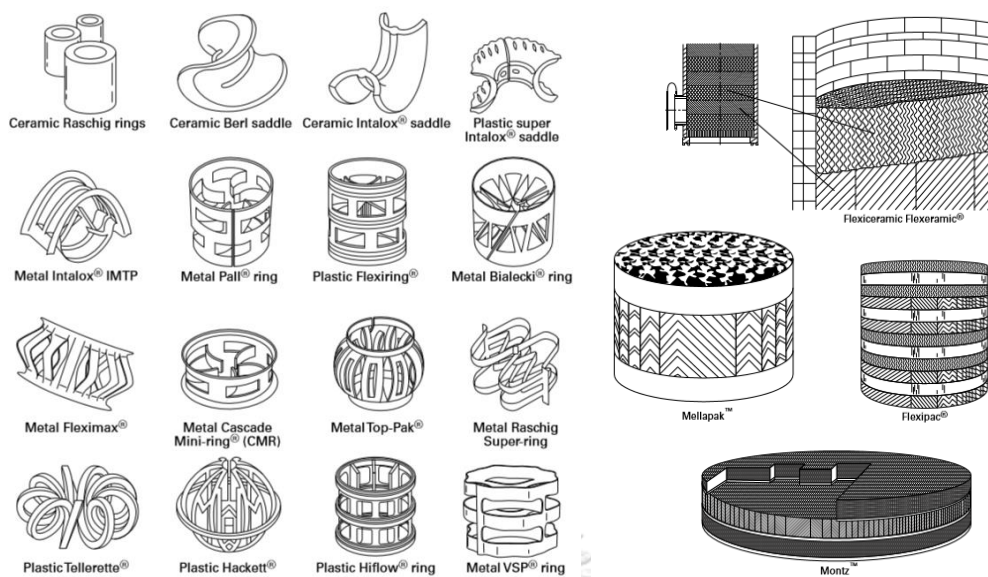
อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการดูดซึมและการสทริปปิ้งโดยทั่วไปจะเป็นทรงกระบอกแนวตั้ง ลักษณะเดียวกับหอกถัน เรียกหอนั้นว่าหอดูดซึม (Absorber) หรือหอสทริปปเปอร์ (Stripper) ภายในประกอบด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นถาดเป็นชั้นๆ เรียกหอลักษณะนี้ว่า หอแบบถาด (Trayed tower หรือ Plate tower) หรือมีการบรรจุวัสดุเข้าไป เรียกหอลักษณะนี้ว่า หอแบบแพ็ค (Packed tower) เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัส ระหว่างของเหลวกับแก๊สให้มากขึ้น การที่โมเลกุลสามารถถ่ายเทจากสภาพของเหลวไปยังสภาพแก๊สได้เนื่องจากทั้ง 2 เฟสมีความเข้มข้นที่ต่างกัน (Concentration gradient) ที่ผิวของของเหลวและแก๊สเป็นแรงขับ (Driving force) ให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งหอดูดซึมจะทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำและ/หรือความดันสูง ในขณะที่หอสทริปปเปอร์จะทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและ/หรือความดันต่ำ แก๊สจะไหลเข้าสู่ส่วนล่างของหอ และจะออกไปทางด้านบน ของเหลวผสมจะเข้ามาทางส่วนบนของหอ และไหลออกทางด้านล่าง ในรูปที่ 1 แสดงประเภทของหอ(a) หอแบบถาด (Trayed tower) และ(b) หอแบบแพ็ค (Packed tower) [5]



รูปที่ 1 ชนิดของหอดูดซึม
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

(a) แบบถาด (Trayed tower) และ (b) หอแบบแพ็ค (Packed tower)

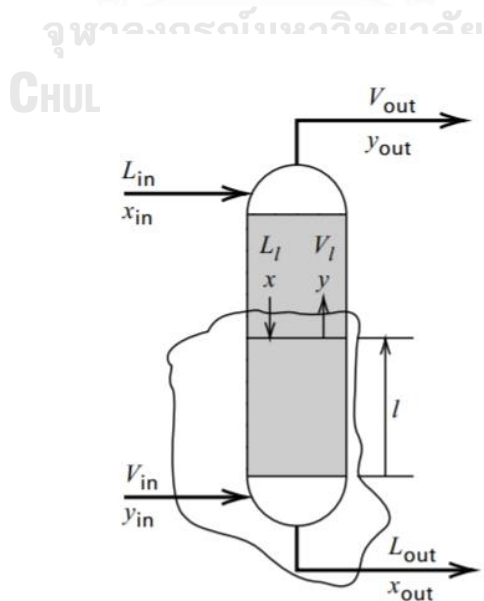
หอแบบแพ็คจะบรรจุแพ็คกิ้ง (Packing) ซึ่งเป็นวัสดุไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่ใช้ในกระบวนการสทริปปิ้ง ซึ่งออกแบบให้พื้นที่ผิวของฟิล์มของเหลวมีค่ามากขึ้น แพ็คกิ้งมีรูปร่างต่าง ๆ และทำจากวัสดุต่าง ๆ เช่น เซรามิก พลาสติก และเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น ในรูปที่ 2 แสดงชนิดของแพ็คกิ้งที่นิยมใช้งาน[5]



รูปที่ 2 ชนิดของแพ็คกิ้ง

2.2 การออกแบบหอสตริปเปอร์ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร

หอสตริปเปอร์ที่แสดงในรูปที่ 3 เป็นการไหลแบบสวนทาง (Countercurrent flow) โดยแก๊สสตริปเปอร์จะถูกป้อนเข้าที่ด้านล่างของหอ จึงมีกำหนดให้นับชั้น (Stage) โดยเริ่มนับจากด้านล่างไปยังด้านบนของหอสตริปเปอร์ และกำหนดให้เกิดสถานะสมดุลของเฟสระหว่างไอกับของเหลวในแต่ละชั้น[5]



รูปที่ 3 สถานะสมดุลของหอสตริปเปอร์ที่มีการดำเนินการด้วยการไหลแบบสวนทาง

2.2.1 เส้นสมดุล (Equilibrium Curves)

สำหรับตัวถูกละลายที่ชั้น (stage) n ใดๆ ค่า K คือ

$$K_n = \frac{y_n}{x_n} \quad (2.1)$$

K_n คือ ค่าคงที่เส้นสมดุลในชั้นที่ n

y_n คือ อัตราส่วนโดยโมลของตัวถูกละลายในของเหลว

x_n คือ อัตราส่วนโดยโมลของตัวถูกละลายในของเหลว

2.2.2 เส้นดำเนินการ (Operating Line)

พิจารณาจากรูปที่ 3 เมื่อทำสมดุลมวลสาร (Material balance) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$xL_l + y_{in}V_{in} = x_{out}L_{out} + yV_l \quad (2.2)$$

x คือ อัตราส่วนโดยโมลของตัวถูกละลายในของเหลว

x_{out} คือ อัตราส่วนโดยโมลของตัวถูกละลายในของเหลวที่ออกจากหอ

y คือ อัตราส่วนโดยโมลของตัวถูกละลายในของเหลว

y_{in} คือ อัตราส่วนโดยโมลของตัวถูกละลายในของเหลวขาที่เข้าไปในหอ

L_l คือ อัตราการไหลของของเหลวที่ความสูง l

L_{out} คือ อัตราการไหลของของเหลวที่ออกจากหอ

V_l คือ อัตราการไหลของไอที่ความสูง l

V_{in} คือ อัตราการไหลของไอที่เข้าไปในหอ

กำหนดให้เป็นระบบของสารละลายเจือจาง $L=L_l=L_{out}$ และ $V=V_l=V_{in}$ และจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$y = x \left(\frac{L}{V} \right) + y_{in} - x_{out} \left(\frac{L}{V} \right) \quad (2.3)$$

สำหรับกระบวนการสตริบปี้ง เมื่อวาดเส้นดำเนินการ (Operating line) ลงบนกราฟสัดส่วนโดยโมล จะได้เส้นดำเนินการ (Operating line) จะอยู่ต่ำกว่าเส้นสมดุล (Equilibrium Curves) ซึ่งถ้าพิจารณาจากรูปที่ 4 เส้นดำเนินการ (Operating line) จะเป็นเส้นตรง โดยมีค่าความชันของเส้นดำเนินการ (Operating line) เป็น L/V

2.2.3 อัตราการไหลของแก๊สต่ำที่สุด (Minimum Gas Flow Rate)

ค่าอัตราการไหลของแก๊สต่ำที่สุดสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากเส้นดำเนินการ (Operating line) และค่า K จากเส้นสมดุล (Equilibrium Curves) จึงได้ความสัมพันธ์ดังนี้

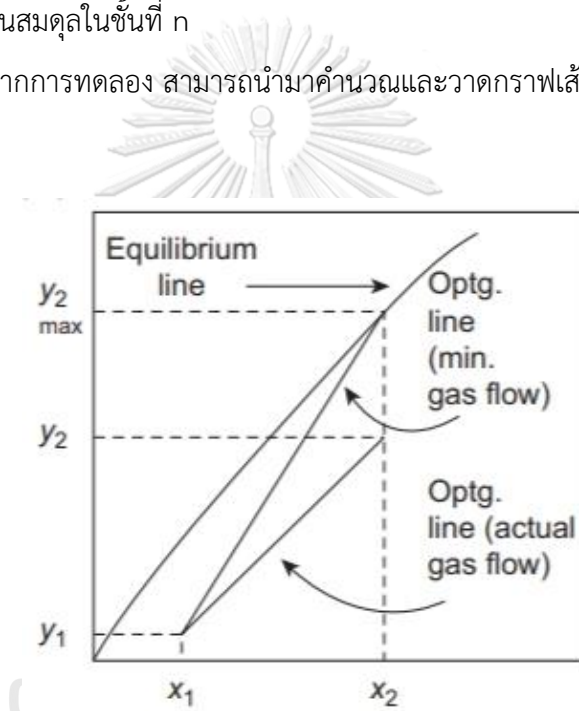
$$V_{min} = \left(\frac{V}{K_n}\right) \text{ (fraction of solute stripped)} \quad (2.4)$$

V_{min} คือ อัตราการไหลของแก๊สต่ำที่สุด

V คือ อัตราการไหลของแก๊ส

K_n คือ ค่าคงที่เส้นสมดุลในชั้นที่ n

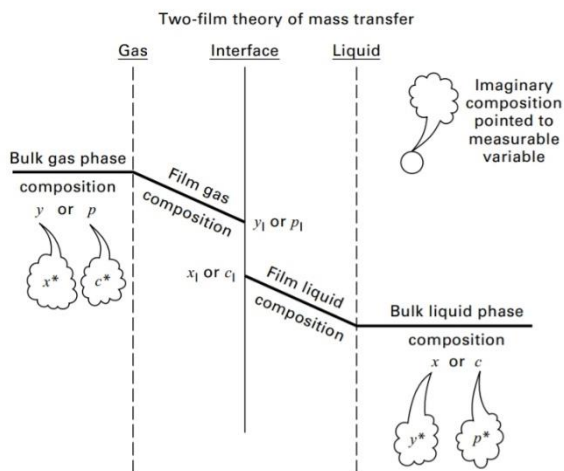
ค่า x-y ที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาคำนวณและวาดกราฟเส้นโค้งสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 Equilibrium line, operating line และ $(L/V)_{max}$ ของหอस्टริปเปอร์

2.2.4 ทฤษฎีสองฟิล์ม (Two film theory)

เนื่องจากในหอस्टริปเปอร์มีการไหล จึงอาศัยทฤษฎีสองฟิล์ม (Two film theory) ซึ่งอธิบายได้ว่า ของเหลวจะถ่ายเทข้ามผ่านชั้นฟิล์มของของเหลวเข้าสู่ผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างของเหลวกับแก๊ส แล้วเคลื่อนที่เข้าสู่เฟสแก๊ส รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างผลต่างของความเข้มข้นของทฤษฎีสองฟิล์มในกรณีการถ่ายเทมวลจากเฟสแก๊สไปสู่เฟสของเหลว



รูปที่ 5 แสดงผลต่างของความเข้มข้นของทฤษฎีสองฟิล์ม

อัตราการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer rate) ในหอस्टริปเปอร์ขึ้นอยู่กับแรงขับ (Driving force) ซึ่งมาจากผลต่างของความเข้มข้นระหว่างเฟส (Concentration gradient) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารในเฟสของของเหลวและเฟสของแก๊ส (k_x, k_y) และพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทมวลสาร (a) ที่หาค่าได้จากแพ็คกิ้ง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.5 โดย I จะเป็นค่าที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส

$$r = k_y a (y - y_I) = k_x a (x_I - x) \quad (2.5)$$

สำหรับในกระบวนการस्टริปปิ้ง การถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นจากเฟสของเหลวเป็นหลัก ทำให้เราจะพิจารณาอัตราการถ่ายเทมวลของเฟสของเหลวไปสู่เฟสแก๊ส และค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวลสารในเฟสของเหลว (k_x) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราจะไม่สามารถวัดค่าความเข้มข้นของสารที่ผิวสัมผัสได้ แต่จะวัดค่าได้เพียงความเข้มข้นของสารในสายป้อนเข้าและสายออกเท่านั้น จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมในเฟสของของเหลว (Overall liquid mass transfer coefficient, $K_x a$) ในการอธิบาย ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$\frac{1}{K_x a} = \frac{1}{k_x a} + \frac{1}{K k_y a} \quad (2.6)$$

เมื่อ K คือ ค่า K สำหรับการละลาย โดยที่ $\frac{1}{K} = \frac{x^* - x_I}{y - y_I}$

a คือ พื้นที่ในการถ่ายเทมวลสารต่อปริมาตรของแพ็คเบด

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li และคณะ [6] ที่ศึกษาเกี่ยวกับพลังงานที่ใช้ในการคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกจากตัวทำละลายที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก (rich solvent) พบว่าเมื่ออุณหภูมิของหม้อต้มซ้ำ (reboiler) เพิ่มขึ้น อัตราการไหลออกของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

Melgaco และคณะ [7] ศึกษาเกี่ยวกับการเก็บแอมโมเนียจากการย่อยสลายของขยะอาหาร โดยใช้การสตรippingและการดูดซึมด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์ พบว่าอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียออกจากของเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้น

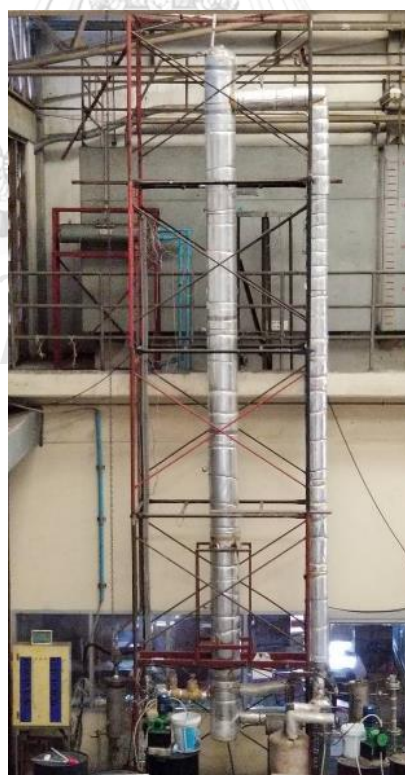
Xiong และคณะ [8] ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เริ่มต้นที่ใช้ในการเตรียมโซเดียมเมทิลเลท (Sodium methylate) และความเร็วในการระเหยของเหลวเพื่อกำจัดน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาออก เพื่อให้ปริมาณโซเดียมเมทิลเลท (Sodium methylate) ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นตาม จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) และความเร็วในการระเหยของเหลว มีผลกับอัตราการลดลงของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) เริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น

บทที่ 3

การทดลองและการวิเคราะห์

3.1 อุปกรณ์

หอสตริปปีงที่ใช้ในการทดลองเป็นหอแบบแพ็คทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร (4 นิ้ว) ความสูง 6 เมตร หุ้มภายนอกด้วยฉนวนใยแก้วทนความร้อน (ดังแสดงในรูปที่ 6) ภายในประกอบด้วยแพ็คกิ้งเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด Metal Intalox IMTP (ดังแสดงในรูปที่ 7) จัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ มีวงแหวนสเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อให้ของเหลวที่อยู่ผิวท่อกระจายตัว ใช้ปั๊มชนิด Metering pump ในการป้อนสารเข้าสู่ระบบ ให้ความร้อนสายป้อนด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำมันร้อน (Hot oil) ควบแน่นไอเมทานอลที่ออกด้านบนของหอถูกควบแน่นด้วยเครื่องควบแน่น (Condenser) อุณหภูมิของโซเดียมเมทิลเลทที่ออกด้านล่างของหอถูกลดลงด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้น้ำหล่อเย็น (Cooling water) เป็นสารแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 6 หอสตริปปีงจริงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 7 Metal Intalox IMTP Packing

Metal Intalox IMTP Packing ที่ใช้งานเป็นรุ่น IMTP 25 โดยมีขนาดระบุ (Nominal size) 25 มิลลิเมตร ค่าพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface area per unit volume, a) 242.8 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร (m^2/m^3) ค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) 224 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) สัดส่วนของพื้นที่ที่แก๊สครองอยู่ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของช่องทางการไหล (Void fraction, α) ร้อยละ 97

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

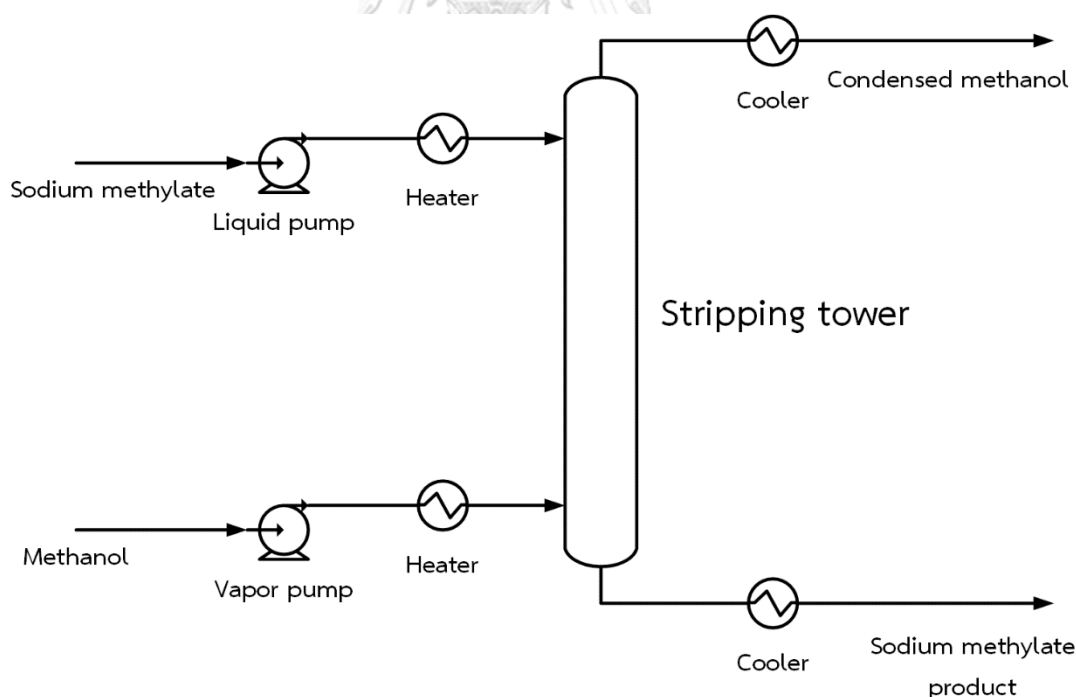
สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดวิเคราะห์ และเกรดอุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	เกรด/ความบริสุทธิ์
Sodium Methylate Solution in Methanol	30%wt
Methanol	99.9%wt
Hydrochloric acid	37%wt
Standard Sodium Hydroxide Solution 1 M	Analytical
Phenolphthalein	Analytical
Barium Chloride	Analytical
HYDRANAL™ - Coulomat AG	Analytical

3.3 วิธีการทดลอง

รูปที่ 8 แสดงแผนภาพของระบบสตรippingที่ใช้ในการทดลอง เมทานอลร้อยละ 99.9 จะถูกป้อนจากถังเก็บเข้าสู่ระบบด้วยปั๊มชนิด Metering pump ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้น้ำมันเป็นตัวกลางให้ความร้อน และใช้เครื่องให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าเป็นตัวให้ความร้อนกับน้ำมัน เพื่อเปลี่ยนสถานะเมทานอลเหลวให้กลายเป็นไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง ไอเมทานอลจะถูกป้อนเข้าไปบริเวณด้านล่างของหอสตรipping สารละลายที่เป็นของเหลวเริ่มต้นจะถูกสูบเข้าสู่ระบบโดยใช้ปั๊มชนิด Metering pump ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้น้ำมันเป็นตัวกลางให้ความร้อน และใช้เครื่องให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าเป็นตัวให้ความร้อนกับน้ำมัน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 75 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะป้อนสารละลายเข้าบริเวณด้านบนของหอสตรipping ไอเมทานอลจะออกมาบริเวณด้านบนของหอสตรipping แล้วผ่านเครื่องคอนเดนเซอร์ที่ใช้น้ำหล่อเย็นเป็นสารหล่อเย็น เพื่อควบแน่นไอเมทานอลให้เมทานอลกลับมาอยู่ในรูปของเหลวก่อนเข้าถังเก็บ สารละลายจะออกมาที่ด้านล่างของหอสตรipping ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของสารละลายก่อนเข้าถังเก็บ



รูปที่ 8 แผนภาพของระบบสตรippingที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 แสดงสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 สภาวะในการทดลอง

ตัวแปรที่ศึกษา	สภาวะในการทดลอง
อุณหภูมิของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง	100 120 และ 140 องศาเซลเซียส
อัตราส่วนการป้อนของสารละลายต่อไอ	1:1.3 1:1.5 และ 1:2 เท่าของอัตราส่วนของสารละลายต่อไอสูงสุด
ความเข้มข้นของโซเดียมเมทิลเลท	ร้อยละ 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

3.3.1 ขั้นตอนการเริ่มต้นการทดลอง

1. เปิดเครื่องทำความร้อนให้ความร้อนแก่ถังน้ำมันร้อนทั้ง 2 สาย
2. เปิดระบบทำความเย็น
3. เปิดปั๊มของสายไอเมทานอลเพื่อเพิ่มความดันและให้ความร้อนแก่หอสทริปปิง
4. ปรับอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอเมทานอลป้อนเข้าที่ต้องการศึกษา
5. เปิดปั๊มของสายสารละลาย
6. ปรับอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารละลายป้อนเข้าที่ต้องการศึกษา
7. เริ่มจับเวลาและจดบันทึกผลการทดลอง
8. รอจนกว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ซึ่งทราบได้จากค่าความดันภายในหออุณหภูมิภายในหอ และความเข้มข้นของสารในตัวอย่างมีค่าคงที่ โดยมีการเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ทุก ๆ 2 ชั่วโมง

3.3.2 ขั้นตอนการทดลองในสภาวะปกติ

หลังจากที่ปรับค่าสภาวะต่าง ๆ ได้ตามที่ต้องการแล้ว ในระหว่างทำการทดลองทุก ๆ 2 ชั่วโมง จะมีการจดบันทึกอุณหภูมิ การวัดอัตราการไหลของสารขาเข้าและขาออก และมีการเก็บตัวอย่างสารขาออก โดยมีรายละเอียดการทำงานดังนี้

3.3.2.1 วิธีการวัดอัตราการไหลของไอเมทานอลป้อนเข้า

1. เตรียมเมทานอลใส่ถังไว้ประมาณ 4 กิโลกรัม
2. นำถังเมทานอลที่เตรียมไว้ไปชั่งน้ำหนัก แล้วกวดตั้งค่าให้น้ำหนักเป็นศูนย์
3. ย้ายสายฝั่งดูดของปั๊มของสายป้อนไอเมทานอลจากถังเมทานอลไปยังถังที่เตรียมไว้แล้วเริ่มจับเวลา

4. จับเวลา 6 นาที นำสายฝิ่งดูดกลับเข้าถังเมทานอล แล้วนำถังที่ใช้ไปชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณหาอัตราการไหลโดยนำน้ำหนักที่อ่านได้ คูณ 10 เพื่อให้หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.3.2.2 วิธีการวัดอัตราการไหลของไอเมทานอลขาออก

1. นำถังเปล่าไปชั่งน้ำหนัก แล้วกดตั้งค่าให้น้ำหนักเป็นศูนย์
2. นำถังไปรองรับเมทานอลที่ควบแน่นลงมา แล้วเริ่มจับเวลา
3. จับเวลา 6 นาที แล้วนำถังที่ใช้ไปชั่งน้ำหนัก
4. คำนวณหาอัตราการไหลโดยนำน้ำหนักที่อ่านได้ คูณ 10 เพื่อให้หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.3.2.3 วิธีการวัดอัตราการไหลของสารละลายป้อนเข้า

1. นำถังที่ใส่สารละลายขึ้นบนเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วกดตั้งค่าให้น้ำหนักเป็นศูนย์ แล้วเริ่มจับเวลา
2. จับเวลา 30 นาที แล้วอ่านค่าน้ำหนักที่ลดลง
3. คำนวณหาอัตราการไหลโดยนำน้ำหนักที่อ่านได้ คูณ 2 เพื่อให้หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.3.2.4 วิธีวัดอัตราการไหลของสารละลายขาออก

1. นำถังเปล่าไปชั่งน้ำหนัก แล้วกดตั้งค่าให้น้ำหนักเป็นศูนย์
2. นำถังไปรองรับเมทานอลที่ควบแน่นลงมา แล้วเริ่มจับเวลา
3. จับเวลา 30 นาที แล้วนำถังที่ใช้ไปชั่งน้ำหนัก
4. คำนวณหาอัตราการไหลโดยนำน้ำหนักที่อ่านได้ คูณ 2 เพื่อให้หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.3.2.5 วิธีเก็บตัวอย่าง

เริ่มเก็บตัวอย่างหลังจากเริ่มการทดลองแล้ว 4 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างทุก ๆ 2 ชั่วโมง จากถังที่เก็บสารขาออกในระยะเวลา 30 นาที เขย่าถังให้สารผสมกันดี เก็บสารใส่ในขวดตัวอย่างครั้งละ 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

นำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในตัวอย่างด้วยเทคนิคไทเทรตด้วยเครื่องคาร์ล ฟิชเชอร์ (Karl Fischer) และหาปริมาณโซเดียมเมทิลเลทด้วยการไทเทรต [9]

3.4.1 วิเคราะห์หาปริมาณน้ำในตัวอย่างด้วยเทคนิคไทเทรตด้วยเครื่องคาร์ล ฟิชเชอร์ (Karl Fischer)

1. นำตัวอย่างใส่หลอดฉีดยาประมาณ 2 มิลลิลิตร
2. นำหลอดฉีดยาไปชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น
3. กดปุ่มเริ่มต้น ให้เครื่องคาร์ล ฟิชเชอร์ (Karl Fischer) เริ่มทำงาน
4. ฉีดตัวอย่างเข้าไปที่เครื่องประมาณ 10 หยด
5. นำหลอดฉีดยาไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกน้ำหนักหลังฉีดตัวอย่าง
6. คำนวณหาปริมาณตัวอย่างที่ใช้ จากน้ำหนักเริ่มต้นลบด้วยน้ำหนักหลังฉีดตัวอย่าง
7. ป้อนค่าน้ำหนักที่คำนวณได้ลงในเครื่องคาร์ล ฟิชเชอร์ (Karl Fischer)
8. รอจนเครื่องทำงานจนเสร็จ
9. บันทึกผลการวิเคราะห์

3.4.2 การไทเทรตเพื่อหาปริมาณโซเดียมเมทิลเลท

1. นำตัวอย่างใส่หลอดฉีดยาประมาณ 2 มิลลิลิตร
2. นำหลอดฉีดยาไปชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักเริ่มต้น
3. นำตัวอย่างใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. นำหลอดฉีดยาไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บันทึกน้ำหนักสุดท้าย
5. คำนวณหาปริมาณตัวอย่างที่ใช้ จากน้ำหนักเริ่มต้นลบด้วยน้ำหนักสุดท้าย
6. เติมน้ำกลั่นจำนวน 50 มิลลิลิตร
7. เติมสารละลายบัฟเฟอร์แบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่
8. เติมฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) จำนวน 3 หยด
9. ไทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 M ที่รู้ความเข้มข้นที่แน่นอน
10. คำนวณความเข้มข้นของโซเดียมเมทิลเลทจากสูตร

$$\text{ความเข้มข้นของ } NaOCH_3 (\%) = \frac{\text{ปริมาณ } HCl \text{ ที่ใช้ (ml)} \times \text{ความเข้มข้น } HCl \text{ ที่ใช้ } \times 5.4}{\text{ปริมาณของ } NaOCH_3 \text{ ที่ใช้ (g)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณโซเดียมเมทิลเลท

- กำหนดให้
1. ใช้ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก 5 มิลลิลิตร
 2. ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1.026 M
 3. ใช้ปริมาณโซเดียมเมทิลเลท 1.985 กรัม

$$\text{ความเข้มข้นของ } NaOCH_3 = \frac{5.0 \times 1.026 \times 5.4}{1.985} = 13.96 \%$$

3.4.3 การไทเทรตหาความเข้มข้นที่ของกรดไฮโดรคลอริกที่แน่นอน

1. ปิเปตต์สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐาน 1 M จำนวน 20 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. เติมฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) จำนวน 3 หยด
3. ไทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ต้องการหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอน
4. คำนวณหาค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจากสูตร

$$\text{ความเข้มข้น } HCl (M) = \frac{\text{ปริมาณของ } NaOH \text{ ที่ใช้ (ml)} \times \text{ความเข้มข้น } NaOH \text{ ที่ใช้}}{\text{ปริมาณของ } HCl \text{ ที่ใช้ (ml)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาความเข้มข้นที่ของกรดไฮโดรคลอริกที่แน่นอน

- กำหนดให้
1. ใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐานจำนวน 20 มิลลิลิตร
 2. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐาน 1.005 M
 3. ใช้ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก 19.6 มิลลิลิตร

$$\text{ความเข้มข้น } HCl = \frac{20 \times 1.005}{19.6} = 1.026 M$$

3.5 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน

ค่าความคลาดเคลื่อนในการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์ โดยความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้มาจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในสภาวะการทดลองเดียวกัน ส่วนความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์จะได้รับการนำตัวอย่างเดียวกันมาวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อแสดงว่าการวิเคราะห์ไม่มีความผิดพลาดผลที่ได้จะถูกนำมาคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{n}$$

\bar{X} = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

$\sum x$ = ผลรวมของข้อมูล

n = จำนวนข้อมูล

$$\text{Max. error} = \text{Max. value} - \text{Avg. value}$$

$$\text{Min. error} = \text{Min. value} - \text{Avg. value}$$

Max. error = ค่าความคลาดเคลื่อนค่าสูง

Min. error = ค่าความคลาดเคลื่อนค่าต่ำ

Max. value = ค่าสูงสุด

Min. value = ค่าต่ำสุด

Avg. value = ค่าเฉลี่ย

$$\%Error = \frac{\text{Maximum error}}{\text{Avg. value}} \times 100$$

%Error = ค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ

Maximum error = ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด

Avg. value = ค่าเฉลี่ย

ในการประเมินความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะใช้การทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่ 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)max) และปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก (เทียบเท่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมเมทิลเลทป้อนเข้าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก) โดยค่าแต่ละค่าที่สภาวะที่กำหนดมีการเก็บตัวอย่างไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าที่ต้องการ

ตารางที่ 3.3 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ

	การทดลอง			เฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	14.0	13.5	14.0	13.833	0.167	-0.333	2.41
Vapor Temp IN (°C)	120.2	115.9	117.2	117.767	2.433	-1.867	2.07
Liquid Temp IN (°C)	75.6	76.4	76.8	76.267	0.533	-0.667	0.87
Vapor Temp OUT (°C)	85.3	85.2	85.1	85.200	0.100	-0.100	0.12
Liquid Temp OUT (°C)	83.8	83.8	83.7	83.767	0.033	-0.067	0.08
Column Temp Avg (°C)	84.2	84.1	84.1	84.133	0.067	-0.033	0.08
Vapor flow rate IN (kg/h)	21.05	21.11	21.04	21.067	0.043	-0.027	0.21
Vapor Water IN (%)	0.03	0.04	0.03	0.033	0.007	-0.003	20.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.85	20.85	20.98	20.893	0.087	-0.043	0.41
Vapor Water OUT (%)	1.82	1.74	1.61	1.723	0.097	-0.113	6.58
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.05	5.96	5.89	5.967	0.083	-0.077	1.40
Liquid Water IN (%)	6.26	6.43	6.20	6.297	0.133	-0.097	2.12
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	6.00	6.07	5.93	6.000	0.070	-0.070	1.17
Liquid Water OUT (%)	0.14	0.17	0.18	0.163	0.017	-0.023	14.29

ในการประเมินความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะใช้การทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่ 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)_{max}) และความเข้มข้นสารละลายโซเดียมเมทิลเลทป้อนเข้าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยค่าแต่ละค่าที่สภาวะที่กำหนดมีการเก็บตัวอย่างไม่น้อยกว่า 3 ตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าที่ต้องการ

ตารางที่ 3.4 ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ

	การทดลอง			เฉลี่ย	ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.0	13.8	13.0	13.267	0.533	-0.267	4.02
Vapor Temp IN (°C)	120.4	121.0	120.5	120.633	0.367	-0.233	0.30
Liquid Temp IN (°C)	74.0	74.1	76.0	74.700	1.300	-0.700	1.74
Vapor Temp OUT (°C)	94.6	95.2	95.2	95.000	0.200	-0.400	0.42
Liquid Temp OUT (°C)	96.2	96.6	96.9	96.567	0.333	-0.367	0.38
Column Temp Avg (°C)	95.4	96.0	95.8	95.733	0.267	-0.333	0.35
Vapor flow rate IN (kg/h)	20.80	21.08	20.92	20.933	0.147	-0.133	0.70
Vapor Water IN (%)	0.02	0.06	0.04	0.040	0.020	-0.020	50.00
Vapor flow rate OUT (kg/h)	19.79	20.16	20.14	20.030	0.130	-0.240	1.20
Vapor Water OUT (%)	1.89	2.00	1.94	1.943	0.057	-0.053	2.92
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.98	6.99	6.94	6.970	0.020	-0.030	0.43
Liquid Water IN (%)	6.28	6.72	6.61	6.537	0.183	-0.257	3.93
Liquid Methylate IN (%)	18.66	18.34	18.46	18.487	0.173	-0.147	0.94
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.95	7.37	7.37	7.563	0.387	-0.193	5.11
Liquid Water OUT (%)	0.97	0.99	0.93	0.963	0.027	-0.033	3.46
Liquid Methylate OUT (%)	16.56	17.02	17.09	16.890	0.200	-0.330	1.95

ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์จะได้จากการนำตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง มาทำการวิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อแสดงว่าการวิเคราะห์มีความผิดพลาดน้อย

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์

	การวิเคราะห์				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Water Content (%)	0.90	0.92	0.90	0.91	0.01	-0.01	1.47
Sodium Methylate Content (%)	17.19	17.33	17.24	17.25	0.08	-0.06	0.44

3.6 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient ($K_L a$))

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient ($K_L a$)) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทมวลสาร สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$K_L a = \frac{u_L}{z} \ln\left(\frac{C_{water,in}}{C_{water,out}}\right)$$

$K_L a$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (วินาทียกกำลังลบหนึ่ง, s^{-1})

u_L = ความเร็วในการไหลของของเหลว (เมตรต่อวินาที, m/s)

z = ความสูงของแพ็คกิ้งในหอस्टриปีง (เมตร, m)

$C_{water,in}$ = ความเข้มข้นของน้ำในของเหลวป้อนเข้า (ร้อยละโดยมวล)

$C_{water,out}$ = ความเข้มข้นของน้ำในของเหลวขาออก (ร้อยละโดยมวล)

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม

- กำหนดให้
1. ความเร็วในการไหลของของเหลว 1.9×10^{-4} เมตรต่อวินาที
 2. ความสูงของแพ็คกิ้งในหอस्टриปีง 6 เมตร
 3. ความเข้มข้นของน้ำในของเหลวป้อนเข้าร้อยละ 6.05 โดยน้ำหนัก
 4. ความเข้มข้นของน้ำในของเหลวขาออกร้อยละ 0.13 โดยน้ำหนัก

$$K_L a = \frac{1.9 \times 10^{-4}}{6} \ln\left(\frac{6.05}{0.13}\right) = 1.23 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

3.7 การคำนวณค่าสภาวะที่ใช้หอस्टริปปิ้ง

3.7.1 การคำนวณความเร็วการไหลของไอเมทานอล

ความเร็วในการไหลของไอเมทานอลสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$u_V = \frac{\dot{m}}{\rho_V \left(\frac{\pi}{4} D^2\right)}$$

u_V = ความเร็วในการไหลของไอเมทานอล (เมตรต่อวินาที, m/s)

\dot{m} = อัตราการไหลของไอเมทานอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง, kg/h)

ρ_V = ความหนาแน่นของไอเมทานอล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, kg/m³)

D = ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของหอस्टริปปิ้ง (เมตร, m)

ตัวอย่างการคำนวณความเร็วการไหลของไอเมทานอล

- กำหนดให้
1. อัตราการไหลของไอเมทานอล 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
 2. ความหนาแน่นของไอเมทานอล 1.929 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 3. ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของหอस्टริปปิ้ง 0.1016 เมตร

$$u_V = \frac{21}{1.929 \left(\frac{\pi}{4} 0.1016^2\right)} = 0.373 \text{ m/s}$$

3.7.2 การคำนวณความเร็วการไหลในสภาวะการท่วม (Flooding)

การคำนวณความเร็วการไหลในสภาวะการท่วมสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_T = \left[\frac{4VM_V}{f u_{V,f} \pi \rho_V} \right]^{0.5}$$

$$u_{V,f} = \frac{4\dot{m}}{f \pi \rho_V D_T^2}$$

$u_{V,f}$ = ความเร็วการไหลในสภาวะการท่วม (เมตรต่อวินาที, m/s)

\dot{m} = อัตราการไหลของไอเมทานอล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง, kg/h)

ρ_V = ความหนาแน่นของไอเมทานอล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, kg/m³)

D_T = ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของหอस्टริปปิ้ง (เมตร, m)

f = ค่าสัมประสิทธิ์ของการท่วม (ค่าที่ใช้ 0.5-0.7)

ตัวอย่างการคำนวณความเร็วการไหลในสภาวะการท่วม

- กำหนดให้
1. อัตราการไหลของไอเมทานอล 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
 2. ความหนาแน่นของไอเมทานอล 1.929 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 3. ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของหอस्टриปีง 0.1016 เมตร
 4. ค่าสัมประสิทธิ์ของการท่วม 0.7

$$u_{v,f} = \frac{4(21)}{(0.7)\pi(1.929)(0.1016)^2} = 0.533 \text{ m/s}$$



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอลด้วยวิธีการสตรีปปีง เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากสารละลาย การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ การทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ และการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ แต่ละชุดจะทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 100 120 และ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่ 1:1.3 1:1.5 และ 1:2 เท่าของอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)_{max}) และปริมาณน้ำในของเหลวที่ป้อนเข้าร้อยละ 3.23 4.76 และ 6.25 (เทียบเท่าสารละลายโซเดียมเมทิลเลทที่ร้อยละ 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก)

การทดลองถูกนำเสนอและอภิปรายตามลำดับต่อไปนี้

- 4.1 ผลการทดลอง
- 4.2 ปრაกฏการณ์การถ่ายเทมวลสารและการถ่ายเทความร้อน
- 4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง
- 4.4 ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)
- 4.5 ผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า
- 4.6 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient ($K_o a$))

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 การทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ

การทดลองทั้งหมดทำในหอสตรีปปีงต้นแบบ หลังจากเริ่มต้นการทดลองแล้ว จะดำเนินการทดลองจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) โดยมีการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 2 ชั่วโมง จึงทำการปรับเปลี่ยนสภาวะเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นในสภาวะต่าง ๆ โดยมีการกำหนดสภาวะพื้นฐานที่อุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่ 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)_{max}) (อัตราการป้อนไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของสารละลายที่ 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) และปริมาณ

น้ำในของเหลวที่ป้อนเข้าร้อยละ 6.25 กำหนดอุณหภูมิการป้อนเข้าของสารละลายที่ 76 องศาเซลเซียส เพื่อให้ใกล้เคียงกับจุดเดือดของเมทานอลที่สภาวะ 2 บรรยากาศ

4.1.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง

ตารางที่ 4.1.1.1 แสดงผลการทดลองของการเปลี่ยนอุณหภูมิไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากสารละลาย โดยทำการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 100 120 และ 140 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของสารละลายที่ 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิการป้อนเข้าของสารละลายที่ 76 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1.1.1 แสดงผลการทดลองของการเปลี่ยนอุณหภูมิไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง

	100 (°C)	120 (°C)	140 (°C)
Column Pressure (psi)	13.5	13.8	14.5
Vapor Temp IN (°C)	99.8	117.8	139.3
Liquid Temp IN (°C)	76.9	76.3	76.5
Vapor Temp OUT (°C)	83.9	85.2	85.8
Liquid Temp OUT (°C)	82.5	83.8	84.4
Column Temp Avg (°C)	82.9	84.1	84.8
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.00	21.07	21.09
Vapor Water IN (%)	0.04	0.03	0.03
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	19.93	20.89	21.35
Vapor Water OUT (%)	1.80	1.72	1.66
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	5.98	5.97	5.97
Liquid Water IN (%)	6.15	6.30	6.24
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.22	6.00	5.49
Liquid Water OUT (%)	0.16	0.16	0.14

*ผลการทดลองที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจากตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก

4.1.1.2 ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)

ตารางที่ 4.1.1.2 แสดงผลการทดลองของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากสารละลาย โดยทำการศึกษาที่สภาวะอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่ 1:1.3 1:1.5 และ 1:2 เท่าของอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)_{max}) อัตราการป้อนไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิการป้อนเข้าของสารละลายที่ 76 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 120 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1.1.2 แสดงผลการทดลองของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)

	1:1.3	1:1.5	1:2
Column Pressure (psi)	13.0	13.8	13.3
Vapor Temp IN (°C)	118.8	117.8	120.6
Liquid Temp IN (°C)	79.2	76.3	75.1
Vapor Temp OUT (°C)	85.2	85.2	85.1
Liquid Temp OUT (°C)	83.7	83.8	83.9
Column Temp avg (°C)	84.1	84.1	84.2
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.01	21.04	21.05
Vapor Water IN (%)	0.02	0.03	0.03
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.61	20.98	21.15
Vapor Water OUT (%)	2.15	1.61	1.26
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	7.17	5.89	4.71
Liquid Water IN (%)	6.57	6.20	6.05
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.20	5.93	4.53
Liquid Water OUT (%)	0.22	0.18	0.13

*ผลการทดลองที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจากตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก

4.1.1.3 ผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า

ตารางที่ 4.1.1.3 แสดงผลการทดลองของปริมาณน้ำในสารละลายป้อนเข้าเพื่อศึกษาผลของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า ที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากสารละลาย โดยทำการศึกษาที่สภาวะปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้าร้อยละ 3.23 4.76 และ 6.25 (เทียบเท่าสารละลายโซเดียมเมทิลเลทที่ร้อยละ 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก) อัตราการป้อนไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 120 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายที่ 6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิการป้อนเข้าของสารละลายที่ 76 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1.1.3 แสดงผลการทดลองของปริมาณน้ำในสารละลายป้อนเข้า

	3.23%	4.76%	6.25%
Column Pressure (psi)	14.0	14.0	13.8
Vapor Temp IN (°C)	118.2	118.0	117.8
Liquid Temp IN (°C)	77.8	76.1	76.3
Vapor Temp OUT (°C)	84.7	84.7	85.2
Liquid Temp OUT (°C)	83.8	83.6	83.8
Column Temp avg (°C)	84.1	83.8	84.1
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.00	21.12	21.07
Vapor Water IN (%)	0.02	0.03	0.03
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.96	21.03	20.89
Vapor Water OUT (%)	0.89	1.21	1.72
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	5.93	6.08	5.97
Liquid Water IN (%)	3.28	4.94	6.30
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	5.87	6.13	6.00
Liquid Water OUT (%)	0.13	0.14	0.16

*ผลการทดลองที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจากตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก

4.1.2 การทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ

การทดลองทั้งหมดทำในหอสตรีปึงตันแบบ หลังจากเริ่มต้นการทดลองแล้ว จะดำเนินการทดลองจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) โดยมีการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 2 ชั่วโมง จึงทำการปรับเปลี่ยนสภาวะเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นในสภาวะต่าง ๆ โดยมีการกำหนดสภาวะพื้นฐานที่อุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่ 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)_{max}) (อัตราการป้อนไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของสารละลายที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) และปริมาณน้ำในของเหลวที่ป้อนเข้าร้อยละ 6.25 กำหนดอุณหภูมิการป้อนเข้าของสารละลายที่ 76 องศาเซลเซียส เพื่อให้ใกล้เคียงกับจุดเดือดของเมทานอลที่สภาวะ 2 บรรยากาศ

4.1.2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง

ตารางที่ 4.1.2.1 ผลการทดลองของการเปลี่ยนอุณหภูมิไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากสารละลาย โดยทำการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิการป้อนเข้าของสารละลายที่ 76 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1.2.1 ผลการทดลองของการเปลี่ยนอุณหภูมิไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง

	100 (°C)	120 (°C)	140 (°C)
Column Pressure (psi)	13.5	13.3	14.0
Vapor Temp IN (°C)	99.8	120.6	140.8
Liquid Temp IN (°C)	74.4	74.7	75.3
Vapor Temp OUT (°C)	94.3	95.0	95.4
Liquid Temp OUT (°C)	93.9	96.6	98.9
Column Temp avg (°C)	94.9	95.7	96.1
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.96	20.93	20.85
Vapor Water IN (%)	0.02	0.04	0.03
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	19.20	20.03	20.40
Vapor Water OUT (%)	1.95	1.95	1.94
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.95	6.97	7.11
Liquid Water IN (%)	6.16	6.54	6.24
Liquid Methylate IN (%)	18.57	18.49	18.63
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	8.60	7.56	7.20
Liquid Water OUT (%)	0.96	0.97	0.92
Liquid Methylate OUT (%)	15.18	16.89	17.70

*ผลการทดลองที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจากตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง
ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก

4.1.2.2 ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)

ตารางที่ 4.1.2.2 ผลการทดลองของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากสารละลาย โดยทำการศึกษาที่สภาวะอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ที่ 1:1.3 1:1.5 และ 1:2 เท่าของอัตราส่วนของเหลวต่อไอสูงสุด ((L/V)_{max}) อัตราการป้อนไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิการป้อนเข้าของสารละลายที่ 76 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 120 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1.2.2 ผลการทดลองของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)

	1:1.3	1:1.5	1:2
Column Pressure (psi)	13.0	13.3	13.5
Vapor Temp IN (°C)	119.7	120.6	120.0
Liquid Temp IN (°C)	73.9	74.7	72.5
Vapor Temp OUT (°C)	94.5	95.0	94.9
Liquid Temp OUT (°C)	96.0	96.6	96.8
Column Temp avg (°C)	95.3	95.7	95.6
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.72	20.93	20.80
Vapor Water IN (%)	0.02	0.04	0.03
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	19.74	20.03	19.92
Vapor Water OUT (%)	2.10	1.95	1.74
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	8.00	6.97	5.59
Liquid Water IN (%)	6.90	6.54	6.63
Liquid Methylate IN (%)	18.55	18.49	18.47
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	8.92	7.56	6.19
Liquid Water OUT (%)	1.65	0.97	0.54
Liquid Methylate OUT (%)	16.80	16.89	16.90

*ผลการทดลองที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจากตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก

4.1.2.3 ผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า

ตารางที่ 4.1.2.3 ผลการทดลองของปริมาณน้ำในของเหลวป้อนเข้าเพื่อศึกษาผลของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า ที่มีผลต่อความสามารถในการแยกน้ำออกจากสารละลาย โดยทำการศึกษาที่สภาวะปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้าร้อยละ 3.23 4.76 และ 6.25 (เทียบเท่าสารละลายโซเดียมเมทิลเลทที่ร้อยละ 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก) อัตราการป้อนไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 21 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งที่ 120 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายที่ 7 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิการป้อนเข้าของสารละลายที่ 76 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1.2.3 ผลการทดลองของปริมาณน้ำในของเหลวป้อนเข้า

	3.23%	4.76%	6.25%
Column Pressure (psi)	13.0	13.5	13.3
Vapor Temp IN (°C)	119.6	121.7	120.6
Liquid Temp IN (°C)	77.3	75.7	74.7
Vapor Temp OUT (°C)	85.1	91.2	95.0
Liquid Temp OUT (°C)	89.3	92.4	96.6
Column Temp avg (°C)	88.6	91.5	95.7
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.78	20.87	20.93
Vapor Water IN (%)	0.02	0.02	0.04
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.87	20.43	20.03
Vapor Water OUT (%)	1.05	1.55	1.95
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.92	6.96	6.97
Liquid Water IN (%)	3.33	5.00	6.54
Liquid Methylate IN (%)	9.82	14.23	18.49
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	6.82	7.21	7.56
Liquid Water OUT (%)	0.25	0.46	0.97
Liquid Methylate OUT (%)	10.04	13.41	16.89

*ผลการทดลองที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจากตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง ซึ่งรายละเอียดแสดงในภาคผนวก

4.2 ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลสารและการถ่ายเทความร้อน

ผลการทดลอง (ดังแสดงในหัวข้อ 4.1) แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารละลายถูกป้อนเข้าสู่ด้านบนของหอstrippingแล้ว สารละลายจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีอุณหภูมิกึ่งที่ในขณะไหลลงสู่ด้านล่างของหอstripping น้ำที่อยู่ในสารละลายมีปริมาณลดลง บางการทดลองปริมาณเมทานอลในสารละลายจะสูงขึ้น แต่บางการทดลองปริมาณเมทานอลในสารละลายจะลดลง เมื่อพิจารณาส่วนของไอของเมทานอลจะพบว่าไอของเมทานอลมีอุณหภูมิลดลงในทุกการทดลอง และปริมาณน้ำในไอเมทานอลสูงขึ้น ในบางการทดลองพบว่าไอของเมทานอลมีปริมาณลดลง บางการทดลองไอของเมทานอลมีปริมาณสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากไอเมทานอลไปสู่สารละลาย ส่งผลให้ไอเมทานอลบางส่วนเกิดการควบแน่นลงสู่สารละลาย

ตารางที่ 4.2.1 แสดงค่าความดันและอุณหภูมิภายในหอstrippingที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความดันภายในหอstrippingมีค่าใกล้เคียงกันในทุกสภาวะการทดลองที่ประมาณ 13-14 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิภายในหอstrippingที่วัดได้จากอุณหภูมิของสารละลายมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งหอ โดยมีค่าประมาณ 83-85 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2.1 แสดงค่าความดันและอุณหภูมิภายในหอstrippingที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ

	Temperature (°C)			L/V ratio			Concentration (%)		
	100	120	140	1:1.3	1:1.5	1:2	3.23	4.76	6.25
Column Pressure (psig)	13.5	13.8	14.5	13.0	13.8	13.3	14.0	14.0	13.8
Column Temperature (°C)	82.9	84.1	84.8	84.1	84.1	84.2	84.1	83.8	84.1

ตารางที่ 4.2.2 แสดงค่าความดันและอุณหภูมิภายในหอstrippingที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความดันภายในหอstrippingมีค่าใกล้เคียงกันในทุกสภาวะการทดลองที่ประมาณ 13-14 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิภายในหอstrippingที่วัดได้จากอุณหภูมิของสารละลายมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งหอ โดยมีค่าประมาณ 95-96 องศาเซลเซียส ยกเว้นในกรณีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโซเดียมเมทิลเลทที่อุณหภูมิภายในหอstrippingจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของโซเดียมเมทิลเลทในสารละลาย

ตารางที่ 4.2.2 แสดงค่าความดันและอุณหภูมิภายในหอสตริปป์ที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ

	Temperature (°C)			L/V ratio			Concentration (%)		
	100	120	140	1:1.3	1:1.5	1:2	3.23	4.76	6.25
Column Pressure (psig)	13.5	13.3	14.0	13.0	13.3	13.5	13.0	13.5	13.3
Column Temperature (°C)	94.9	95.7	96.1	95.3	95.7	95.6	88.6	91.5	95.7

ตารางที่ 4.2.3 แสดงผลการคำนวณปริมาณน้ำและเมทานอลในสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ โดยทำการคำนวณปริมาณน้ำและเมทานอลในสารละลายขาเข้าและขาออก จากอัตราการไหลของสารละลายและความเข้มข้นของน้ำและเมทานอลที่วิเคราะห์ได้ และคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงร้อยละของสารละลายเปรียบเทียบกับสารละลายขาเข้า โดยค่าบวกจะแสดงว่ามีปริมาณสารเพิ่มขึ้น และค่าลบแสดงว่ามีปริมาณสารลดลง ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าน้ำสามารถถูกแยกออกจากสารละลายได้ด้วยการสตริปป์ในทุกสภาวะการทดลอง โดยความสามารถในการแยกน้ำออกจากสารละลายจะขึ้นกับสภาวะการทดลอง ในขณะที่เมทานอลจากเฟสไอควบแน่นกลายเป็นของเหลวที่บางสภาวะการทดลอง และเมทานอลจากเฟสของเหลวจะระเหยออกไปสู่เฟสไอในบางสภาวะ

ตารางที่ 4.2.4 แสดงผลการคำนวณปริมาณน้ำและเมทานอลในสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ โดยทำการคำนวณปริมาณน้ำ เมทานอลและโซเดียมเมทิลเลทในสารละลายขาเข้าและขาออก จากอัตราการไหลของสารละลายและความเข้มข้นของน้ำ เมทานอลและโซเดียมเมทิลเลทที่วิเคราะห์ได้ และคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงร้อยละของสารละลายเปรียบเทียบกับสารละลายขาเข้า โดยค่าบวกจะแสดงว่ามีปริมาณสารเพิ่มขึ้น และค่าลบแสดงว่ามีปริมาณสารลดลง ผลการทดลองในส่วนนี้ให้ผลเหมือนผลการทดลองของระบบที่เป็นสารละลายเมทานอล-น้ำ ความแตกต่างอยู่ที่ความสามารถในการแยกน้ำออกจากสารละลายจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารละลายมีโซเดียมเมทิลเลทผสมอยู่ด้วย น้ำจะถูกแยกออกจากสารละลายได้ยากขึ้น ในขณะที่ปริมาณโซเดียมเมทิลเลทในสารละลายขาเข้าและขาออกมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าโซเดียมเมทิลเลทไม่มีการระเหยจากเฟสของเหลวไปสู่อไอ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ที่ไม่พบโซเดียมเมทิลเลทในไอเมทานอลขาออก

ตารางที่ 4.2.3 แสดงผลการผลการคำนวณปริมาณน้ำและเมทานอลในสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ

	Temperature (°C)			L/V ratio			Concentration (%)		
	100	120	140	1:1.3	1:1.5	1:2	3.23	4.76	6.25
Vapor Temp IN (°C)	99.8	117.8	139.3	118.8	117.8	120.6	118.2	118.0	117.8
Liquid Temp IN (°C)	76.9	76.3	76.5	79.2	76.3	75.1	77.8	76.1	76.3
Vapor Temp OUT (°C)	83.9	85.2	85.8	85.2	85.2	85.1	84.7	84.7	85.2
Liquid Temp OUT (°C)	82.5	83.8	84.4	83.7	83.8	83.9	83.8	83.6	83.8
Liquid Inlet									
Water (kg/h)	0.368	0.376	0.373	0.471	0.376	0.285	0.194	0.300	0.376
Methanol (kg/h)	5.61	5.59	5.60	6.70	5.59	4.43	5.73	5.78	5.59
Liquid Outlet									
Water (kg/h)	0.012	0.010	0.007	0.016	0.010	0.006	0.007	0.009	0.010
Methanol (kg/h)	7.21	5.99	5.48	7.18	5.99	4.53	5.86	6.12	5.99
Mass Balance (%)									
Water	-96.79	-97.37	-97.99	-96.69	-97.37	-97.93	-96.18	-97.14	-97.37
Methanol	28.50	7.16	-2.11	7.25	7.16	2.24	2.21	5.97	7.16

ตารางที่ 4.2.4 แสดงผลการคำนวณปริมาณน้ำและเมทานอลในสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ

	Temperature (°C)			L/V ratio			Concentration (%)		
	100	120	140	1:1.3	1:1.5	1:2	3.23	4.76	6.25
Vapor Temp IN (°C)	99.8	120.6	140.8	119.7	120.6	120.0	119.6	121.7	120.6
Liquid Temp IN (°C)	74.4	74.7	75.3	73.9	74.7	72.5	77.3	75.7	74.7
Vapor Temp OUT (°C)	94.3	95.0	95.4	94.5	95.0	94.9	85.1	91.2	95.0
Liquid Temp OUT (°C)	93.9	96.6	98.9	96.0	96.6	96.8	89.3	92.4	96.6
Liquid Inlet									
Water (kg/h)	0.428	0.456	0.444	0.552	0.456	0.370	0.230	0.348	0.456
Methanol (kg/h)	5.23	5.23	5.34	5.97	5.23	4.18	6.01	5.62	5.23
Sodium Methylate (kg/h)	1.29	1.29	1.32	1.48	1.29	1.03	0.68	0.99	1.29
Liquid Outlet									
Water (kg/h)	0.082	0.073	0.067	0.148	0.073	0.033	0.017	0.033	0.073
Methanol (kg/h)	7.22	6.21	5.86	7.28	6.21	5.11	6.12	6.21	6.21
Sodium Methylate (kg/h)	1.31	1.28	1.28	1.50	1.28	1.05	0.68	0.97	1.28
Mass Balance (%)									
Water	-80.77	-83.96	-85.01	-73.28	-83.96	-91.03	-92.70	-90.47	-83.96
Methanol	37.99	18.87	9.73	21.96	18.87	22.14	1.80	10.46	18.87

ตารางที่ 4.2.5 แสดงผลการคำนวณสมดุลพลังงานของระบบที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ที่ได้จากโปรแกรมจำลอง (Simulation) พบว่าเอนทัลปี (Enthalpy) ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ระบบและออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในหอสตริปปีง ไม่ได้อาศัยพลังงานภายนอกของระบบ และไม่มีการถ่ายเทความร้อน หรือมีการสูญเสียความร้อน (Heat loss) ออกสู่ระบบภายนอกน้อยมาก

ตารางที่ 4.2.5 แสดงผลการคำนวณสมดุลพลังงานของระบบที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ

	Temperature (°C)			L/V ratio			Concentration (%)		
	100	120	140	1:1.3	1:1.5	1:2	3.23	4.76	6.25
Enthalpy Vapor Inlet (MJ/hr)	27.00	27.27	27.45	27.20	27.27	27.27	27.18	27.34	27.27
Enthalpy Vapor Outlet (MJ/hr)	25.96	27.20	27.78	26.95	27.20	27.40	27.04	27.22	27.20
Enthalpy Liquid Inlet (MJ/hr)	1.26	1.24	1.25	1.56	1.24	0.96	1.24	1.25	1.24
Enthalpy Liquid Outlet (MJ/hr)	1.58	1.31	1.21	1.56	1.31	0.98	1.29	1.34	1.31
Enthalpy Inlet (MJ/hr)	28.26	28.51	28.70	28.70	28.51	28.23	28.42	28.59	28.51
Enthalpy Outlet (MJ/hr)	27.54	28.51	28.99	28.51	28.51	28.38	28.33	28.56	28.51
ΔH (MJ/hr)	-0.72	0.00	0.29	-0.19	0.00	0.15	-0.09	-0.03	0.00

ตารางที่ 4.2.6 แสดงผลการคำนวณสมดุลพลังงานของระบบที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ เมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ที่ได้จากโปรแกรมจำลอง (Simulation) เนื่องจากข้อมูลของสมบัติทางความร้อนของโซเดียมเมทิลเลทมีจำกัดมาก การคำนวณจึงไม่ได้รวมค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ของโซเดียมเมทิลเลทเข้าด้วย โดยจะสมมติให้ค่าเอนทัลปีเข้าและออกของโซเดียมเมทิลเลทมีค่าคงที่ ผลการคำนวณในส่วนนี้ให้ผลเหมือนผลการทดลองของระบบที่เป็นสารละลายเมทานอล-น้ำ แสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในหอสตริปปีง ไม่ได้อาศัยพลังงานภายนอกระบบ และไม่มี การถ่ายเทความร้อน หรือมีการสูญเสียความร้อน (Heat loss) ออกสู่ระบบภายนอกน้อยมาก เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.2.6 แสดงผลการคำนวณสมดุลพลังงานของระบบที่สภาวะต่าง ๆ ของการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ

	Temperature (°C)			L/V ratio			Concentration (%)		
	100	120	140	1:1.3	1:1.5	1:2	3.23	4.76	6.25
Enthalpy Vapor Inlet (MJ/hr)	26.95	27.12	27.14	26.83	27.12	26.94	26.91	27.04	27.12
Enthalpy Vapor Outlet (MJ/hr)	25.15	26.24	26.73	25.90	26.24	26.04	26.98	26.61	26.24
Enthalpy Liquid Inlet (MJ/hr)	1.41	1.42	1.46	1.62	1.42	1.10	1.44	1.43	1.42
Enthalpy Liquid Outlet (MJ/hr)	1.61	1.38	1.31	1.64	1.38	1.13	1.33	1.37	1.38
Enthalpy Inlet (MJ/hr)	28.36	28.54	28.60	28.45	28.54	28.04	28.35	28.47	28.54
Enthalpy Outlet (MJ/hr)	26.76	27.62	28.04	27.54	27.62	27.17	28.31	27.98	27.62
ΔH (MJ/hr)	-1.60	-0.92	-0.56	-0.91	-0.92	-0.87	-0.04	-0.49	-0.92

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองและผลการคำนวณสมดุลมวลกับสมดุลพลังงานแล้ว พบจะสรุปได้ว่าปรากฏการณ์การแยกน้ำออกจากสารละลายโดยวิธีการสไตริปปิงจากการทดลองครั้งนี้ เกิดขึ้นจากการที่น้ำในเฟสของสารละลายมีปริมาณมากกว่าน้ำในเฟสของไอ ความแตกต่างของปริมาณน้ำทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) จากเฟสของสารละลายไปสู่เฟสของไอ แต่การถ่ายโอนจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อน้ำในเฟสของสารละลายระเหยกลายเป็นไวก่อน ถึงจะถ่ายโอนไปอยู่ในเฟสของไอได้ การที่น้ำจะระเหยกลายเป็นไวจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการระเหย ในระหว่างการทดลอง อุณหภูมิของสารละลายในหอสไตริปปิงมีค่าประมาณคงที่ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่วัดได้จากเฟสสารละลาย แสดงว่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากสารละลายไม่ได้มาจากเฟสของสารละลาย และจากสมดุลพลังงานระบบสไตริปปิงที่ใช้ในการทดลองไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกระบบ แสดงว่าความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายและความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำเป็นความร้อนที่มาจากเฟสของไอเท่านั้น โดยความร้อนที่ถ่ายเทมาจากเฟสของไอจะประกอบด้วยความร้อนสัมผัส (sensible heat) ที่ทำให้อุณหภูมิของไอลดลง และความร้อนแฝงของการควบแน่น (latent heat of condensation) ที่ส่งผลให้ไอลส่วนหนึ่งควบแน่นลงมาเป็นของเหลว ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่ปริมาณน้ำในเฟสของสารละลายลดลงในทุกการทดลอง สอดคล้องกับปริมาณการควบแน่นของไอเมทานอล

4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง

กระบวนการสไตรปีปิ้งโดยทั่วไปจะดำเนินการหอสไตรปีปิ้งด้วยสภาวะความดันต่ำและอุณหภูมิสูง ซึ่งค่าอุณหภูมิของหอสไตรปีปิ้งที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าการสไตรปีปิ้ง (stripping factor) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของการแยกสารของการบวนการสไตรปีปิ้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.3.1 แสดงผลการทดลองกรณีผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณของน้ำในสารละลายขาออกในทุกสภาวะมีค่าลดลง ปริมาณของเมทานอลในสารละลายขาออกในบางสภาวะมีค่าลดลง และปริมาณของเมทานอลในสารละลายขาออกในบางสภาวะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่งเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของไอเมทานอลขาออกและอุณหภูมิของสารละลายขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความสามารถในการแยกน้ำของการทดลองที่ไม่มีโซเดียมเมทิลเลทเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ความสามารถในการแยกน้ำของการทดลองที่มีโซเดียมเมทิลเลทก็เพิ่มขึ้นไม่มากนัก และปริมาณของไอเมทานอลควบแน่นลงมาในสารละลายขาออกในทุกสภาวะมีค่าลดลง

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถใช้อธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิของไอเมทานอลป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนจากไอเมทานอลเข้าสู่ของเหลวสามารถเกิดได้ดีขึ้น ทำให้น้ำที่อยู่ในเฟสของของเหลวระเหยออกมาได้มากกว่าเดิม แม้ว่าจะเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม ความร้อนที่ถ่ายเทจากไอเมทานอลสู่ของเหลวในส่วนนี้ส่งผลให้ไอเมทานอลมีอุณหภูมิลดลง และคาดว่าจะมีค่าคงที่ที่ค่าประมาณเท่ากับอุณหภูมิขาออกของไอเมทานอล ความร้อนส่วนนี้คือความร้อนสัมผัส (sensible heat) เมื่ออุณหภูมิของไอเมทานอลที่ป้อนมีค่าสูงขึ้น ค่าความร้อนสัมผัสก็มีค่าสูงขึ้นด้วย ทำให้ความร้อนแฝงของการควบแน่นที่ใช้ในการระเหยน้ำมีค่าลดลง ส่งผลให้ปริมาณเมทานอลที่ควบแน่นลงในเฟสของของเหลวลดลงด้วย

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Li และคณะ [6] ที่ศึกษาเกี่ยวกับพลังงานที่ใช้ในการคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกจากตัวทำละลายที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก (rich solvent) พบว่าเมื่ออุณหภูมิของหม้อต้มซ้ำ (reboiler) เพิ่มขึ้น อัตราการไหลออกของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3.1 ผลการทดลองกรณีผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง

	M/W*			M/W/SM**		
	100 °C	120 °C	140 °C	100 °C	120 °C	140 °C
Vapor Temperature	100 °C	120 °C	140 °C	100 °C	120 °C	140 °C
Column Pressure (psig)	13.5	13.8	14.5	13.5	13.3	14
Column Temperature (°C)	82.9	84.1	84.8	94.9	95.7	96.1
Vapor Temp IN (°C)	99.8	117.8	139.3	99.8	120.6	140.8
Liquid Temp IN (°C)	76.9	76.3	76.5	74.4	74.7	75.3
Vapor Temp OUT (°C)	83.9	85.2	85.8	94.3	95	95.4
Liquid Temp OUT (°C)	82.5	83.8	84.4	93.9	96.6	98.9
Liquid Inlet						
Water (kg/h)	0.368	0.376	0.373	0.428	0.456	0.444
Methanol (kg/h)	5.61	5.59	5.6	5.23	5.23	5.34
Liquid Outlet						
Water (kg/h)	0.012	0.010	0.007	0.082	0.073	0.067
Methanol (kg/h)	7.21	5.99	5.48	7.22	6.21	5.86
Mass Balance (%)						
Water	-96.79	-97.37	-97.99	-80.77	-83.96	-85.01
Methanol	28.5	7.16	-2.11	37.99	18.87	9.73

* M/W : methanol-water

** M/W/SM : methanol-water-sodium methylate

4.4 ผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)

ค่าการstripping (stripping factor) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของการแยกสารของกระบวนการstripping โดยค่าการstrippingแปรผกผันกับอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ลดลง จะทำให้ความสามารถของการแยกสารของกระบวนการstrippingดีขึ้น

ตารางที่ 4.4.1 แสดงผลการทดลองกรณีผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของน้ำในสารละลายขาออกในทุกสภาวะมีค่าลดลง และปริมาณของเมทานอลในสารละลายขาออกในทุกสภาวะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) ลดลง อุณหภูมิของไอเมทานอลขาออกและอุณหภูมิของสารละลายขาออกมีค่าคงที่ ความสามารถในการแยกน้ำของการทดลองที่ไม่มีโซเดียมเมทิลเลทเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ความสามารถในการแยกน้ำของการทดลองที่มีโซเดียมเมทิลเลทเพิ่มขึ้นมาก และปริมาณของไอเมทานอลที่ควบแน่นลงมาในสารละลายขาออกมีค่าลดลง

ผลการทดลองที่ปรากฏสามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออัตราส่วนของของเหลวต่อไอ (L/V ratio) มีค่าลดลง (อัตราการป้อนปริมาณไอสูงขึ้น) น้ำที่ระเหยเข้าสู่ไอจะไม่ทำให้ความเข้มข้นของน้ำในไอสูงขึ้นมาก ทำให้ผลต่างของความเข้มข้นของน้ำในเฟสของของเหลวและเฟสของไอยังคงสูงอยู่ ส่งผลให้การถ่ายเทมวลของน้ำระหว่างทั้งสองเฟสเกิดได้ดีขึ้นกว่ากรณีที่อัตราส่วนของของเหลวต่อไอที่มีค่าสูง ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Melgaco และคณะ [7] ศึกษาเกี่ยวกับการเก็บแอมโมเนียจากการย่อยสลายของขยะอาหารโดยใช้การstrippingและการดูดซึมด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์ พบว่าอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียออกจากของเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4.1 ผลการทดลองกรณีผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)

	M/W*			M/W/SM**		
	1:1.3	1:1.5	1:2	1:1.3	1:1.5	1:2
L/V ratio	1:1.3	1:1.5	1:2	1:1.3	1:1.5	1:2
Column Pressure (psig)	13	13.8	13.3	13	13.3	13.5
Column Temperature (°C)	84.1	84.1	84.2	95.3	95.7	95.6
Vapor Temp IN (°C)	118.8	117.8	120.6	119.7	120.6	120
Liquid Temp IN (°C)	79.2	76.3	75.1	73.9	74.7	72.5
Vapor Temp OUT (°C)	85.2	85.2	85.1	94.5	95	94.9
Liquid Temp OUT (°C)	83.7	83.8	83.9	96	96.6	96.8
Liquid Inlet						
Water (kg/h)	0.471	0.376	0.285	0.552	0.456	0.37
Methanol (kg/h)	6.7	5.59	4.43	5.97	5.23	4.18
Liquid Outlet						
Water (kg/h)	0.016	0.010	0.006	0.148	0.073	0.033
Methanol (kg/h)	7.18	5.99	4.53	7.28	6.21	5.11
Mass Balance (%)						
Water	-96.69	-97.37	-97.93	-73.28	-83.96	-91.03
Methanol	7.25	7.16	2.24	21.96	18.87	22.14

* M/W : methanol-water

** M/W/SM : methanol-water-sodium methylate

4.5 ผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า

การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer) จากเฟสของสารละลายไปสู่เฟสของไอจะเกิดขึ้นได้ จำเป็นต้องความแตกต่างของสารในเฟสของสารละลายและเฟสของไอ เมื่อความแตกต่างของสารเพิ่มขึ้น ความสามารถในการถ่ายเทมวลสารระหว่าง 2 เฟสจะเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.5.1 แสดงผลการทดลองผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิภายในหอสตริปปีงของการทดลองที่มีโซเดียมเมทิลเลทจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของโซเดียมเมทิลเลทในสารละลาย ปริมาณของน้ำในสารละลายขาออกในทุกสภาวะมีค่าลดลง และปริมาณของเมทานอลในสารละลายขาออกในทุกสภาวะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของไอเมทานอลขาออกและอุณหภูมิของสารละลายขาออกของการทดลองที่ไม่มีโซเดียมเมทิลเลทในทุกสภาวะมีค่าคงที่ ขณะที่อุณหภูมิของไอเมทานอลขาออกและอุณหภูมิของสารละลายขาออกของการทดลองที่มีโซเดียมเมทิลเลทในทุกสภาวะมีค่าเพิ่มขึ้น ความสามารถในการแยกน้ำของการทดลองที่ไม่มีโซเดียมเมทิลเลทเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ความสามารถในการแยกน้ำของการทดลองที่มีโซเดียมเมทิลเลทลดลง และปริมาณของไอเมทานอลควบแน่นลงมาในสารละลายขาออกในทุกสภาวะมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อสภาวะอื่นๆ มีค่าเท่ากัน ในระบบของน้ำ-เมทานอล ปริมาณน้ำในสารละลายยังสามารถถูกแยกออกได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ว่าจะมีน้ำในสารละลายมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าไอของเมทานอลยังสามารถรับไอน้ำเข้าไปผสมอยู่ได้อีก ปริมาณเมทานอลที่ควบแน่นเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า เมื่อน้ำมีการระเหยออกจากสารละลายเพิ่มขึ้น จะมีการใช้ความร้อนในการระเหยมากขึ้น ส่งผลให้ไอเมทานอลควบแน่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย กรณีของระบบที่มีน้ำ-เมทานอล-โซเดียมเมทิลเลทจะแตกต่างจากกรณีของระบบที่มีน้ำ-เมทานอล โซเดียมเมทิลเลทจะขัดขวางการถ่ายเทมวลของน้ำ ทำให้น้ำถ่ายเทออกจากเฟสของของเหลวไปสู่เฟสของไอได้ยากขึ้น โดยทั่วไปแล้วโซเดียมเมทิลเลทเป็นสารที่ละลายในน้ำได้ดีมาก ในขณะที่การละลายในเมทานอลเกิดขึ้นได้ยากกว่า และมีค่าการละลายได้สูงสุดที่ค่าหนึ่งเท่านั้น เมื่อโซเดียมเมทิลเลทละลายปนอยู่ด้วยกันพร้อมทั้งน้ำและเมทานอล โซเดียมเมทิลเลทซึ่งชอบละลายน้ำจะขัดขวางการถ่ายเทมวลของน้ำออกจากสารละลาย ดังจะเห็นได้จากปริมาณโซเดียมเมทิลเลทที่เพิ่มขึ้น (ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น) ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทมวลลดลง ถึงแม้ว่าผลการทดลองจะแสดงว่าความสามารถในการถ่ายเทมวลของน้ำออกจากสารละลายจะลดลง เมื่อมีน้ำในสารละลายมากขึ้น แต่ในความเป็นจริงแล้ว

ปริมาณน้ำที่ถ่ายเทก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสารละลาย เมื่อน้ำที่เกิดการถ่ายเทมีปริมาณสูงขึ้น ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำก็เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการควบแน่นของเมทานอลในเฟสของไอเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Xiong และคณะ [8] ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมโซเดียมเมทิลเลทจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยการทำปฏิกิริยาควบคู่กับกระบวนการแยกสาร พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของน้ำจะเพิ่มขึ้น และต้องใช้ความร้อนในการระเหยน้ำออกมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.5.1 ผลการทดลองกรณีผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า

	M/W*			M/W/SM**		
ปริมาณน้ำในสารละลาย	3.23%	4.76%	6.25%	3.23%	4.76%	6.25%
Column Pressure (psig)	14	14	13.8	13	13.5	13.3
Column Temperature (°C)	84.1	83.8	84.1	88.6	91.5	95.7
Vapor Temp IN (°C)	118.2	118	117.8	119.6	121.7	120.6
Liquid Temp IN (°C)	77.8	76.1	76.3	77.3	75.7	74.7
Vapor Temp OUT (°C)	84.7	84.7	85.2	85.1	91.2	95
Liquid Temp OUT (°C)	83.8	83.6	83.8	89.3	92.4	96.6
Liquid Inlet						
Water (kg/h)	0.194	0.300	0.376	0.230	0.348	0.456
Methanol (kg/h)	5.73	5.78	5.59	6.01	5.62	5.23
Liquid Outlet						
Water (kg/h)	0.007	0.009	0.010	0.017	0.033	0.073
Methanol (kg/h)	5.86	6.12	5.99	6.12	6.21	6.21
Mass Balance (%)						
Water	-96.18	-97.14	-97.37	-92.7	-90.47	-83.96
Methanol	2.21	5.97	7.16	1.8	10.46	18.87

* M/W : methanol-water

** M/W/SM : methanol-water-sodium methylate

4.6 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม (Overall mass transfer coefficient ($K_L a$))

ตารางที่ 4.6.1 4.6.2 และ 4.6.3 แสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกรณีผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร่อนยวดยิ่ง กรณีผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) และกรณีผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ในกรณีการทดลองที่ไม่มีโซเดียมเมทิลเลทในทุกการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าประมาณ $1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ การทดลองที่มีโซเดียมเมทิลเลทในทุกการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าประมาณ $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ยกเว้นกรณีเปลี่ยนปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า ซึ่งความเข้มข้นของโซเดียม เมทิลเลทที่เพิ่มด้วยนั้น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบทั้งสองระบบ พบว่าโซเดียมเมทิลเลททำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เพราะโซเดียมเมทิลเลทจะขัดขวางการถ่ายเทมวลของน้ำ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมลดลง หรือความสามารถในการถ่ายเทมวลของน้ำลดลง

ตารางที่ 4.6.1 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกรณีผลกระทบของอุณหภูมิการป้อนเข้าของไอเมทานอลร่อนยวดยิ่ง

Vapor Temperature	M/W*			M/W/SM**		
	100 °C	120 °C	140 °C	100 °C	120 °C	140 °C
$K_L a \text{ (s}^{-1}\text{)}$	1.49E-04	1.49E-04	1.54E-04	7.80E-05	8.02E-05	8.20E-05

* M/W : methanol-water

** M/W/SM : methanol-water-sodium methylete

ตารางที่ 4.6.2 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกรณีผลกระทบของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)

L/V ratio	M/W*			M/W/SM**		
	1:1.3	1:1.5	1:2	1:1.3	1:1.5	1:2
$K_L a \text{ (s}^{-1}\text{)}$	1.66E-04	1.49E-04	1.23E-04	6.90E-05	8.02E-05	8.40E-05

* M/W : methanol-water

** M/W/SM : methanol-water-sodium methylete

ตารางที่ 4.6.3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมกรณีผลกระทบของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า

ปริมาณน้ำในสารละลาย	M/W*			M/W/SM**		
	3.23%	4.76%	6.25%	3.23%	4.76%	6.25%
$K_{La} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	1.30E-04	1.47E-04	1.49E-04	1.08E-04	1.00E-04	8.02E-05

* M/W : methanol-water

** M/W/SM : methanol-water-sodium methyrate



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอลด้วยวิธีการสตริปปีงสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. วิธีการสตริปปีงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำออกจากสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอลได้
2. ปรากฏการณ์การแยกน้ำออกจากสารละลายโดยวิธีการสตริปปีง เกิดขึ้นจากการที่น้ำในเฟสของสารละลายมีปริมาณมากกว่าน้ำในเฟสของไอ ความแตกต่างของปริมาณน้ำทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer) จากเฟสของสารละลายไปสู่เฟสของไอ โดยน้ำจะระเหยกลายเป็นไวก่อนการถ่ายโอน การที่น้ำจะระเหยกลายเป็นไวจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการระเหย โดยความร้อนที่ใช้มาจากเฟสของไอประกอบด้วยความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ที่ทำให้อุณหภูมิของไอลดลง และความร้อนแฝงของการควบแน่น (Latent heat of condensation) ที่ส่งผลให้ไอลส่วนหนึ่งควบแน่นลงมาเป็นของเหลว
3. เมื่ออุณหภูมิของไอเมทานอลป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าสูงขึ้น ทำให้น้ำที่อยู่ในเฟสของของเหลวระเหยออกมาได้มากขึ้น และมีการใช้ความร้อนแฝงของการควบแน่นในการระเหยน้ำลดลง ส่งผลให้ปริมาณเมทานอลที่ควบแน่นลงในเฟสของของเหลวมีค่าลดลง
4. เมื่ออัตราส่วนของของเหลวต่อไอ (L/V ratio) มีค่าลดลง ทำให้ผลต่างของความเข้มข้นของน้ำในเฟสของของเหลวและเฟสของไอยังคงสูงอยู่ ส่งผลให้การถ่ายเทมวลของน้ำระหว่างทั้งสองเฟสเกิดได้ดีขึ้นกว่ากรณีที่อัตราส่วนของของเหลวต่อไอที่มีค่าสูง
5. เมื่อปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้าเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องใช้ความร้อนในการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น และมีการใช้ความร้อนแฝงของการควบแน่นในการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไอเมทานอลควบแน่นเพิ่มขึ้น
6. โซเดียมเมทิลเลทจะขัดขวางการถ่ายเทมวลของน้ำ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวมลดลง หรือความสามารถในการถ่ายเทมวลของน้ำลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรจะต้องมีการทำการทดลองศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนชนิดของแพ็คเกจ (Packing) และการหาอุณหภูมิของสายป้อนเข้าที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากสารละลาย ก่อนจะนำไปใช้ออกแบบระบบต่อไป



บรรณานุกรม

1. Shi, W., et al., *Biodiesel production from waste chicken fat with low free fatty acids by an integrated catalytic process of composite membrane and sodium methoxide*. *Bioresource technology*, 2013. **139**: p. 316-322.
2. Namwong, S. and V. Punsuvon. *Biodiesel production from used vegetable oil using ethanol and sodium methoxide catalyst*. in *Key Engineering Materials*. 2017. Trans Tech Publ.
3. Sun, X., X. Sun, and H. Zhang, *Process for preparing sodium methoxide from sodium metal [J]*. *Journal of Chemical Production and Technology*, 2003. **10**(5): p. 35-37.
4. Tse, S.W., *Continuous process for sodium methylate*. 1997, Google Patents.
5. Seader, J.D., E.J. Henley, and D.K. Roper, *Separation process principles*. Vol. 25. 1998: Wiley New York.
6. Li, X., S. Wang, and C. Chen, *Experimental study of energy requirement of CO₂ desorption from rich solvent*. *Energy Procedia*, 2013. **37**: p. 1836-1843.
7. Melgaço, L.A., E. Meers, and C.R. Mota, *Ammonia recovery from food waste digestate using solar heat-assisted stripping-absorption*. *Waste Management*, 2020. **113**: p. 244-250.
8. Xiong, M., C.X. Wang, and D.D. Shao. *Preparing Sodium Methoxide from Sodium Hydroxide by Reaction Coupling with Separation Processes*. in *Advanced Materials Research*. 2014. Trans Tech Publ.
9. Bastos, F.A., et al., *Thermometric quantitative selective analysis of sodium methoxide in methanol industrial solutions*. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2013. **24**(8): p. 1380-1384.

ภาคผนวก ก

ผลของอุณหภูมิต่อการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง
กรณีการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ

ตารางที่ ก-1 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max)

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.5	13.5	13.5	13.5	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	99.4	100	100.1	99.8	0.27	-0.43	0.43
Liquid Temp IN (°C)	76.9	76.8	77.1	76.9	0.17	-0.13	0.22
Vapor Temp OUT (°C)	83.9	83.8	83.9	83.9	0.03	-0.07	0.08
Liquid Temp OUT (°C)	82.6	82.5	82.5	82.5	0.07	-0.03	0.08
Column Temp avg (°C)	83.0	82.9	82.9	82.9	0.07	-0.03	0.08
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.00	21.00	21.00	21.00	0.00	0.00	0.00
Vapor Water IN (%)	0.03	0.04	0.04	0.04	0.00	-0.01	18.18
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	19.95	19.97	19.88	19.93	0.04	-0.05	0.27
Vapor Water OUT (%)	1.77	1.75	1.89	1.80	0.09	-0.05	4.81
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	5.92	6.04	5.98	5.98	0.06	-0.06	1.00
Liquid Water IN (%)	6.15	6.15	6.15	6.15	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.20	7.25	7.22	7.22	0.03	-0.02	0.37
Liquid Water OUT (%)	0.17	0.16	0.16	0.16	0.01	0.00	4.08
Column Temp 1 C	83.9	83.8	83.8	83.8	0.07	-0.03	0.08
Column Temp 2 C	82.5	82.4	82.4	82.4	0.07	-0.03	0.08
Column Temp 3 C	82.8	82.7	82.7	82.7	0.07	-0.03	0.08
Column Temp 4 C	82.8	82.7	82.7	82.7	0.07	-0.03	0.08
Column Temp Avg C	83.00	82.90	82.90	82.9	0.07	-0.03	0.08

ตารางที่ ก-2 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max)

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	14.0	14.0	14.0	14.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	121.3	119.0	120.2	120.2	1.13	-1.17	0.97
Liquid Temp IN (°C)	75.7	75.6	75.4	75.6	0.13	-0.17	0.22
Vapor Temp OUT (°C)	85.4	85.3	85.2	85.3	0.10	-0.10	0.12
Liquid Temp OUT (°C)	83.9	83.8	83.8	83.8	0.07	-0.03	0.08
Column Temp avg (°C)	84.3	84.2	84.2	84.2	0.07	-0.05	0.09
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.00	21.07	21.07	21.05	0.02	-0.05	0.22
Vapor Water IN (%)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.95	20.82	20.79	20.85	0.10	-0.06	0.46
Vapor Water OUT (%)	1.80	1.84	1.81	1.82	0.02	-0.02	1.28
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.06	6.16	5.94	6.05	0.11	-0.11	1.87
Liquid Water IN (%)	6.26	6.26	6.26	6.26	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	5.83	6.04	6.14	6.00	0.14	-0.17	2.89
Liquid Water OUT (%)	0.14	0.14	0.15	0.14	0.01	0.00	4.65
Column Temp 1 C	85.2	85.1	85.1	85.1	0.07	-0.03	0.08
Column Temp 2 C	83.8	83.7	83.7	83.7	0.07	-0.03	0.08
Column Temp 3 C	84.1	84.0	83.9	84.0	0.10	-0.10	0.12
Column Temp 4 C	84.1	84.0	84.0	84.0	0.07	-0.03	0.08
Column Temp Avg C	84.3	84.2	84.2	84.2	0.07	-0.05	0.09

ตารางที่ ก-3 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 140 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max)

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	14.5	14.5	14.5	14.5	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	139.8	139.4	138.8	139.3	0.47	-0.53	0.38
Liquid Temp IN (°C)	76.6	76.5	76.4	76.5	0.10	-0.10	0.13
Vapor Temp OUT (°C)	85.8	85.8	85.7	85.8	0.03	-0.07	0.08
Liquid Temp OUT (°C)	84.5	84.4	84.4	84.4	0.07	-0.03	0.08
Column Temp avg (°C)	84.8	84.8	84.7	84.8	0.05	-0.08	0.09
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.24	21.10	20.93	21.09	0.15	-0.16	0.76
Vapor Water IN (%)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	21.40	21.28	21.36	21.35	0.05	-0.07	0.31
Vapor Water OUT (%)	1.64	1.67	1.66	1.66	0.01	-0.02	1.01
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	5.84	6.03	6.04	5.97	0.07	-0.13	2.18
Liquid Water IN (%)	6.24	6.24	6.24	6.24	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	5.53	5.40	5.53	5.49	0.04	-0.09	1.58
Liquid Water OUT (%)	0.13	0.14	0.14	0.14	0.00	-0.01	4.88
Column Temp 1 C	85.7	85.7	85.5	85.6	0.07	-0.13	0.16
Column Temp 2 C	84.3	84.3	84.2	84.3	0.03	-0.07	0.08
Column Temp 3 C	84.6	84.5	84.5	84.5	0.07	-0.03	0.08
Column Temp 4 C	84.6	84.6	84.5	84.6	0.03	-0.07	0.08
Column Temp Avg C	84.8	84.8	84.7	84.8	0.05	-0.08	0.09

ภาคผนวก ข

ผลของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio) กรณีการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ

ตารางที่ ข-1 ตารางแสดงผลของอัตราส่วน 1:1.3 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)_{max}) โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.0	13.0	13.0	13.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	118.7	118.7	119.0	118.8	0.20	-0.10	0.17
Liquid Temp IN (°C)	79.2	79.2	79.1	79.2	0.03	-0.07	0.08
Vapor Temp OUT (°C)	85.3	85.3	85.1	85.2	0.07	-0.13	0.16
Liquid Temp OUT (°C)	83.7	83.7	83.6	83.7	0.03	-0.07	0.08
Column Temp avg (°C)	84.2	84.2	84.1	84.1	0.03	-0.07	0.08
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.03	21.03	20.97	21.01	0.02	-0.04	0.19
Vapor Water IN (%)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.71	20.58	20.53	20.61	0.10	-0.08	0.50
Vapor Water OUT (%)	2.17	2.13	2.14	2.15	0.02	-0.02	1.09
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	7.16	7.17	7.18	7.17	0.01	-0.01	0.14
Liquid Water IN (%)	6.57	6.57	6.57	6.57	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.20	7.20	7.20	7.20	0.00	0.00	0.00
Liquid Water OUT (%)	0.19	0.20	0.26	0.22	0.04	-0.03	20.00
Column Temp 1 C	85.1	85.1	85.1	85.1	0.00	0.00	0.00
Column Temp 2 C	83.7	83.7	83.6	83.7	0.03	-0.07	0.08
Column Temp 3 C	83.9	83.9	83.8	83.9	0.03	-0.07	0.08
Column Temp 4 C	83.9	83.9	83.7	83.8	0.07	-0.13	0.16
Column Temp Avg C	84.2	84.2	84.1	84.1	0.03	-0.07	0.08

ตารางที่ ข-2 ตารางแสดงผลของอัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.5	13.0	14.0	13.5	0.50	-0.50	3.70
Vapor Temp IN (°C)	116.8	115.8	115.1	115.9	0.90	-0.80	0.78
Liquid Temp IN (°C)	76.0	76.5	76.7	76.4	0.30	-0.40	0.52
Vapor Temp OUT (°C)	85.2	85.1	85.2	85.2	0.03	-0.07	0.08
Liquid Temp OUT (°C)	83.9	83.7	83.8	83.8	0.10	-0.10	0.12
Column Temp avg (°C)	84.2	84.1	84.1	84.1	0.06	-0.04	0.07
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.10	21.11	21.12	21.11	0.01	-0.01	0.05
Vapor Water IN (%)	0.04	0.04	0.03	0.04	0.00	-0.01	18.18
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.98	20.83	20.74	20.85	0.13	-0.11	0.62
Vapor Water OUT (%)	1.63	1.77	1.82	1.74	0.08	-0.11	6.32
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	5.82	6.09	5.97	5.96	0.13	-0.14	2.35
Liquid Water IN (%)	6.43	6.43	6.43	6.43	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	5.80	6.20	6.20	6.07	0.13	-0.27	4.40
Liquid Water OUT (%)	0.15	0.19	0.16	0.17	0.02	-0.02	14.00
Column Temp 1 C	85.1	85.0	85.1	85.1	0.03	-0.07	0.08
Column Temp 2 C	83.7	83.6	83.6	83.6	0.07	-0.03	0.08
Column Temp 3 C	84.0	83.9	83.9	83.9	0.07	-0.03	0.08
Column Temp 4 C	84.0	83.9	83.9	83.9	0.07	-0.03	0.08
Column Temp Avg C	84.2	84.1	84.1	84.1	0.06	-0.04	0.07

ตารางที่ ข-3 ตารางแสดงผลของอัตราส่วน 1:2 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.0	13.0	14.0	13.3	0.67	-0.33	5.00
Vapor Temp IN (°C)	120.9	121.0	119.9	120.6	0.40	-0.70	0.58
Liquid Temp IN (°C)	75.2	75.3	74.7	75.1	0.23	-0.37	0.49
Vapor Temp OUT (°C)	85.2	85.1	85.0	85.1	0.10	-0.10	0.12
Liquid Temp OUT (°C)	84.1	83.9	83.8	83.9	0.17	-0.13	0.20
Column Temp avg (°C)	84.3	84.2	84.1	84.2	0.13	-0.12	0.15
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.10	21.10	20.94	21.05	0.05	-0.11	0.51
Vapor Water IN (%)	0.02	0.04	0.02	0.03	0.01	-0.01	50.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	21.53	21.01	20.92	21.15	0.38	-0.23	1.78
Vapor Water OUT (%)	1.26	1.21	1.30	1.26	0.04	-0.05	3.71
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	4.78	4.92	4.44	4.71	0.21	-0.27	5.80
Liquid Water IN (%)	6.05	6.05	6.05	6.05	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	4.40	4.80	4.40	4.53	0.27	-0.13	5.88
Liquid Water OUT (%)	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00
Column Temp 1 C	85.2	85.0	84.9	85.0	0.17	-0.13	0.20
Column Temp 2 C	83.8	83.7	83.6	83.7	0.10	-0.10	0.12
Column Temp 3 C	84.1	84.0	83.9	84.0	0.10	-0.10	0.12
Column Temp 4 C	84.2	84.1	83.9	84.1	0.13	-0.17	0.20
Column Temp Avg C	84.3	84.2	84.1	84.2	0.13	-0.12	0.15

ภาคผนวก ค

ผลของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า กรณีการทดลองด้วยสารละลายเมทานอล-น้ำ

ตารางที่ ค-1 ตารางแสดงผลของปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 3.23 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	14.0	14.0	14.0	14.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	116.5	118.9	119.1	118.2	0.93	-1.67	1.41
Liquid Temp IN (°C)	77.5	77.9	78.0	77.8	0.20	-0.30	0.39
Vapor Temp OUT (°C)	84.7	84.7	84.7	84.7	0.00	0.00	0.00
Liquid Temp OUT (°C)	83.8	83.8	83.7	83.8	0.03	-0.07	0.08
Column Temp avg (°C)	84.1	84.1	84.0	84.1	0.05	-0.08	0.09
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.10	21.00	20.89	21.00	0.10	-0.11	0.51
Vapor Water IN (%)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	21.03	20.98	20.86	20.96	0.07	-0.10	0.46
Vapor Water OUT (%)	0.87	0.90	0.91	0.89	0.02	-0.02	2.61
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	5.97	5.89	5.92	5.93	0.04	-0.04	0.73
Liquid Water IN (%)	3.28	3.28	3.28	3.28	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	6.00	5.80	5.80	5.87	0.13	-0.07	2.27
Liquid Water OUT (%)	0.11	0.12	0.15	0.13	0.02	-0.02	18.42
Column Temp 1 C	84.8	84.8	84.7	84.8	0.03	-0.07	0.08
Column Temp 2 C	83.6	83.6	83.5	83.6	0.03	-0.07	0.08
Column Temp 3 C	83.9	84.0	83.8	83.9	0.10	-0.10	0.12
Column Temp 4 C	84.0	84.0	83.9	84.0	0.03	-0.07	0.08
Column Temp Avg C	84.1	84.1	84.0	84.1	0.05	-0.08	0.09

ตารางที่ ค-2 ตารางแสดงผลของปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 4.76 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	14.0	14.0	14.0	14.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	118.2	118.0	117.7	118.0	0.23	-0.27	0.23
Liquid Temp IN (°C)	76.1	76.2	76.1	76.1	0.07	-0.03	0.09
Vapor Temp OUT (°C)	84.7	84.7	84.8	84.7	0.07	-0.03	0.08
Liquid Temp OUT (°C)	83.6	83.5	83.6	83.6	0.03	-0.07	0.08
Column Temp avg (°C)	83.9	83.7	83.9	83.8	0.08	-0.12	0.14
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.13	21.10	21.14	21.12	0.02	-0.02	0.11
Vapor Water IN (%)	0.03	0.03	0.02	0.03	0.00	-0.01	25.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	21.70	20.70	20.69	21.03	0.67	-0.34	3.19
Vapor Water OUT (%)	1.20	1.20	1.24	1.21	0.03	-0.01	2.20
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.04	6.12	6.08	6.08	0.04	-0.04	0.66
Liquid Water IN (%)	4.94	4.94	4.94	4.94	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	6.00	6.20	6.20	6.13	0.07	-0.13	2.17
Liquid Water OUT (%)	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00
Column Temp 1 C	84.7	84.6	84.7	84.7	0.03	-0.07	0.08
Column Temp 2 C	83.4	83.3	83.5	83.4	0.10	-0.10	0.12
Column Temp 3 C	83.7	83.3	83.8	83.6	0.20	-0.30	0.36
Column Temp 4 C	83.7	83.7	83.7	83.7	0.00	0.00	0.00
Column Temp Avg C	83.9	83.7	83.9	83.8	0.08	-0.12	0.14

ตารางที่ ค-3 ตารางแสดงผลของปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	14.0	14.0	14.0	14.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	117.4	116.2	118.0	117.2	0.80	-1.00	0.85
Liquid Temp IN (°C)	76.2	77.0	77.3	76.8	0.47	-0.63	0.82
Vapor Temp OUT (°C)	85.1	85.0	85.1	85.1	0.03	-0.07	0.08
Liquid Temp OUT (°C)	83.7	83.7	83.8	83.7	0.07	-0.03	0.08
Column Temp avg (°C)	84.1	84.1	84.1	84.1	0.03	-0.02	0.03
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.11	21.01	21.00	21.04	0.07	-0.04	0.33
Vapor Water IN (%)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	21.09	20.89	20.96	20.98	0.11	-0.09	0.52
Vapor Water OUT (%)	1.61	1.61	1.60	1.61	0.00	-0.01	0.41
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	5.92	5.80	5.94	5.89	0.05	-0.09	1.47
Liquid Water IN (%)	6.20	6.20	6.20	6.20	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	6.00	6.00	5.80	5.93	0.07	-0.13	2.25
Liquid Water OUT (%)	0.19	0.18	0.18	0.18	0.01	0.00	3.64
Column Temp 1 C	85.0	85.0	85.0	85.0	0.00	0.00	0.00
Column Temp 2 C	83.6	83.6	83.6	83.6	0.00	0.00	0.00
Column Temp 3 C	83.9	83.8	83.9	83.9	0.03	-0.07	0.08
Column Temp 4 C	83.9	83.8	83.8	83.8	0.07	-0.03	0.08
Column Temp Avg C	84.1	84.1	84.1	84.1	0.03	-0.02	0.03

ภาคผนวก ง

ผลของอุณหภูมิต่อการป้อนเข้าของไอเมทานอลร้อนยวดยิ่ง
กรณีการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ

ตารางที่ ง-1 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max)

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.5	13.5	13.5	13.5	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	98.2	101.5	99.8	99.8	1.67	-1.63	1.67
Liquid Temp IN (°C)	74.4	74.4	74.5	74.4	0.07	-0.03	0.09
Vapor Temp OUT (°C)	94.4	94.2	94.4	94.3	0.08	-0.12	0.13
Liquid Temp OUT (°C)	93.9	93.9	93.9	93.9	0.00	0.00	0.00
Column Temp avg (°C)	95.0	94.8	94.9	94.9	0.05	-0.07	0.08
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.01	20.93	20.93	20.96	0.05	-0.03	0.25
Vapor Water IN (%)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	19.19	19.23	19.18	19.20	0.03	-0.02	0.16
Vapor Water OUT (%)	1.94	1.95	1.95	1.95	0.00	-0.01	0.34
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.89	6.93	7.02	6.95	0.07	-0.06	1.06
Liquid Water IN (%)	6.16	6.16	6.16	6.16	0.00	0.00	0.00
Liquid Methylate IN (%)	18.57	18.57	18.57	18.57	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	8.57	8.50	8.74	8.60	0.14	-0.10	1.59
Liquid Water OUT (%)	0.94	0.92	1.01	0.96	0.05	-0.04	5.57
Liquid Methylate OUT (%)	15.35	15.02	15.16	15.18	0.17	-0.16	1.14
Column Temp 1 C	96.1	95.8	96.1	96.0	0.10	-0.20	0.21
Column Temp 2 C	94.6	94.5	94.6	94.6	0.03	-0.07	0.07
Column Temp 3 C	94.7	94.5	94.5	94.6	0.13	-0.07	0.14
Column Temp 4 C	94.4	94.5	94.5	94.5	0.03	-0.07	0.07
Column Temp avg (°C)	95.0	94.8	94.9	94.9	0.05	-0.07	0.08

ตารางที่ ง-2 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max)

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.0	13.0	13.0	13.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	121.4	119.9	119.9	120.4	1.00	-0.50	0.83
Liquid Temp IN (°C)	73.5	74.2	74.2	74.0	0.23	-0.47	0.63
Vapor Temp OUT (°C)	94.6	94.7	94.6	94.6	0.07	-0.03	0.07
Liquid Temp OUT (°C)	96.3	96.2	96.2	96.2	0.07	-0.03	0.07
Column Temp avg (°C)	95.3	95.4	95.4	95.4	0.04	-0.06	0.06
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.80	20.80	20.80	20.80	0.00	0.00	0.00
Vapor Water IN (%)	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	28.57
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	19.78	19.76	19.82	19.79	0.03	-0.03	0.17
Vapor Water OUT (%)	1.81	1.99	1.87	1.89	0.10	-0.08	5.29
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.75	7.05	7.14	6.98	0.16	-0.23	3.30
Liquid Water IN (%)	6.28	6.28	6.28	6.28	0.00	0.00	0.00
Liquid Methylate IN (%)	18.66	18.66	18.66	18.66	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.86	7.88	8.10	7.95	0.15	-0.09	1.93
Liquid Water OUT (%)	0.90	1.00	1.02	0.97	0.05	-0.07	7.53
Liquid Methylate OUT (%)	16.49	16.70	16.50	16.56	0.14	-0.07	0.83
Column Temp 1 C	96.2	96.3	96.3	96.3	0.03	-0.07	0.07
Column Temp 2 C	94.8	95.0	94.9	94.9	0.10	-0.10	0.11
Column Temp 3 C	94.9	95.0	95.0	95.0	0.03	-0.07	0.07
Column Temp 4 C	95.3	95.3	95.3	95.3	0.00	0.00	0.00
Column Temp avg (°C)	95.3	95.4	95.4	95.4	0.04	-0.06	0.06

ตารางที่ ง-3 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 140 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max)

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	14.0	14.0	14.0	14.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	138.6	141.8	141.9	140.8	1.13	-2.17	1.54
Liquid Temp IN (°C)	74.5	75.1	76.2	75.3	0.93	-0.77	1.24
Vapor Temp OUT (°C)	95.5	95.0	95.6	95.4	0.23	-0.37	0.38
Liquid Temp OUT (°C)	99.0	98.8	98.8	98.9	0.13	-0.07	0.13
Column Temp avg (°C)	96.3	95.7	96.3	96.1	0.22	-0.41	0.42
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.77	20.90	20.87	20.85	0.05	-0.08	0.37
Vapor Water IN (%)	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	0.00	20.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.39	20.39	20.41	20.40	0.01	-0.01	0.07
Vapor Water OUT (%)	1.99	1.94	1.90	1.94	0.05	-0.04	2.40
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	7.06	7.22	7.05	7.11	0.11	-0.06	1.55
Liquid Water IN (%)	6.28	6.28	6.16	6.24	0.04	-0.08	1.28
Liquid Methylate IN (%)	18.66	18.66	18.57	18.63	0.03	-0.06	0.32
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.42	7.32	6.87	7.20	0.22	-0.33	4.63
Liquid Water OUT (%)	1.00	0.97	0.80	0.92	0.08	-0.12	13.36
Liquid Methylate OUT (%)	17.77	17.58	17.76	17.70	0.07	-0.12	0.70
Column Temp 1 C	97.2	96.3	97.1	96.9	0.33	-0.57	0.58
Column Temp 2 C	95.7	95.0	95.7	95.5	0.23	-0.47	0.49
Column Temp 3 C	95.7	95.3	95.7	95.6	0.13	-0.27	0.28
Column Temp 4 C	96.5	96.1	96.7	96.4	0.27	-0.33	0.35
Column Temp avg (°C)	96.3	95.7	96.3	96.1	0.22	-0.41	0.42

ภาคผนวก จ

ผลของอัตราส่วนของเหลวต่อไอ (L/V ratio)

กรณีการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ

ตารางที่ จ-1 ตารางแสดงผลของอัตราส่วน 1:1.3 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)_{max}) โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.0	13.0	13.0	13.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	119.5	119.1	120.5	119.7	0.80	-0.60	0.67
Liquid Temp IN (°C)	73.9	73.9	74.0	73.9	0.07	-0.03	0.09
Vapor Temp OUT (°C)	94.7	94.7	94.1	94.5	0.20	-0.40	0.42
Liquid Temp OUT (°C)	96.2	96.1	95.6	96.0	0.23	-0.37	0.38
Column Temp avg (°C)	95.5	95.5	95.0	95.3	0.16	-0.32	0.33
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.72	20.72	20.72	20.72	0.00	0.00	0.00
Vapor Water IN (%)	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	28.57
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	19.69	19.71	19.83	19.74	0.09	-0.05	0.44
Vapor Water OUT (%)	2.21	2.10	1.98	2.10	0.11	-0.12	5.56
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	8.03	7.96	8.02	8.00	0.03	-0.04	0.54
Liquid Water IN (%)	6.90	6.90	6.90	6.90	0.00	0.00	0.00
Liquid Methylate IN (%)	18.55	18.55	18.55	18.55	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	9.00	8.90	8.87	8.92	0.08	-0.05	0.86
Liquid Water OUT (%)	1.71	1.85	1.40	1.65	0.20	-0.25	15.32
Liquid Methylate OUT (%)	16.67	16.90	16.82	16.80	0.10	-0.13	0.75
Column Temp 1 C	96.5	96.5	96.1	96.4	0.13	-0.27	0.28
Column Temp 2 C	95.0	95.0	94.5	94.8	0.17	-0.33	0.35
Column Temp 3 C	95.0	95.0	94.5	94.8	0.17	-0.33	0.35
Column Temp 4 C	95.4	95.4	94.9	95.2	0.17	-0.33	0.35
Column Temp avg (°C)	95.5	95.5	95.0	95.3	0.16	-0.32	0.33

ตารางที่ จ-2 ตารางแสดงผลของอัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	14.0	14.0	13.5	13.8	0.17	-0.33	2.41
Vapor Temp IN (°C)	118.2	123.2	121.7	121.0	2.17	-2.83	2.34
Liquid Temp IN (°C)	74.2	74.1	74.1	74.1	0.07	-0.03	0.09
Vapor Temp OUT (°C)	95.4	95.3	95.0	95.2	0.17	-0.23	0.25
Liquid Temp OUT (°C)	96.1	97.0	96.8	96.6	0.37	-0.53	0.55
Column Temp avg (°C)	96.2	96.0	95.7	96.0	0.25	-0.25	0.26
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	21.08	21.08	21.08	21.08	0.00	0.00	0.00
Vapor Water IN (%)	0.03	0.07	0.07	0.06	0.01	-0.03	47.06
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.27	20.25	19.95	20.16	0.11	-0.21	1.03
Vapor Water OUT (%)	2.05	1.98	1.98	2.00	0.05	-0.02	2.33
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	7.13	7.02	6.82	6.99	0.14	-0.17	2.43
Liquid Water IN (%)	6.76	6.76	6.63	6.72	0.04	-0.09	1.29
Liquid Methylate IN (%)	18.28	18.28	18.47	18.34	0.13	-0.06	0.69
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.50	7.40	7.21	7.37	0.13	-0.16	2.17
Liquid Water OUT (%)	1.02	0.98	0.98	0.99	0.03	-0.01	2.68
Liquid Methylate OUT (%)	17.13	16.82	17.11	17.02	0.11	-0.20	1.18
Column Temp 1 C	97.1	96.9	96.7	96.9	0.20	-0.20	0.21
Column Temp 2 C	95.6	95.5	95.2	95.4	0.17	-0.23	0.24
Column Temp 3 C	96.1	95.4	95.2	95.6	0.53	-0.37	0.56
Column Temp 4 C	96.1	96.1	95.8	96.0	0.10	-0.20	0.21
Column Temp avg (°C)	96.2	96.0	95.7	96.0	0.25	-0.25	0.26

ตารางที่ จ-3 ตารางแสดงผลของอัตราส่วน 1:2 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) โดยใช้ปริมาณน้ำในสารละลายร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.5	13.5	13.5	13.5	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	119.6	119.7	120.8	120.0	0.77	-0.43	0.64
Liquid Temp IN (°C)	72.3	73.1	72.1	72.5	0.60	-0.40	0.83
Vapor Temp OUT (°C)	94.9	95.0	94.9	94.9	0.07	-0.03	0.07
Liquid Temp OUT (°C)	96.8	96.7	96.8	96.8	0.03	-0.07	0.07
Column Temp avg (°C)	95.6	95.6	95.5	95.6	0.07	-0.06	0.07
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.81	20.84	20.74	20.80	0.04	-0.06	0.27
Vapor Water IN (%)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	19.93	19.95	19.89	19.92	0.03	-0.03	0.17
Vapor Water OUT (%)	1.73	1.76	1.74	1.74	0.02	-0.01	0.96
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	5.48	5.60	5.68	5.59	0.09	-0.11	1.91
Liquid Water IN (%)	6.63	6.63	6.63	6.63	0.00	0.00	0.00
Liquid Methylate IN (%)	18.47	18.47	18.47	18.47	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	6.12	6.21	6.24	6.19	0.05	-0.07	1.13
Liquid Water OUT (%)	0.53	0.53	0.55	0.54	0.01	-0.01	2.48
Liquid Methylate OUT (%)	16.91	16.88	16.90	16.90	0.01	-0.02	0.10
Column Temp 1 C	96.5	96.6	96.4	96.5	0.10	-0.10	0.10
Column Temp 2 C	95.1	95.1	95.0	95.1	0.03	-0.07	0.07
Column Temp 3 C	94.9	95.0	94.9	94.9	0.07	-0.03	0.07
Column Temp 4 C	95.7	95.8	95.7	95.7	0.07	-0.03	0.07
Column Temp avg (°C)	95.6	95.6	95.5	95.6	0.07	-0.06	0.07

ภาคผนวก ฉ
ผลของปริมาณน้ำในสารละลายที่ป้อนเข้า
กรณีการทดลองด้วยสารละลายโซเดียมเมทิลเลทในเมทานอล-น้ำ

ตารางที่ ฉ-1 ตารางแสดงผลของปริมาณน้ำร้อยละ 3.23 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของอัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) อุณหภูมิของการป้อนไอเมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.0	13.0	13.0	13.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	119.6	119.9	119.2	119.6	0.33	-0.37	0.31
Liquid Temp IN (°C)	77.5	78.0	76.3	77.3	0.73	-0.97	1.25
Vapor Temp OUT (°C)	85.1	85.0	85.1	85.1	0.03	-0.07	0.08
Liquid Temp OUT (°C)	89.4	89.2	89.3	89.3	0.10	-0.10	0.11
Column Temp avg (°C)	88.6	88.7	88.5	88.6	0.08	-0.09	0.10
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.78	20.78	20.78	20.78	0.00	0.00	0.00
Vapor Water IN (%)	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	28.57
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.88	20.91	20.82	20.87	0.04	-0.05	0.24
Vapor Water OUT (%)	1.03	1.07	1.04	1.05	0.02	-0.02	2.23
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.85	6.96	6.95	6.92	0.04	-0.07	1.01
Liquid Water IN (%)	3.33	3.33	3.33	3.33	0.00	0.00	0.00
Liquid Methylate IN (%)	9.82	9.82	9.82	9.82	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	6.75	6.87	6.84	6.82	0.05	-0.07	1.03
Liquid Water OUT (%)	0.24	0.22	0.28	0.25	0.03	-0.03	13.51
Liquid Methylate OUT (%)	10.13	9.96	10.03	10.04	0.09	-0.08	0.90
Column Temp 1 C	89.5	89.6	89.4	89.5	0.10	-0.10	0.11
Column Temp 2 C	87.9	88.0	87.7	87.9	0.13	-0.17	0.19
Column Temp 3 C	88.3	88.4	88.2	88.3	0.10	-0.10	0.11
Column Temp 4 C	88.7	88.7	88.7	88.7	0.00	0.00	0.00
Column Temp avg (°C)	88.6	88.7	88.5	88.6	0.08	-0.09	0.10

ตารางที่ จ-2 ตารางแสดงผลของปริมาณน้ำร้อยละ 4.76 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของ อัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) อุณหภูมิของการป้อนไอ เมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.5	13.5	13.5	13.5	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	120.5	123.2	121.3	121.7	1.53	-1.17	1.26
Liquid Temp IN (°C)	75.7	75.6	75.7	75.7	0.03	-0.07	0.09
Vapor Temp OUT (°C)	91.2	91.2	91.2	91.2	0.00	0.00	0.00
Liquid Temp OUT (°C)	92.4	92.4	92.4	92.4	0.00	0.00	0.00
Column Temp avg (°C)	91.5	91.5	91.5	91.5	0.03	-0.03	0.03
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.80	20.88	20.92	20.87	0.05	-0.07	0.32
Vapor Water IN (%)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.50	20.39	20.40	20.43	0.07	-0.04	0.34
Vapor Water OUT (%)	1.57	1.52	1.56	1.55	0.02	-0.03	1.94
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	7.02	6.82	7.05	6.96	0.09	-0.14	2.06
Liquid Water IN (%)	5.00	5.00	5.00	5.00	0.00	0.00	0.00
Liquid Methylate IN (%)	14.23	14.23	14.23	14.23	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.18	7.16	7.30	7.21	0.09	-0.05	1.20
Liquid Water OUT (%)	0.45	0.42	0.51	0.46	0.05	-0.04	10.87
Liquid Methylate OUT (%)	13.51	13.34	13.38	13.41	0.10	-0.07	0.75
Column Temp 1 C	92.5	92.5	92.5	92.5	0.00	0.00	0.00
Column Temp 2 C	90.9	90.8	90.8	90.8	0.07	-0.03	0.07
Column Temp 3 C	91.2	91.2	91.2	91.2	0.00	0.00	0.00
Column Temp 4 C	91.5	91.5	91.4	91.5	0.03	-0.07	0.07
Column Temp avg (°C)	91.5	91.5	91.5	91.5	0.03	-0.03	0.03

ตารางที่ ๓-3 ตารางแสดงผลของปริมาณน้ำร้อยละ 6.25 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วน 1:1.5 เท่าของ อัตราส่วนการป้อนของของเหลวต่อการป้อนของไอสูงสุด ((L/V)max) อุณหภูมิของการป้อนไอ เมทานอล 120 องศาเซลเซียส

	การเก็บตัวอย่าง				ค่าความคลาดเคลื่อน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	MAX	MIN	%Error
Column Pressure (psi)	13.0	13.0	13.0	13.0	0.00	0.00	0.00
Vapor Temp IN (°C)	119.5	120.8	121.1	120.5	0.63	-0.97	0.80
Liquid Temp IN (°C)	75.7	76.2	76.2	76.0	0.17	-0.33	0.44
Vapor Temp OUT (°C)	95.1	95.2	95.2	95.2	0.03	-0.07	0.07
Liquid Temp OUT (°C)	96.7	97.0	97.1	96.9	0.17	-0.23	0.24
Column Temp avg (°C)	95.8	95.8	95.9	95.8	0.06	-0.04	0.06
Vapor Flow Rate IN (kg/h)	20.87	20.71	21.17	20.92	0.25	-0.21	1.21
Vapor Water IN (%)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00
Vapor Flow Rate OUT (kg/h)	20.15	20.08	20.18	20.14	0.04	-0.06	0.28
Vapor Water OUT (%)	1.97	1.91	1.95	1.94	0.03	-0.03	1.72
Liquid Flow Rate IN (kg/h)	6.94	6.94	6.94	6.94	0.00	0.00	0.00
Liquid Water IN (%)	6.61	6.62	6.61	6.61	0.01	0.00	0.11
Liquid Methylate IN (%)	18.46	18.46	18.46	18.46	0.00	0.00	0.00
Liquid Flow Rate OUT (kg/h)	7.43	7.34	7.34	7.37	0.06	-0.03	0.81
Liquid Water OUT (%)	0.96	0.91	0.93	0.93	0.03	-0.02	2.86
Liquid Methylate OUT (%)	16.68	17.24	17.34	17.09	0.25	-0.41	2.38
Column Temp 1 C	96.8	96.8	96.8	96.8	0.00	0.00	0.00
Column Temp 2 C	95.1	95.1	95.2	95.1	0.07	-0.03	0.07
Column Temp 3 C	95.4	95.4	95.5	95.4	0.07	-0.03	0.07
Column Temp 4 C	95.8	95.9	96.0	95.9	0.10	-0.10	0.10
Column Temp avg (°C)	95.8	95.8	95.9	95.8	0.06	-0.04	0.06

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายศิวกร นามเชื่อนแพทย์
วัน เดือน ปี เกิด	24 กันยายน 2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร (ฝ่ายมัธยม) สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY