การจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายในน้ำด้วยไฮโดรคาร์บอนผสม

นาย สุธี อธิปัญญาพันธุ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2951-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SIMULATION OF ETHANOL EXTRACTION FROM AQUEOUS SOLUTION USING HYDROCARBON MIXTURE

Mr. Sutee Atipunyapun

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic year 2006
ISBN 974-14-2951-7

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายในน้ำด้วยไฮโดรคาร์บอนผสม
โดย	นาย สุธี อธิปัญญาพันธุ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวราจารย์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. เจิดศักดิ์ ไชยคุนา)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุธี อธิปัญญาพันธุ์ : การจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายในน้ำด้วยไฮโดรคาร์บอนผสม. (SIMULATION OF ETHANOL EXTRACTION FROM AQUEOUS SOLUTION USING HYDROCARBON MIXTURE) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช, 139 หน้า. ISBN 974-14-2951-7.

การจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลจากสารละลายเอทานอลในน้ำที่ความเข้มข้นเอทานอลเริ่มต้นร้อยละ 15 โดยมวล ด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ ประกอบด้วย พาราฟินส์ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 3 – 10 อะตอม อะโรมาติกส์ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 6 – 8 อะตอม แนฟทีนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 5 – 7 อะตอม แอลกอฮอล์ชนิดปฐมภูมิที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 5 – 10 อะตอม และไฮโดรคาร์บอนผสม เช่น ก๊าซปิโตรเลียมเหลว รีฟอร์เมต และคอนเดนเสต การใช้บิวเทนเป็นตัวทำละลายสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลได้สูงที่สุดเท่ากับ ร้อยละ 99.21 โดยมวล สำหรับการสกัดเอทานอลด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลวความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 98.97 – 99.21 โดยมวล ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปริมาณโพรเพนในก๊าซปิโตรเลียมเหลว ในขณะที่การใช้รีฟอร์เมตและคอนเดนเสตความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้จะมีค่าสูงกว่าร้อยละ 99 โดยมวล สำหรับการผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99 โดยมวลนั้น ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดสามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการได้เกือบทั้งหมดซึ่งสูญเสียไปในปริมาณน้อยมาก พลังงานที่ต้องการสำหรับกระบวนการมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 2.0 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของสารละลายเริ่มต้นสำหรับการใช้โพรเพน บิวเทน และ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นสารสกัด สำหรับรีฟอร์เมตและคอนเดนเสตพลังงานที่ต้องการใช้มีค่าสูงกว่าประมาณ 10 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา .....2549.....

4770509421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD : ETHANOL / EXTRACTION / SIMULATION / HYDROCARBON MIXTURE

SUTEE ATIPUNYAPUN : SIMULATION OF ETHANOL EXTRACTION FROM AQUEOUS SOLUTION USING HYDROCARBON MIXTURE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DEACHA CHATSIRIWECH , Ph.D., 139 pp. ISBN 974-14-2951-7.

To separate ethanol from aqueous mixture of 15 %wt, ethanol extraction including recovery system was simulated with C3-C10 n-paraffins, C6-C8 aromatics, C5-C7 naphthene, C5-C10 1 alcohols and hydrocarbon mixtures, i.e. LPG, reformate and condensate. With butane, the purity of ethanol was highest of 99.21 %wt. For extraction with LPG, the purity of ethanol produced was 98.97-99.21 %wt depending on the fraction of propane. While with both reformate and condensate, the ethanol purity was just above 99 %wt. For at least 99 %wt ethanol produced, the solvent used was able to be recovered completely. In the circumstances, the process required energy about 1.5-2.0 MJ per kg of feed mixture for propane, butane and LPG, while the energy requirement became tenfold for either reformate or condensate.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Engineering.....Student's Signature.....

Field of Study.....Chemical Engineering.....Advisor's Signature.....

Academic Year .....2006.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำและการดูแลเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา รวมทั้งกรุณาตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์เพื่อให้ได้วิทยานิพนธ์ที่มีความสมบูรณ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวราจารย์ และ อาจารย์ ดร. เจิดศักดิ์ ไชยคุนา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดามารดา ญาติพี่น้องและเพื่อนๆ ซึ่งคอยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญภาพ ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฒ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ ..... ธ

บทที่

1. การผลิตเอทานอล 1

1.1 การใช้ประโยชน์เอทานอล 1

1.2 ลักษณะพิเศษของของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ 2

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

2. กระบวนการแยกเอทานอล 5

2.1 กระบวนการแยกเอทานอลที่เลี่ยงการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ 5

2.1.1 การกลั่น ภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (Vacuum Distillation) 5

2.1.2 การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Extraction by Carbondioxide) 7

2.1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ (Extraction by Organic Solvent) 7

2.2 กระบวนการแยกเอทานอลจากของผสมจุดเดือดคงที่ 9

2.2.1 การกลั่นแบบความดันต่างระดับ (Pressure Swing Distillation) 9

2.2.2 การกลั่นแบบเติมเกลือหรือเอทธิลีนไกลคอล (Salt, Extractive Distillation) 10

2.2.3 การกลั่นแบบเติมสารเพื่อให้เกิดของผสมจุดเดือดคงที่ชุดใหม่ (Azeotropic Distillation) 11

2.2.4 กระบวนการแยกน้ำด้วยการดูดซับ (Molecular Sieve Dehydrator Process) 12

2.2.5 กระบวนการระเหยเอทานอลผ่านเยื่อแผ่น (Pervaporation Process) 13

บทที่ หน้า

3. การสกัดด้วยของเหลว 14
3.1 สมดุลระหว่างเฟส 16
3.1.1 สมดุลระหว่างของเหลว-ของเหลว (Liquid-Liquid Equilibrium) 16
3.1.2 สมดุลระหว่างไอ-ของเหลว (Vapor-Liquid Equilibrium) 17
3.1.3 สมดุลระหว่างไอ-ของเหลว-ของเหลว(Vapor-Liquid-Liquid Equilibrium) 18
3.2 แบบจำลองสมดุลระหว่างเฟส 19
3.3 การออกแบบและการจำลองการสกัด 21
3.3.1 การออกแบบหอสกัด 21
3.3.2 หลักการคำนวณด้วยวิธีอย่างง่าย (Kremsor Estmation Method) 23
3.3.3 หลักการคำนวณด้วยวิธีซับซ้อน (Rigorous Calculation Method) 24
4. วิธีการจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย 27
4.1 ชนิดของตัวทำละลายที่เลือกใช้ 27
4.2 การออกแบบหน่วยสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย ณ หอสกัด 28
4.2.1 การพิจารณาจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่เหมาะสม 28
4.2.2 การเลือกใช้สมการทางอุณหพลศาสตร์ให้เหมาะสมสำหรับการสกัด 29
4.2.3 การพิจารณาปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องใช้สำหรับการสกัด 29
4.3 การจำลองการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายต่างๆ ณ หอสกัด 30
4.4 การจำลองหน่วยการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย 30
4.4.1 การพิจารณาความเป็นไปได้การกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย 30
4.4.2 การคำนวณการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย ด้วยหอกลั่น 30
4.5 การพิจารณาการนำเอทานอลที่เหลือจากการสกัดกลับเข้าสู่กระบวนการสกัด 31
4.6 การเลือกใช้ชนิดของกระบวนการสกัดเอทานอลออกจากตัวทำละลาย 32
4.7 การประเมินพลังงานสำหรับกระบวนการในการสกัดเอทานอลทั้งระบบ 37
5. ผลการจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย 38
5.1 ผลการพิจารณาจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่เลือกใช้ 41
5.2 ผลการพิจารณาสมดุลของเหลว - ของเหลว 42
5.3 ปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องใช้ในการสกัดเอทานอล 43

บทที่ หน้า

5.4 ผลการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ 47
5.4.1 ปริมาณของน้ำที่ปนเปื้อนในตัวทำละลาย 47
5.4.2 ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัด 50
5.4.3 ความเข้มข้นของเอทานอลในเฟสตัวทำละลายหลังการสกัด 52
5.5 การประเมินการกลั่นแยกเอทานอลเบื้องต้น 53
5.6 ผลการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย 56
5.6.1 ความบริสุทธิ์ของเอทานอลหลังผ่านกระบวนการกลั่นแยก 57
5.6.2 ปริมาณของเอทานอลที่ได้หลังผ่านกระบวนการกลั่นแยก 61
5.6.3 ความบริสุทธิ์ของตัวทำละลายที่ย้อนกลับสู่การสกัด 63
5.6.4 ปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องสูญเสียจากการกลั่นแยกเอทานอล 64
5.6.5 การนำเอทานอลที่เหลือจากการสกัดกลับเข้าสู่การสกัดใหม่ 65
5.7 ผลการประเมินพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการ 66
5.7.1 พลังงานที่ต้องให้กับกระบวนการ 67
5.7.2 พลังงานที่ต้องดึงออกจากกระบวนการ 70
5.8 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายผสม 74
5.8.1 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลว 74
5.8.1.1 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลว 74
5.8.1.2 ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัด 75
5.8.1.3 ปริมาณน้ำที่ปนเข้ามาในก๊าซปิโตรเลียมเหลว 76
5.8.1.4 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลในสารสกัด 77
5.8.1.5 การกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย 77
5.8.2 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยรีฟอร์เมต 82
5.8.3 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยคอนเดนเสต 84
6. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 87
6.1 สรุปผลการวิจัย 87
6.2 ข้อเสนอแนะ 88

บทที่ หน้า
รายการอ้างอิง 89
ภาคผนวก 91
ภาคผนวก ก. 92
ภาคผนวก ข. 106
ภาคผนวก ค. 130
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 139

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

1.1 สมดุลไอ-ของเหลวสำหรับของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ ณ ความดันบรรยากาศ 3
2.1 ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ ภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 6
2.2 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยการกลั่น ภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 6
2.3 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ 7
2.4 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล 8
2.5 สมดุลไอ-ของเหลว สำหรับของผสมเอทานอลกับน้ำ เมื่อเพิ่มความดัน P1 เป็น P2 9
2.6 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยการกลั่นแบบความดันต่างระดับ 9
2.7 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการกลั่นแบบเติมเกลือหรือ
เอทธิลีนไกลคอล 10
2.8 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการกลั่นแบบเติม
เบนซีนหรือเพนเทน 11
2.9 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการโมเลกุลาร์ซีฟ 12
2.10 หลักการซึมผ่านและการระเหยของสาร 13
2.11 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการเพอร์แวปพอเรชั่น 13
3.1 ประเภทของการสกัดที่จำนวนขั้นสมดุลการสกัดตั้งแต่ 2 ขั้นขึ้นไป 15
3.2 สมดุลของเหลว- ของเหลว 3 องค์ประกอบ 17
3.3 สมดุลไอ–ของเหลว ของระบบสาร 2 องค์ประกอบ 18
3.4 สมดุลไอ–ของเหลว–ของเหลว ของระบบสาร 3 องค์ประกอบ 19
3.5 ผลของจำนวนขั้นสมดุลการสกัดต่อค่าคงที่การสกัด เมื่อสกัดเอทานอลได้
ร้อยละ 10 ถึง 90 โดยมวลของเอทานอลที่มีในสารละลายเริ่มต้น 22
3.6 แผนผังแสดงวิธีการคำนวณการสกัดด้วยสมการความสัมพันธุ์ของเครมเซอร์ 23
3.7 สมดุลขั้นที่ j สำหรับกระบวนการสกัด 25
3.8 แผนผังแสดงวิธีการคำนวณการสกัดด้วยวิธีการคำนวณแบบซับซ้อน 26
4.1 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย
แบบนำเอทานอลกลับสู่กระบวนการสกัด 33
4.2 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย
แบบไม่นำเอทานอลกลับสู่กระบวนการสกัด 35
5.1 ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ (ร้อยละโดยมวล)
ณ ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ 38

ภาพประกอบ หน้า

5.2 ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ (ร้อยละโดยมวล) ณ ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ 39
5.3 ผลของจำนวนอะตอมของคาร์บอนต่ออัตราส่วนของปริมาณของตัวทำละลายต่อปริมาณของสารละลายเริ่มต้น เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล 44
5.4 สัดส่วนของน้ำในตัวทำละลายหลังการสกัด (ร้อยละโดยมวล) จากการคำนวณประยุกต์ด้วยสมการของเครมเซอร์ 48
5.5 สัดส่วนของน้ำในตัวทำละลายหลังการสกัด (ร้อยละโดยมวล) เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล จากการจำลองการสกัดด้วยวิธีแบบซับซ้อน 49
5.6 ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำจากการสกัด คิดเป็นสัดส่วนของตัวทำละลายที่สูญเสียต่อปริมาณสารละลายเริ่มต้น เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล 51
5.7 แสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของเอทานอลหลังการสกัด (ร้อยละโดยมวล) 52
5.8 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลที่ได้หลังการกลั่นแยกออกจากตัวทำละลาย 59
5.9 สัดส่วนของเอทานอลที่กลั่นแยกได้จากปริมาณของเอทานอลในสารสกัด เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล 61
5.10 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของตัวทำละลายย้อนกลับเข้าสู่หอสกัด 63
5.11 สัดส่วนของตัวทำละลายที่สูญเสียจากการกลั่นต่อปริมาณสารละลายเริ่มต้น เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล 64
5.12 พลังงานทั้งหมดที่ต้องให้กับกระบวนการต่อมวลของสารละลายเริ่มต้น เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล 67
5.13 ร้อยละของพลังงานความร้อนที่ต้องให้สำหรับการกลั่น ณ หอกลั่น ต่อพลังงานรวมของทั้งกระบวนการ เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล 68
5.14 ร้อยละของพลังงานความร้อนที่ต้องให้สำหรับหอสตริปเปอร์ ต่อพลังงานรวมของทั้งกระบวนการ ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวล ของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น 69
5.15 พลังงานที่ต้องดึงออกจากกระบวนการต่อปริมาณของสารละลายเริ่มต้น เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล 70

ภาพประกอบ หน้า

5.16 ร้อยละของพลังงานที่ต้องดึงออกจากหอกลั่นต่อพลังงานรวมที่ต้องดึงออกทั้งหมด เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล 71
5.17 ร้อยละของพลังงานที่ต้องดึงออกจากหน่วยลดอุณหภูมิต่อพลังงานรวมที่ต้องดึงออกทั้งหมด เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล 72
5.18 ร้อยละของพลังงานที่ต้องดึงออกจากหอควบแน่นต่อพลังงานรวมที่ต้องดึงออกทั้งหมด ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น 73
5.19 สัดส่วนของปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้น 75
5.20 ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำ 75
5.21 ปริมาณน้ำที่ปนในสารสกัด (ร้อยละโดยมวล) สำหรับการสกัดด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลว 76
5.22 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลในสารสกัด (ร้อยละโดยมวล) สำหรับการสกัดด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลว 77
5.23 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลที่ได้หลังการกลั่น (ร้อยละโดยมวล) 78
5.24 สัดส่วนปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียจากการกลั่นต่อปริมาณสารละลายเริ่มต้น 79
5.25 พลังงานส่วนที่ต้องให้กับกระบวนการต่อมวลของสารละลายเริ่มต้น 80
5.26 พลังงานส่วนที่ต้องดึงออกจากกระบวนการต่อมวลของสารละลายเริ่มต้น 81
ก.1 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบน้ำ,เอทานอล และเฮกเซน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ 92
ก.2 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบน้ำ,เอทานอล และเฮปเทน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ 92
ก.3 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบน้ำ,เอทานอล และออกเทน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ 93
ก.4 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบน้ำ,เอทานอล และโนเนน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ 93

ภาพประกอบ หน้า

ก.5 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ
น้ำ,เอทานอล และเบนซีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
และความดัน 1 บรรยากาศ 94

ก.6 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ
น้ำ,เอทานอล และโทลูอีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
และความดัน 1 บรรยากาศ 94

ก.7 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ
น้ำ,เอทานอล และพาราไซลีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
และความดัน 1 บรรยากาศ 95

ก.8 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ
น้ำ,เอทานอล และออโธไซลีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
และความดัน 1 บรรยากาศ 95

ก.9 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ
น้ำ,เอทานอล และไซโคลเฮกเซน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
และความดัน 1 บรรยากาศ 96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	แสดงความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้จากกระบวนการต่างๆ	1
3.1	ตัวอย่างการสกัดด้วยตัวทำละลายในอุตสาหกรรมเคมี	14
3.2	ตัวทำละลายที่มีการรายงานไว้ว่าเกิดของผสมจุดเดือดคงที่กับเอทานอล ณ ความดันบรรยากาศ	18
3.3	สมการทางอุณหพลศาสตร์กับลักษณะการใช้งาน	20
4.1	แสดงองค์ประกอบของสารต่างๆในรีฟอร์เมต	27
4.2	แสดงองค์ประกอบของสารต่างๆในคอนเดนเสต	28
4.3	แสดงจำนวนและชนิดของอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในกระบวนการแต่ละแบบ	36
5.1	จำนวนขั้นสมดุลการสกัดสำหรับหอสกัดเพื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น	42
5.2	ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วยสมการ UNIFAC กับผลการทดลอง	43
5.3	เปรียบเทียบการคำนวณความบริสุทธิ์ของเอทานอลและจุดเดือดของ ของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายอินทรีย์	54
5.4	เปรียบเทียบการคำนวณความบริสุทธิ์ของตัวทำละลายและจุดเดือดของ ของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างตัวทำละลายอินทรีย์กับน้ำ	55
5.5	สมรรถนะและองค์ประกอบของหอกลั่น	57
5.6	แสดงความบริสุทธิ์และปริมาณของเอทานอลที่ผลิตได้	62
5.7	แสดงองค์ประกอบของหอกลั่นกรณีการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว	78
5.8	ผลการคำนวณกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยรีฟอร์เมต	82
5.9	ผลการคำนวณกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยคอนเดนเสต	84
ก.1	ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และเฮกเซน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ	97
ก.2	ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และเฮปเทน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ	98

ตาราง หน้า

ก.3 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และออกเทน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ 99

ก.4 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และโนเนน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ 100

ก.5 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และเบนซีน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ 101

ก.6 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และโทลูอีน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ 102

ก.7 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และพาราไซลีน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ 103

ก.8 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และออโธไซลีน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ 104

ก.9 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว- ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และไซโคลเฮกเซน ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ 105

ข.1 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-โพรเพน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 106

ข.2 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-บิวเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 107

ตาราง หน้า

ข.3 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เพนเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 108

ข.4 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เฮกเซน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 109

ข.5 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เฮปเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 110

ข.6 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ออกเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 111

ข.7 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-โนเนน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 112

ข.8 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เดคเคน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 113

ข.9 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เบนซีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 114

ข.10 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-โทลูอีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 115

ข.11 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เมตาไซลีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 116

ตาราง หน้า

ข.12 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ออโธไซลีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 117

ข.13 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-พาราไซลีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 118

ข.14 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เอทธิลเบนซีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 119

ข.15 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ไซโคลเพนเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 120

ข.16 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ไซโคลเฮกเซน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 121

ข.17 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เมทธิลไซโคลเพนเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 122

ข.18 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เมทธิลไซโคลเฮกเซน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 123

ข.19 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เพนทานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 124

ข.20 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เฮกซานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 125

ตาราง หน้า

ข.21 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เฮปทานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 126

ข.22 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ออคทานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 127

ข.23 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-โนนานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 128

ข.24 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เดคานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ 129

ค.1 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 10 : 90 130

ค.2 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 20 : 80 131

ค.3 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 30 : 70 132

ค.4 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 40 : 60 133

ค.5 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 50 : 50 134

ตาราง หน้า

ค.6 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 60 : 40 135

ค.7 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 70 : 30 136

ค.8 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 80 : 20 137

ค.9 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 90 : 10 138

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์

C	จำนวนองค์ประกอบของสาร
E_i	ค่าคงที่การสกัดของสารประกอบชนิดที่ i
E_t	พลังงานรวมทั้งกระบวนการ
E_d	พลังงาน ณ หอกลั่น
E_C	พลังงาน ณ หน่วยควบแน่น
E_H	พลังงาน ณ หน่วยลดอุณหภูมิ
$h_{L,j}$	เอนทัลปีของ ชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j
$h_{L,j-1}$	เอนทัลปีของ ชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j-1
$h_{L,j+1}$	เอนทัลปีของ ชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j+1
$h_{V,j}$	เอนทัลปีของ ชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุลที่ j
$h_{V,j-1}$	เอนทัลปีของ ชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุลที่ j-1
$h_{V,j+1}$	เอนทัลปีของ ชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุลที่ j+1
k	จำนวนรอบของการคำนวณวงใน
K_i	ค่าคงที่สมดุลของสารประกอบประกอบชนิดที่ i
$K_{i,j}$	ค่าคงที่สมดุลของสารประกอบประกอบชนิดที่ i ณ ขั้นสมดุลที่ j
L_j	อัตราการไหลของ ชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j
L_{j-1}	อัตราการไหลของ ชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j-1
L_{j+1}	อัตราการไหลของ ชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j+1
N	จำนวนขั้นสมดุล
P_j	ความดันของระบบ ณ ขั้นสมดุลที่ j
P_{j-1}	ความดันของระบบ ณ ขั้นสมดุลที่ j-1
P_{j+1}	ความดันของระบบ ณ ขั้นสมดุลที่ j+1
r	จำนวนรอบของการคำนวณวงนอก
S	ปริมาณของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด
S_{loss}	ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสีย
S_W	ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียเนื่องจากเฉพาะอิทธิพลของน้ำ

สัญลักษณ์

T_j	อุณหภูมิของระบบ ณ ขั้นสมดุลที่ j
T_{j-1}	อุณหภูมิของระบบ ณ ขั้นสมดุลที่ j-1
T_{j+1}	อุณหภูมิของระบบ ณ ขั้นสมดุลที่ j+1
V_j	อัตราการไหลของ ชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุลที่ j
V_{j-1}	อัตราการไหลของ ชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุลที่ j-1
V_{j+1}	อัตราการไหลของ ชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุลที่ j+1
W	ปริมาณของน้ำที่ปนเปื้อนในสารสกัดทั้งหมด
W_{org}	ปริมาณของน้ำที่ปนเปื้อนในสารสกัดจากเฉพาะอิทธิพลของตัวทำละลายอินทรีย์
x_i	สัดส่วนโดยมวลของสารประกอบชนิดที่ i ใน ชั้นน้ำ
$x_{i,j}$	สัดส่วนโดยมวลของสารประกอบชนิดที่ i ใน ชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j
$x_{i,j-1}$	สัดส่วนโดยมวลของสารประกอบชนิดที่ i ในชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j-1
$x_{i,j+1}$	สัดส่วนโดยมวลของสารประกอบชนิดที่ i ในชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j+1
y_i	สัดส่วนโดยมวลของสารประกอบชนิดที่ i ในชั้นสารทำละลายอินทรีย์
$y_{i,j}$	สัดส่วนโดยมวลของสารประกอบชนิดที่ i ในชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุลที่ j
$y_{i,j-1}$	สัดส่วนโดยมวลของสารประกอบชนิดที่ i ในชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุลที่ j-1
$y_{i,j+1}$	สัดส่วนโดยมวลของสารประกอบชนิดที่ i ในชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุลที่ j+1
l_i	constant in UNIFAC equation
q_i	relative surface area of a molecule in UNIFAC equation
Q_k	area parameter for functional group k in UNIFAC method
r_i	relative number of segment per molecule in UNIFAC equation
R_k	volume parameter for functional group k in UNIFAC method
T_{ji}	binary interaction parameter in UNIFAC equation
u_{ji}	energy of interaction in UNIFAC equation
$\bar{Z}$	lattice coordinate number in UNIFAC equation

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อักษรกรีก

$\gamma_{iL,j}$ สัมประสิทธิ์แอคติวิตี้ของสารประกอบชนิดที่ i ใน ชั้นน้ำ ณ ขั้นสมดุลที่ j

$\gamma_{iV,j}$ สัมประสิทธิ์แอคติวิตี้ของสารประกอบชนิดที่ iในชั้นสารทำละลายอินทรีย์ ณ ขั้นสมดุล ที่ j

$\emptyset_i$ สัดส่วนของสารประกอบที่ i ที่ไม่ถูกสกัด

ε_1 เกณฑ์ในการยอมรับผลการคำนวณที่ 1

ε_2 เกณฑ์ในการยอมรับผลการคำนวณที่ 2

τ_1 ตัวแปรที่นำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์การยอมรับที่ 1

τ_2 ตัวแปรที่นำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์การยอมรับที่ 2

θ_I Area fraction in UNIFAC equation

ψ_I Segment fraction in UNIFAC equation

$\nu_k^{(i)}$ number of functional group of kind k in molecule i in UNIFAC method

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
การผลิตเอทานอล

เอทานอล หรือ เอธทิลแอลกอฮอล์ นั้นสามารถผลิตได้ด้วย กระบวนการหมักด้วยยีสต์หรือแบคทีเรีย และด้วยกระบวนการสังเคราะห์จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แต่ละวิธีการผลิตนั้นจะมีขั้นตอนและวิธีการที่แตกต่างกันไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็มีความบริสุทธิ์แตกต่างกัน ดังสรุปใน ตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้จากกระบวนการต่างๆ

วิธีการผลิต	วัตถุดิบที่ใช้	สารเจือปน	ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละโดยมวล)
การหมักด้วยยีสต์ [1 -6]	กลูโคส,ซูโครส น้ำ	อะเซตาลดีไฮด์ ยีสต์	น้อยกว่า 10
การหมักด้วยแบคทีเรีย [7,8]	กลูโคส,ซูโครส น้ำ	อะเซตาลดีไฮด์ แบคทีเรีย	น้อยกว่า 10
การสังเคราะห์จากเอทิลีนด้วยกรดกำมะถัน [9-11]	เอทิลีน กรดกำมะถัน,น้ำ	กรดกำมะถัน	น้อยกว่า 30
การสังเคราะห์จากเอทิลีนด้วยกรดฟอสฟอริก [12-14]	เอทิลีน กรดฟอสฟอริก,น้ำ	กรดฟอสฟอริก	10 ถึง 25
การสังเคราะห์จากก๊าซคาร์บอนมอนออกไซด์ [14-16]	คาร์บอนมอนออกไซด์ ไฮโดรเจน	เมทานอล กรดอะซิติก	น้อยกว่า 72

ในการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการดังกล่าวข้างต้นเอทานอลที่ผลิตได้นั้นจะอยู่ในลักษณะของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการผลิตเอทานอลทุกวิธีนั้นมีน้ำมาเกี่ยวข้องไม่ว่าในลักษณะของการใช้เป็นวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ และอาจมีสารอื่นเจือปนอยู่ด้วยซึ่งขึ้นกับกระบวนการผลิตดังตาราง 1.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะเอทานอลที่มีการแยกสารเจือปนต่างๆออกแล้ว ซึ่งจะคงเหลือแต่ของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำเท่านั้น

1.1 การใช้ประโยชน์เอทานอล

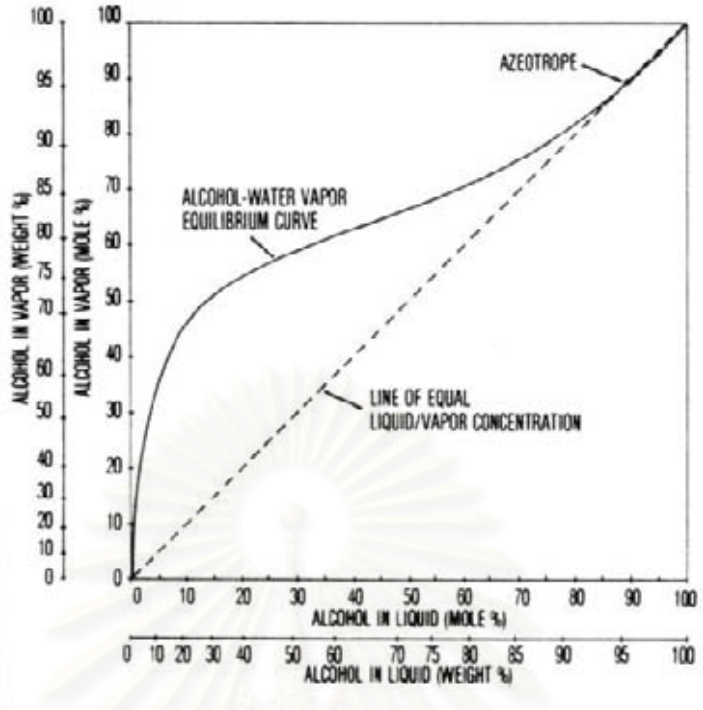
เอทานอลที่ผลิตได้จากการหมักนั้นสามารถนำไปใช้เพื่อการบริโภค ส่วนเอทานอลที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นไม่นิยมใช้เพื่อการบริโภคแต่จะใช้สำหรับอุตสาหกรรม เนื่องจากเอทานอลที่ผลิตได้เป็นของผสมซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน โดยการใช้ประโยชน์จากเอทานอลนั้นแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะหลักๆดังนี้ สำหรับการบริโภคเอทานอลไม่จำเป็นต้องมีความบริสุทธิ์สูงแต่จะเน้นพิจารณาในเรื่องของสิ่งเจือปนเนื่องจากสารเจือปนบางอย่างเมื่อรับประทานเข้าไปอาจ

ก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกาย หรือสำหรับเป็นสารตัวทำละลายหรือวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเคมีต่างๆ และสำหรับการใช้ผสมเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ โดยเอทานอลที่จะนำไปผสมเป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์นั้นจำเป็นต้องใช้เอทานอลที่มีความเข้มข้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99 โดยมวล และจะมีน้ำปนได้ไม่เกินร้อยละ 0.3 โดยมวลเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องยนต์เพราะเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ต่ำนั้นจะมีน้ำผสมมาก โดยปัจจุบันมีการนำเอทานอลความบริสุทธิ์สูงดังกล่าวไปผสมกับน้ำมันดีเซลและน้ำมันเบนซินเพื่อลดการนำเข้าน้ำมันดิบ โดยอัตราส่วนที่ทำการผสมสำหรับน้ำมันเบนซินเพื่อผลิตเป็นแก๊สโซฮอล์นั้นผสมในอัตรส่วนเอทานอลต่อน้ำมันเบนซิน 10 ต่อ 90 ส่วนโดยปริมาตร ดังนั้นเอทานอลที่ใช้จะมีความบริสุทธิ์แตกต่างกันไปแต่เอทานอลที่ได้จากการหมักหรือการสังเคราะห์ยังคงมีความบริสุทธิ์ไม่ได้สูงตามที่ต้องการ ดังนั้นการแยกเอทานอลออกจากของผสมเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลให้ตรงตามความต้องการใช้งานจึงเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งของการผลิตเอทานอล

1.2 ลักษณะพิเศษของของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ

เอทานอลมีจุดเดือดปกติที่ อุณหภูมิ 78.4 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 0.789 ส่วนน้ำมีจุดเดือดปกติอยู่ที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส [17] เอทานอลสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ จุดเดือดของผสมเอทานอลกับน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปจากสารบริสุทธิ์ของเอทานอลหรือน้ำขึ้นกับสัดส่วนของ เอทานอลในของผสม ณ ความดันบรรยากาศ ของผสมเอทานอลกับน้ำจะแสดงคุณสมบัติเป็นของผสมจุดเดือดคงที่(Azeotropic Mixture) ที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 95.6 โดยมวล หรือร้อยละ 89.5 โดยโมล ดังแสดงในรูป 1.1 จุดเดือดคงที่ของของผสม เท่ากับ 78.15 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุด การแยกเอทานอลให้มีความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 95.6 โดยมวล ด้วยหลักการของสมดุลไอ-ของเหลว ณ ความดันบรรยากาศจึงไม่สามารถดำเนินการได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยเทคนิควิธีการแยกต่างๆเพื่อแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 95.6 โดยมวล ซึ่งมีหลายวิธีการในการแยก เช่น การกลั่นด้วยเงื่อนไขพิเศษ การสกัดด้วยของเหลว การดูดซับ และการแพร่ผ่านเยื่อแผ่น เป็นต้น

เนื่องจากการสกัดด้วยของเหลวเป็นการแยกของผสมที่ใช้พลังงานน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการกลั่น แต่กระบวนการสกัดแยกต้องมีหน่วยแยกสารตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์ที่สกัดได้เพื่อนำกลับมาใช้งานอีกครั้ง จึงจำเป็นต้องศึกษากระบวนการแยกเอทานอลออกจากสารตัวทำละลายเพิ่มเติมจากการสกัดเอทานอลด้วยของเหลว เพื่อประเมินการใช้พลังงานสำหรับการแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยมวล เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานของกระบวนการแยกเอทานอลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 1.1 สมดุลไอ-ของเหลวสำหรับของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ ณ ความดันบรรยากาศ

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

จำลองกระบวนการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลในน้ำด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรคาร์บอนผสม และประเมินการใช้พลังงานสำหรับกระบวนการผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยมวล

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1) คำนวณการสกัดแยกเอทานอลด้วยตัวทำละลายองค์ประกอบเดียวในกลุ่ม พาราฟินส์ ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 3 -10 อะตอม แอลกอฮอล์ ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 5 -10 อะตอม แนฟทีน ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 5 - 7 อะตอม และอะโรมาติกส์ ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 6 – 8 อะตอม ที่หาได้ง่าย

2) คำนวณการสกัดแยกเอทานอลออกจากน้ำไฮโดรคาร์บอนผสม ได้แก่ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว(LPG) ไฮโดรคาร์บอนเหลวจากก๊าซธรรมชาติ(CONDENSATE) และรีฟอร์เมต (REFORMATE)

3) คำนวณเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในกระบวนการแยกเอทานอลทั้งหมด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลเบื้องต้นของกระบวนการสกัดเอทานอลพร้อมด้วยระบบการแยกสารตัวทำละลายเพื่อผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 99 โดยมวล และการใช้พลังงานสำหรับการแยกเอทานอลจากของผสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
กระบวนการแยกเอทานอล

เนื่องจากเอทานอลที่ผลิตได้ในแต่ละกรรมวิธีการผลิตนั้นยังคงมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งานบางประเภทตามที่ได้กล่าวไปแล้วในบทก่อนหน้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการแยกเอทานอลออกจากน้ำในการเพิ่มบริสุทธิ์ของเอทานอลให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งตามลักษณะพิเศษของเอทานอลกับน้ำจะเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ จึงไม่สามารถกลั่นแยกเอทานอลออกจากน้ำด้วยวิธีการกลั่นแบบธรรมดา ณ ความดันบรรยากาศ จะต้องอาศัยเทคนิคพิเศษหรือหลักการแยกสารอื่นประกอบ โดยทั่วไปๆแล้วการแยกเอทานอลออกจากของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำได้มีการศึกษากันมาพอสมควรซึ่งมีวิธีในการแยกแตกต่างกันออกไป การแยกเอทานอลอาจแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มโดยอาศัยคุณสมบัติของผสมจุดเดือดคงที่เป็นเกณฑ์ ดังนี้

- กระบวนการแยกเอทานอลที่เลี่ยงการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่
- กระบวนการแยกเอทานอลจากของผสมจุดเดือดคงที่

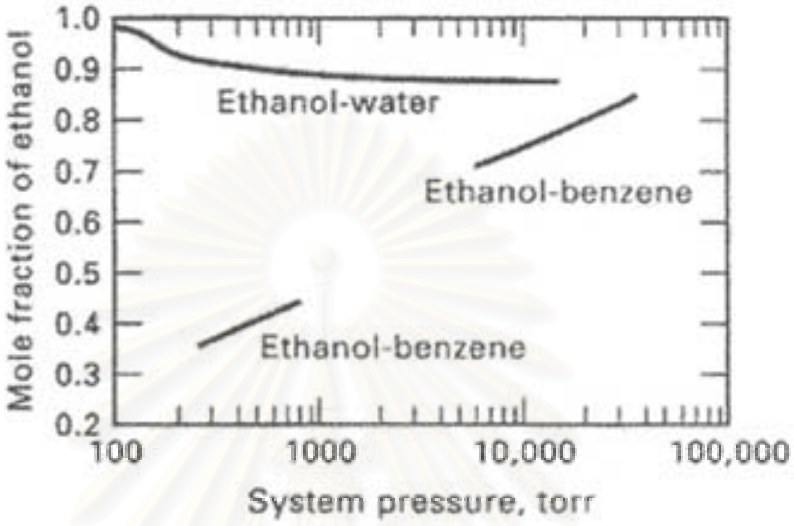
2.1 กระบวนการแยกเอทานอลที่เลี่ยงการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่

2.1.1 การกลั่น ภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (Vacuum Distillation) [18]

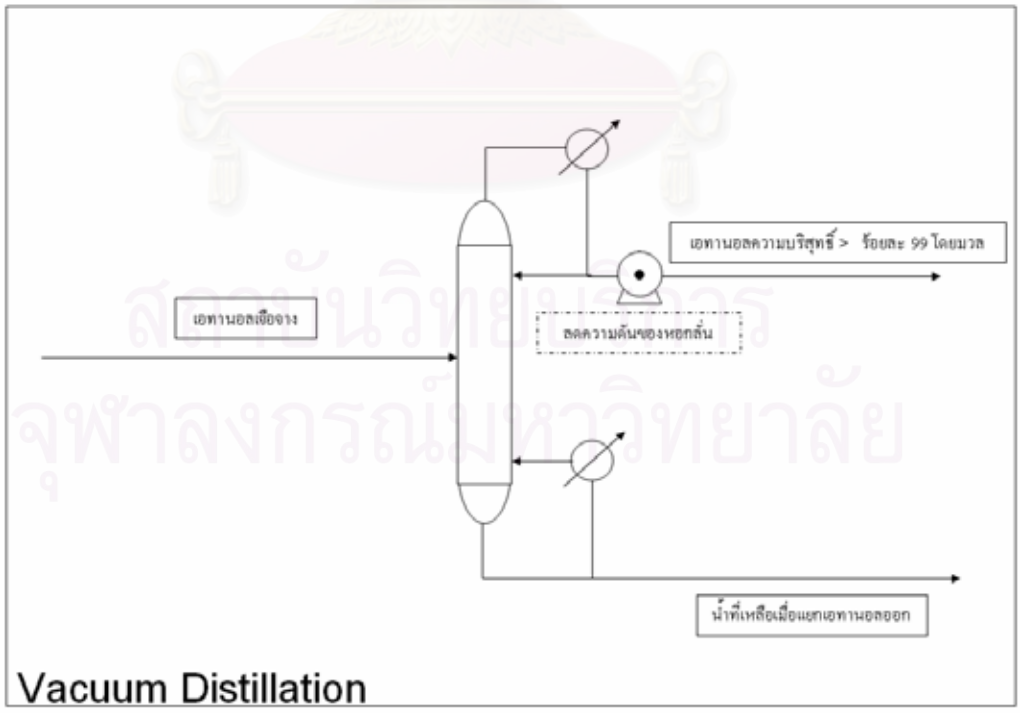
สภาวะของระบบที่เปลี่ยนไป เช่น อุณหภูมิและความดัน นั้นจะส่งผลทำให้สมดุลไอ-ของเหลวของระบบเอทานอลกับน้ำนั้นเปลี่ยนแปลงไป การเพิ่มความดันของระบบจะส่งผลทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ของเอทานอลกับน้ำลดลงจากเดิมที่อยู่ในตำแหน่งความเข้มข้นของเอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95.6 โดยมวล หรือการลดความดันของระบบจะส่งผลไปในทางตรงกันข้ามนั่นคือความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ใหม่จะเพิ่มขึ้นไปทางเอทานอลบริสุทธิ์มากขึ้น ดังรูปที่ 2.1 เมื่อความดันของระบบลดลงเอทานอลจะระเหยได้ง่ายขึ้น หรือของผสมสามารถเดือดได้ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเดือด ณ ความดันปกติ

ของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำนั้นมีคุณสมบัติเป็นของผสมจุดเดือดคงที่ ณ ความดันบรรยากาศแต่เนื่องจากความดันของระบบนั้นมีผลต่อสมดุลไอ-ของเหลว ของเอทานอลกับน้ำ ถ้าความดันของระบบลดลงจะส่งผลทำให้สมดุลไอของเหลวของเอทานอลกับน้ำนั้นเปลี่ยนไปจึงทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่เปลี่ยนไปมากกว่าของผสมจุดเดือดคงที่ ณ ความดันบรรยากาศ ขึ้นกับความดันของระบบที่ลดลง และจะหายไป ณ ความดันของระบบเท่ากับ

70 ทอรร์[19] ดังนั้นโดยอาศัยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถกลั่นแยกเอทานอลจากของผสมได้ความบริสุทธิ์ตามที่ต้องการ โดยการลดความดันของระบบลงตามเงื่อนไขของสมดุล พลังงานที่ใช้ในการกลั่นเท่ากับ 7 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ ซึ่งจะต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับปั๊มในการลดความดันของระบบลงเพิ่มด้วย ดังรูปที่ 2.2



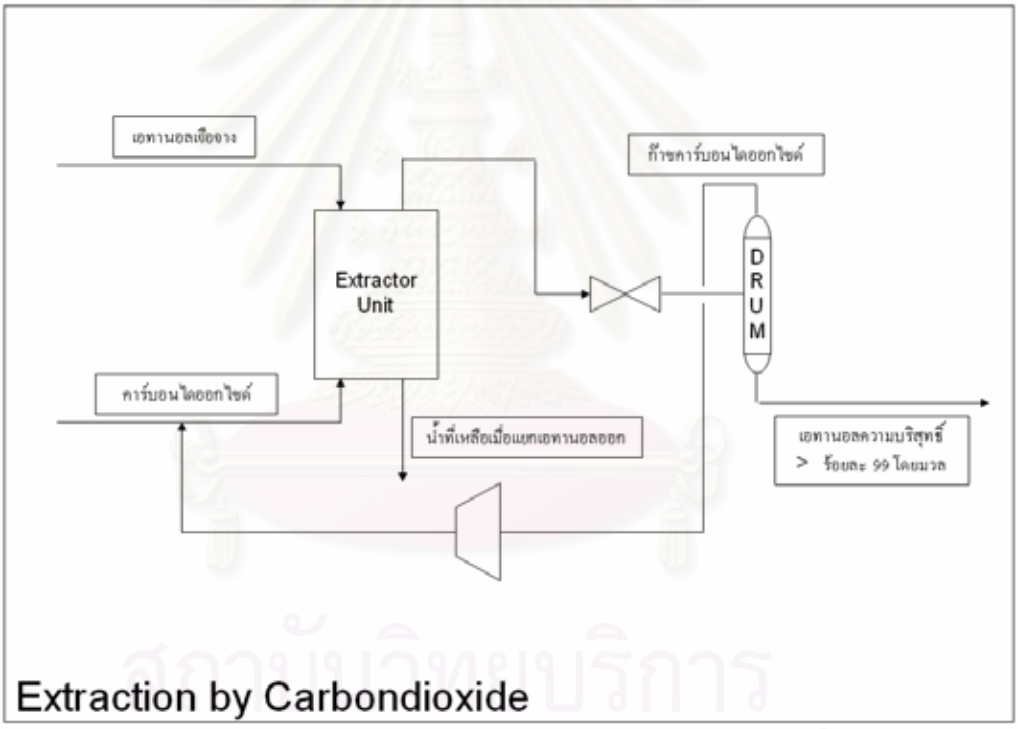
รูปที่ 2.1 ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ ภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยการกลั่น ภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ

2.1.2 การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Extraction by Carbondioxide)

M. Budich และ ผู้ร่วมงาน [19] ได้ศึกษาการแยกเอทานอลด้วยวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ณ สภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 98.7 บรรยากาศ หลังจากสกัดแล้วได้ศึกษาสมดุลไอของเหลวของเอทานอล น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ ณ สภาวะข้างต้น พบว่าระบบไม่เกิดเป็นของผสมจุดเดือดคงที่ จึงแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากเอทานอลด้วยการลดความดันของระบบลงเหลือ 47.37 บรรยากาศเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นของเหลวเปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซและระเหยออกจากเอทานอลหลังจากนั้นจึงนำคาร์บอนไดออกไซด์ไปเพิ่มความดันเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ โดยต้องใช้พลังงานในรูปของพลังงานไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับคอมเพรสเซอร์เพื่อเพิ่มความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นหลังจากแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากของผสมเอทานอลที่เหลือก็จะมีความบริสุทธิ์ตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

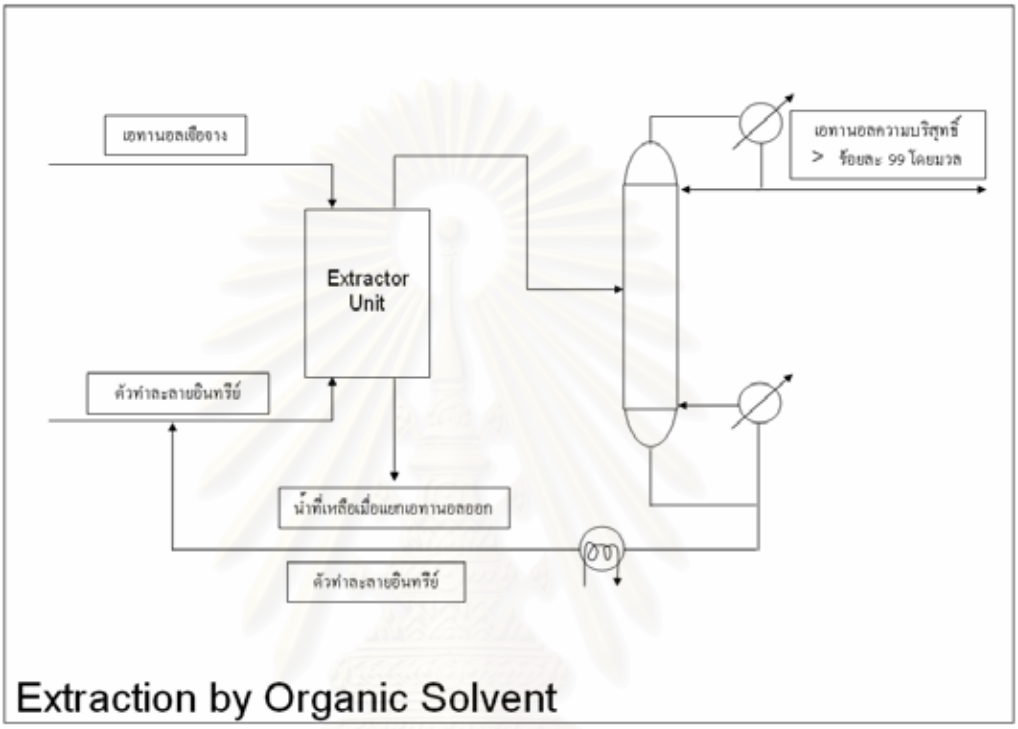


รูปที่ 2.3 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

2.1.3 การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ (Extraction by Organic Solvent)

เอทานอลสามารถละลายได้บางส่วนในตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่ แต่น้ำมักจะไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกับสารละลายอินทรีย์เนื่องจากความมีขั้วที่ต่างกัน ดังนั้นสารละลายอินทรีย์สามารถเป็นตัวทำละลายเอทานอลในกระบวนการสกัดเอทานอลออกจากน้ำ สารละลายอินทรีย์แบ่งออกเป็นสารบริสุทธิ์กับสารผสม การสกัดเอทานอลสามารถนำตัวทำละลายทั้ง 2 แบบมาใช้ในการสกัดได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการพิจารณาความเหมาะสมซึ่งจากการสืบค้นพบว่ามีผู้ศึกษาสมดุล

ของเหลว-ของเหลวระหว่างสารละลายอินทรีย์บางชนิดกับเอทานอลไว้ แต่เอทานอลที่สกัดได้ยังคงปนในสารตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งจำเป็นต้องมีหน่วยสำหรับแยกเอทานอลออกจากสารตัวทำละลาย เพื่อผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ตามต้องการ และนำสารตัวทำละลายอินทรีย์กลับมาใช้สกัดเอทานอลอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



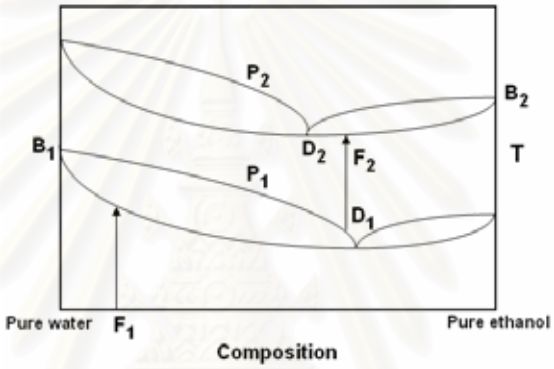
รูปที่ 2.4 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

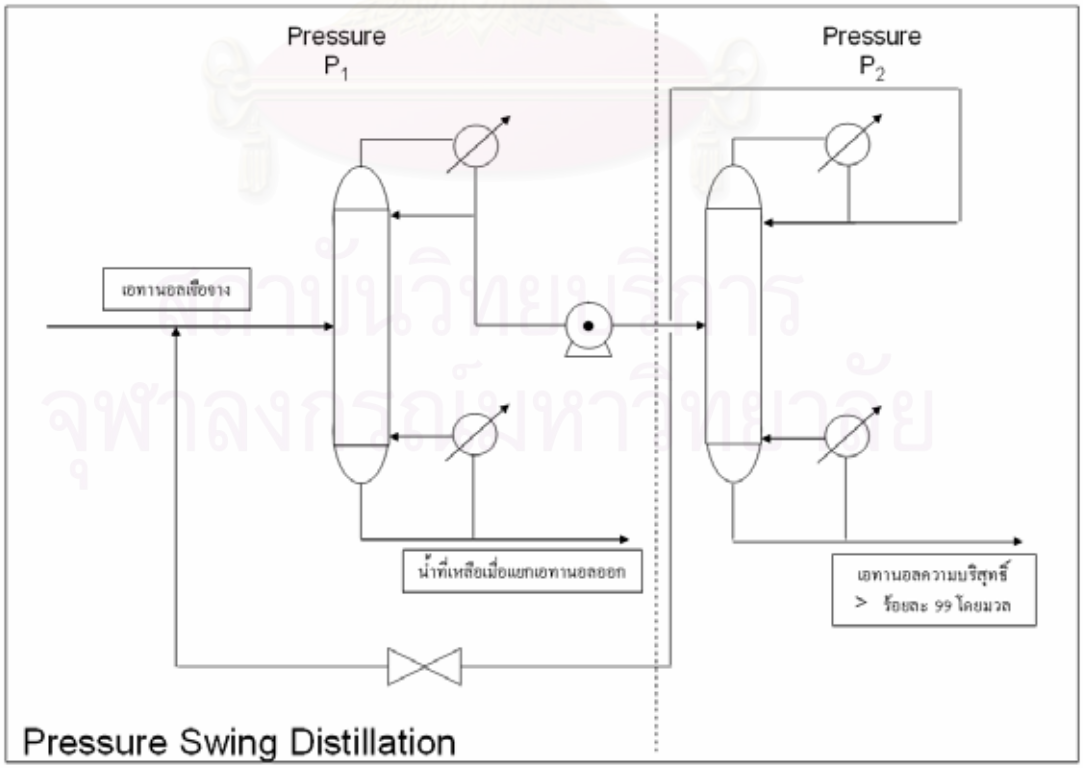
2.2 กระบวนการแยกเอทานอลจากของผสมจุดเดือดคงที่

2.2.1 การกลั่นแบบความดันต่างระดับ (Pressure Swing Distillation) [20]

กระบวนการกลั่นแบบเปลี่ยนความดันนั้นจะกลั่นแยกน้ำออกเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้ใกล้ความเข้มข้นของของผสมจุดเดือดคงที่แล้วจึงนำของผสมที่ได้ไปกลั่นต่อในหอกลั่นความดันสูงขึ้น(P_2) โดยที่ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากหอกลั่นแรกต้องสูงกว่าความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ ณ ความดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะสามารถผลิตเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ตามต้องการ ส่วนของผสมที่เหลือจากยอดหอ สามารถนำไปผสมกับสารละลายเอทานอลเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เพื่อลดการสูญเสียเอทานอล



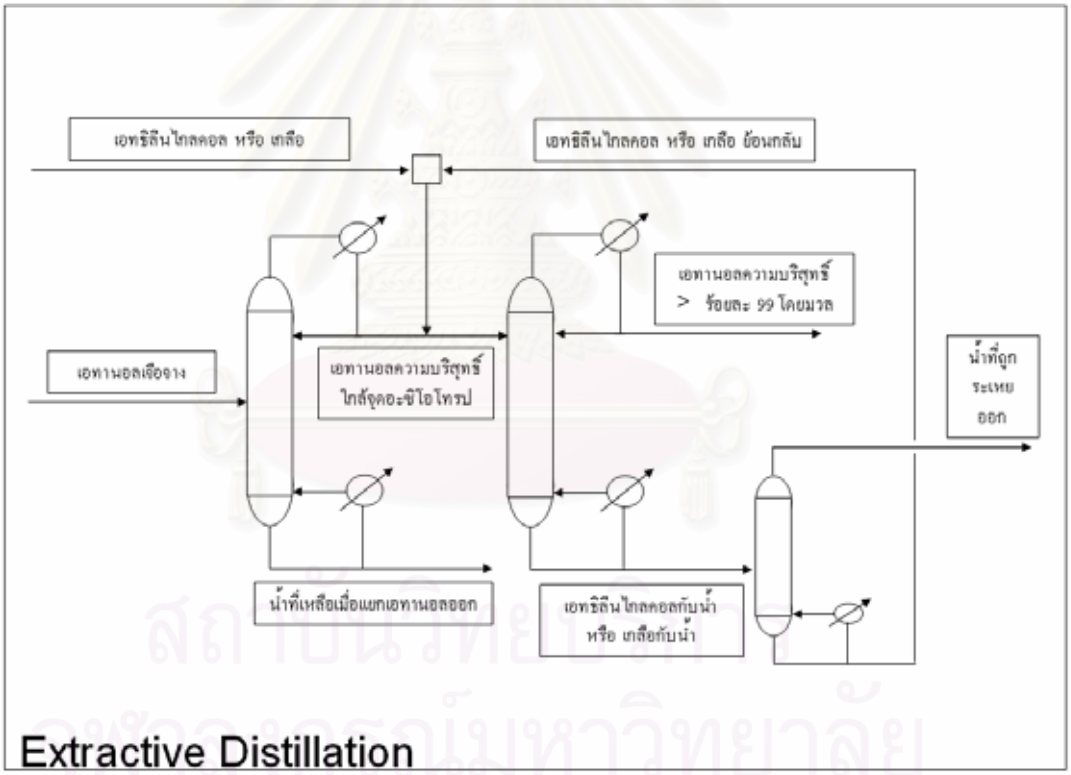
รูปที่ 2.5 สมดุลไอ-ของเหลว สำหรับของผสมเอทานอลกับน้ำ เมื่อเพิ่มความดัน P_1 เป็น P_2



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยการกลั่นแบบความดันต่างระดับ

2.2.2 การกลั่นแบบเติมเกลือหรือเอทธิลีนไกลคอล (Salt, Extractive Distillation) [21]

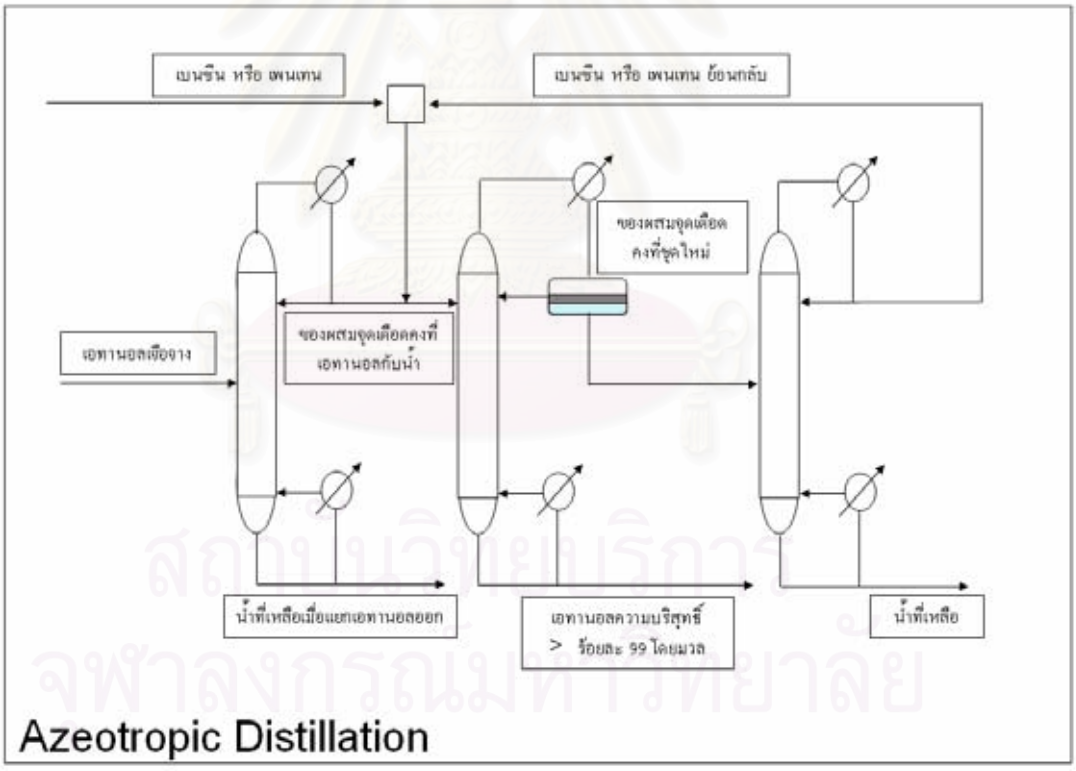
กระบวนการนี้จะกลั่นให้ได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ใกล้ของผสมจุดเดือดคงที่คือประมาณ ร้อยละ 95 โดยมวล หลังจากนั้นจึงเติมสารใหม่เพื่อรบกวนระบบสมดุลไอ-ของเหลวระหว่างเอทานอลกับน้ำ โดยสารที่เติมลงไปจะไปทำหน้าที่ดูดน้ำจากของผสม สารที่เติมลงไปถ้าเป็นของเหลวจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ คือ มีจุดเดือดสูงกว่าหรือระเหยได้ยากกว่าเอทานอลและน้ำ ไม่เกิดของผสมจุดเดือดคงที่ชุดใหม่กับเอทานอลและน้ำ ยกตัวอย่างสารที่เติมลงไปเช่น เอทิลีนไกลคอล ไดเอทิลีนไกลคอล ไตรเอทิลีนไกลคอล และเตตระเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น หรือการเติมเกลือที่เป็นของแข็งลงไปเพื่อดูดน้ำ ยกตัวอย่างชนิดของเกลือที่เติมลงไป เช่น Nacl $CaCl_2$ เป็นต้น เพื่อให้เอทานอลที่กลั่นแยกได้มีความบริสุทธิ์สูงเพราะน้ำบางส่วนจะถูกดูดไว้ทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์ข้ามจุดอะซิโอโทรปหลังจากนั้นจะอาศัยการกลั่นในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลให้ได้ตามที่ต้องการ กระบวนการผลิตโดยสังเขป แสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการกลั่นแบบเติมเกลือหรือเอทธิลีนไกลคอล

2.2.3 การกลั่นแบบเติมสารเพื่อให้เกิดของผสมจุดเดือดคงที่ชุดใหม่ (Azeotropic Distillation) [22]

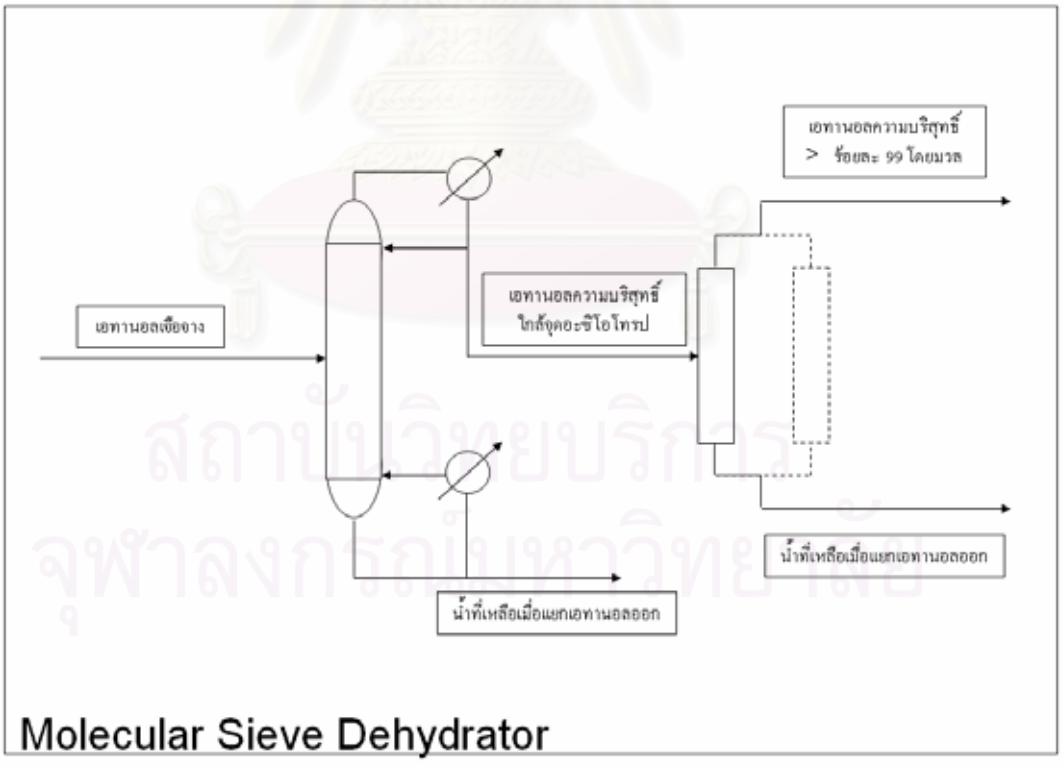
ขั้นตอนแรกจะทำการกลั่นสารละลายเอทานอลให้มีบริสุทธิ์ใกล้ของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับน้ำ หลังจากนั้นจะมีการเติมสารลงไป เช่น เบนซีน หรือ เพนเทน เป็นต้น เพื่อให้เกิดของผสมจุดเดือดคงที่ชุดใหม่ ซึ่งเป็นของผสมจุดเดือดคงที่ 3 องค์ประกอบระหว่างเอทานอล-น้ำ-เบนซีนหรือเพนเทน ซึ่งมีจุดเดือดของของผสมต่ำกว่าของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ ซึ่งเมื่อทำการกลั่นแยกจะได้ผลิตภัณฑ์ยอดหอกลั่นเป็นของผสมชุดใหม่ ซึ่งเมื่อควบแน่นกลายเป็นของเหลวจะเกิดการแบ่งเฟสเป็นของเหลว 2 เฟส สำหรับเอทานอลก็จะได้ความบริสุทธิ์ตามต้องการโดยจะออกทางส่วนล่างของหอกลั่น โดยของผสมจุดเดือดคงที่ที่ออกทางยอดหอกลั่นจะนำไปกลั่นแยกเบนซีนหรือเพนเทนออกเพื่อนำกลับเข้าสู่กระบวนการใหม่อีกครั้ง ซึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการกลั่นแบบเติมเบนซีนหรือเพนเทน

2.2.4 กระบวนการแยกน้ำด้วยการดูดซับ (Molecular Sieve Dehydrator Process) [23]

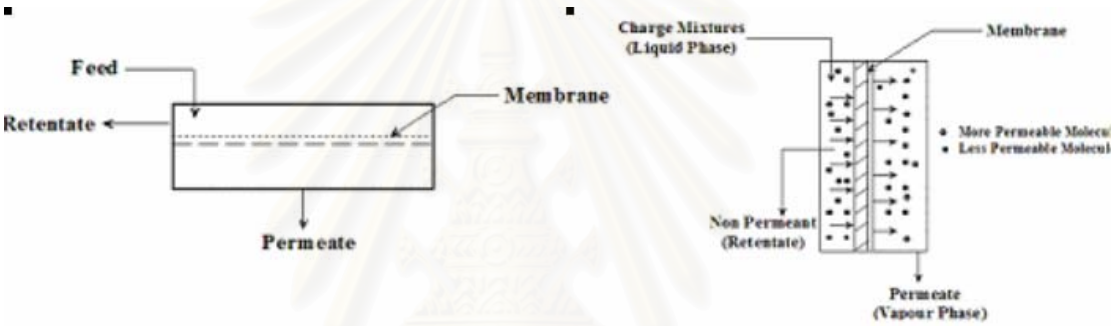
ขั้นตอนแรกจะกลั่นสารละลายเอทานอล ณ ความดันบรรยากาศเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลให้ใกล้ของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับน้ำ คือมีความเข้มข้นของเอทานอลประมาณ ร้อยละ 95 โดยมวล โดยสารละลายเอทานอลเริ่มต้นมีความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยมวล พลังงานที่ใช้ในการกลั่นรายงานเป็นปริมาณการใช้ไอน้ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 6 กิโลกรัมของไอน้ำต่อผลิตภัณฑ์เอทานอล 1 ลิตร โดย 1 กิโลกรัมของไอน้ำ 100 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 2260 กิโลจูล [24] ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการกลั่นเอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยมวล เท่ากับ 13560 กิโลจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ ซึ่งของผสมจะเหลือน้ำอยู่ในปริมาณเล็กน้อยซึ่งจะอาศัยกระบวนการในการดูดซับเพื่อแยกน้ำออกจากของผสม เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลให้ได้ตามที่ต้องการ โดยการดูดซับจะอาศัยตัวดูดซับ เช่น ซีโอไลต์ (clinoptilolite) เป็นต้น ซึ่งเป็นสารดูดความชื้นโดยตัวดูดซับจะเลือกดูดน้ำไว้ในสัดส่วนปริมาณมากกว่าเอทานอลทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น เมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวแล้วจำเป็นจะต้องมีการเปลี่ยนคอลัมน์เพื่อนำตัวดูดซับไปทำการปรับสภาพก่อนนำกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในปัจจุบันในการผลิตเอทานอลความบริสุทธิ์สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.9



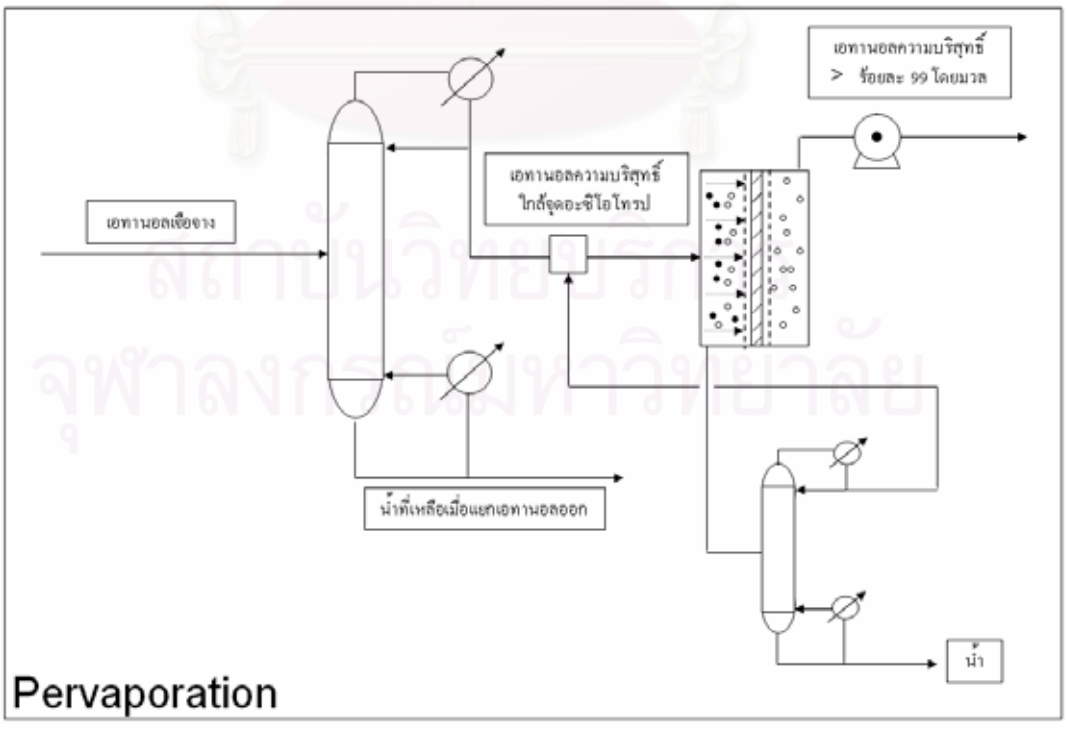
รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการโมเลกุลาร์ซีพ

2.2.5 กระบวนการระเหยเอทานอลผ่านเยื่อแผ่น (Pervaporation Process) [25]

สารละลายเอทานอลเจือจางจะถูกเพิ่มความเข้มข้นให้ใกล้ของผสมจุดเดือดคงที่ด้วยการกลั่น หลังจากนั้นจึงนำของผสมไปเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 องศาเซลเซียสก่อนเข้าสู่กระบวนการระเหยเอทานอลผ่านเยื่อแผ่น ซึ่งเยื่อแผ่นนั้นเป็นเยื่อเลือกผ่านจะยอมให้เอทานอลผ่านได้แต่ไม่ยอมให้น้ำผ่าน หลังจากเอทานอลซึมผ่านเยื่อแผ่นแล้วจะถูกดึงออกจากเยื่อแผ่นด้วยการระเหย โดยใช้การลดความดันของระบบลงทำให้เอทานอลสามารถระเหยได้ง่ายขึ้น เพื่อให้ได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ตามต้องการ สำหรับสารละลายเอทานอลที่เหลือจะนำไปกลั่นเพิ่มความเข้มข้นให้ใกล้ของผสมจุดเดือดคงที่แล้วจึงนำกลับเข้าสู่กระบวนการอีกครั้ง สำหรับพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคือพลังงานในการระเหยสาร(305.1 kJ/kg Ethanol) และพลังงานในการควบแน่น (น้ำหล่อเย็นอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส 10 ลูกบาศก์เมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 หลักการซึมผ่านและการระเหยของสาร



รูปที่ 2.11 กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการเพอร์แวปพอเรชั่น

บทที่ 3
การสกัดด้วยของเหลว

การสกัดด้วยตัวทำละลายนั้นเป็นวิธีการแยกของเหลวผสมหรือสารละลายด้วยคุณสมบัติการละลายของสาร โดยของเหลวผสมที่ต้องการแยกคือ ของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ โดยจะนำตัวทำละลายมาสกัดเอทานอลซึ่งละลายอยู่ในน้ำโดยตัวทำละลายนั้นจะแยกเฟสออกจากน้ำเป็น 2 เฟสหลังจากเข้าสู่สมดุลการสกัดแล้ว ซึ่งเอทานอลจะถูกละลายเข้าไปในตัวทำละลายซึ่งอาจจะมีน้ำติดไปด้วยบางส่วนขึ้นกับชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ โดยสารตัวทำละลายที่ใช้ควรมีคุณสมบัติขั้นต้นดังนี้

สารตัวทำละลายสำหรับการสกัดควรมีลักษณะ ดังนี้

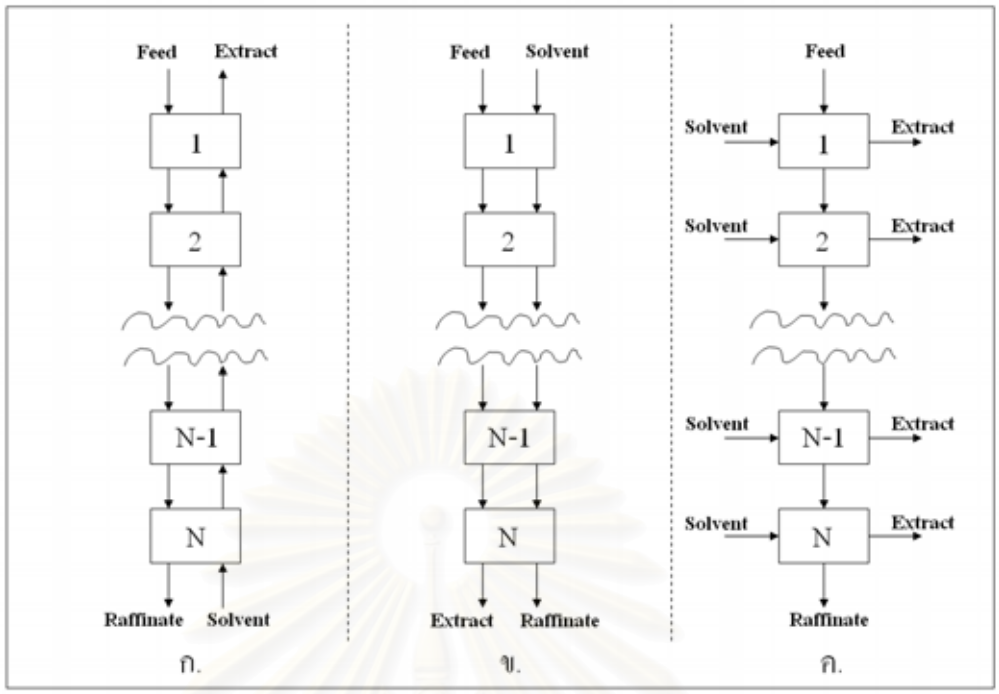
1. ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ หรือละลายเข้ากับน้ำได้เพียงเล็กน้อย
2. มีค่าคงที่สมดุลการสกัดของเอทานอลสูง
3. สามารถแยกออกจากเอทานอลได้ง่าย เช่น มีค่าการระเหยแตกต่างจากเอทานอลพอสมควรเพื่อง่ายต่อการแยกด้วยวิธีการกลั่น
4. สามารถหาได้ง่ายและราคาถูก

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการสกัดด้วยตัวทำละลายในอุตสาหกรรมเคมี [17]

ตัวถูกละลาย,B	ตัวพา,A	ตัวทำละลาย,S	ค่าคงที่สมดุล (K_B)
เอทานอล	กลีเซอรอล	เบนซีน	0.159
อะซิโตน	โทลูอีน	เอทธิลีนไกลคอล	0.286
เบนซีน	ไซโคลเฮกเซน	เฟอร์ฟูรัล	0.680
อะซิโตน	เอทธิลีนไกลคอล	ไซโคลเฮกเซน	0.508
กรดอะซิติก	น้ำ	เฟอร์ฟูรัล	0.787
อะซิโตน	น้ำ	เบนซีน	0.875

การสกัดที่มีจำนวนขั้นสมดุลการสกัดตั้งแต่ 2 ขั้นขึ้นไป ทิศทางของการสกัดแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. การสกัดแบบเคลื่อนที่ไหลสวนทางกัน (Countercurrent-Flow)
2. การสกัดแบบเคลื่อนที่ไหลไปด้วยกัน (Cocurrent-Flow)
3. การสกัดแบบเคลื่อนที่ไหลข้ามกัน (Crosscurrent-Flow)



รูปที่ 3.1 ประเภทของการสกัดที่จำนวนขั้นสมดุลการสกัดตั้งแต่ 2 ขั้นขึ้นไป

ก. การสกัดแบบเคลื่อนที่ไหลสวนทางกัน

ข. การสกัดแบบเคลื่อนที่ไหลไปด้วยกัน

ค. การสกัดแบบเคลื่อนที่ไหลข้ามกัน

- สำหรับการสกัดแบบเคลื่อนที่ไปด้วยกัน (Cocurrent Cascade)

$$\frac{X_B^{(N)}}{X_B^{(F)}} = \frac{1}{1+E} \tag{3.1}$$

การสกัดแบบเคลื่อนที่ไปด้วยกัน เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์จะเห็นว่าการเพิ่มจำนวนขั้นสมดุลของการสกัดขึ้นไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัด เสมือนกับพิจารณาเป็น 1 ขั้นสมดุลการสกัดเพียงเท่านั้น

- สำหรับการสกัดแบบเคลื่อนที่ข้ามกัน (Crosscurrent Cascade)

$$\frac{X_B^{(N)}}{X_B^{(F)}} = \frac{1}{(1+E/N)^N} \tag{3.2}$$

การสกัดแบบเคลื่อนที่ข้ามกันการเพิ่มจำนวนขั้นสมดุลการสกัดจะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดสูงขึ้น แต่ไม่สามารถสกัดได้โดยสมบูรณ์(Complete Extraction) นั่นคือไม่สามารถสกัดตัวถูกละลายได้หมดโดยสมบูรณ์

- สำหรับการสกัดแบบเคลื่อนที่สวนทางกัน (Countercurrent Cascade)

$$\frac{X_B^{(N)}}{X_B^{(F)}} = 1 \Big/ \sum_{n=0}^{N} E^N \qquad (3.3)$$

การสกัดแบบเคลื่อนที่สวนทางกันนั้นตามความสัมพันธ์เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นจะเห็นว่าจะให้ประสิทธิภาพการสกัดสูงที่สุด อีกทั้งยังสามารถสกัดตัวถูกละลายออกจนหมดได้(Complete Extraction) โดยมีเงื่อนไขดังนี้ คือ ค่าคงที่การสกัดต้องมีค่ามากกว่า 1 ดังสมการที่ 3.4

$$X_B^{(\infty)} \Big/ X_B^{(F)} = 0 \quad ; 1 \le E \le \infty \qquad (3.4)$$

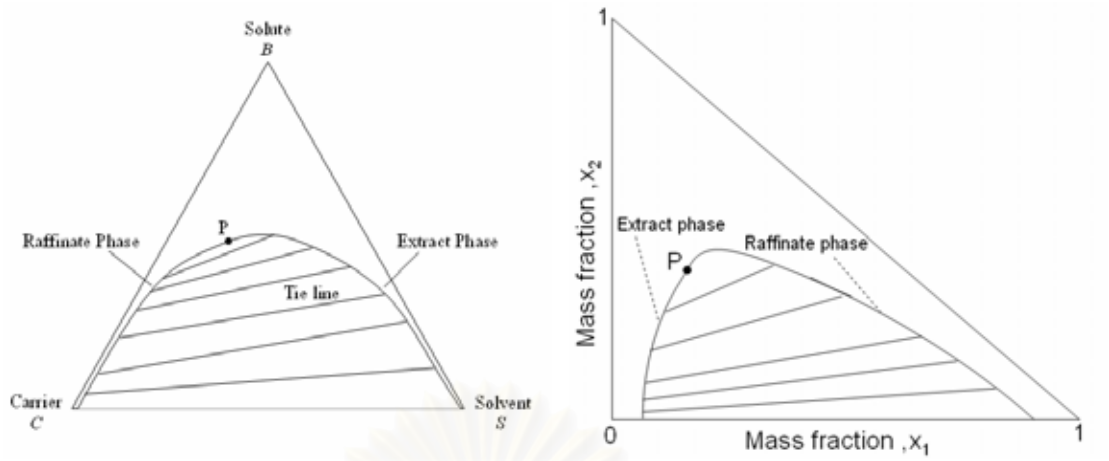
$$X_B^{(\infty)} \Big/ X_B^{(F)} = (1\text{-}E) \quad ; \quad E \le 1 \qquad (3.5)$$

3.1 สมดุลระหว่างเฟส

การแยกสารที่มีจำนวนองค์ประกอบตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไปนั้นจะอาศัยหลักการของสมดุลในการแยกสารซึ่งในกรณีที่สารที่ต้องการแยกเป็นของแข็งผสมอยู่กับของเหลวหรือไอนั้นสามารถคัดแยกออกได้โดยง่าย แต่ในกรณีสารที่ต้องการแยกนั้นผสมอยู่เป็นเนื้อเดียวกันจำเป็นต้องอาศัยพลังงานหรือมวลสารในการแยกเช่น การกลั่นนั้นเป็นการอาศัยพลังงานในการเกิดสมดุลไอ-ของเหลว ส่วนการสกัดนั้นเป็นการอาศัยมวลสารในการเกิดสมดุลของเหลว-ของเหลว ดังนั้นจึงมีผู้ให้ความสนใจในการศึกษาสมดุลเป็นจำนวนมาก โดยสมดุลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้มีดังนี้

3.1.1 สมดุลระหว่างของเหลว-ของเหลว (Liquid-Liquid Equilibrium)

การสกัดนั้นเป็นการอาศัยหลักการของสมดุลของเหลว-ของเหลวในการแยกสารออกจากกัน ซึ่งสารถูกละลายจะละลายเข้าไปในตัวทำละลายบางส่วนขึ้นกับคุณสมบัติการละลายของสารตัวถูกละลายกับตัวทำละลาย ซึ่งเมื่อถึงจุดสมดุลแล้วปริมาณของตัวถูกละลายในตัวทำละลายจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสามารถพิจารณาสมดุลของเหลว-ของเหลวโดยอาศัยข้อมูลดังรูปที่ 3.2



(ก.) (ข.)

รูปที่ 3.2 สมดุลของเหลว- ของเหลว 3 องค์ประกอบ

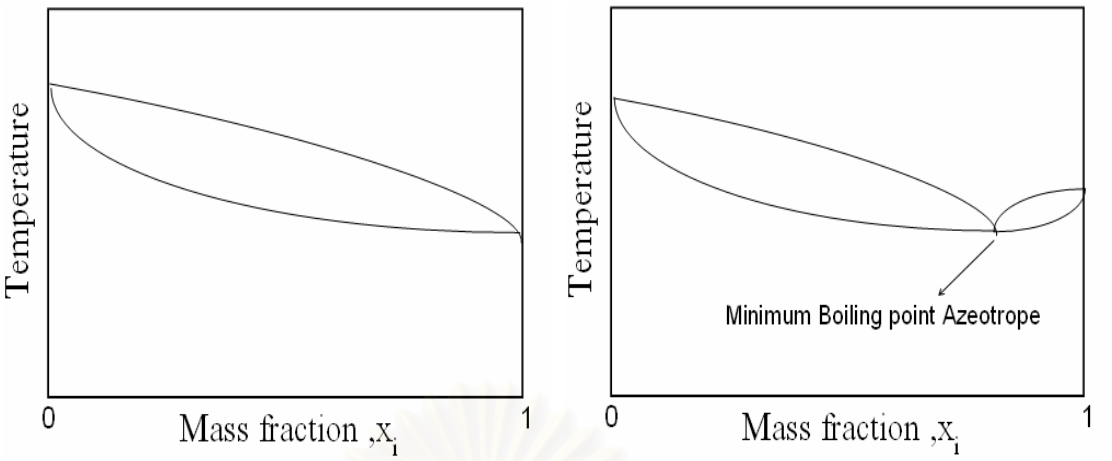
ก. กราฟสามเหลี่ยมด้านเท่า(Equilateral triangular diagram)

ข. กราฟสามเหลี่ยมหน้าจั่ว(Right triangular diagram)

เนื่องจากการจำลองกระบวนการสกัดอาศัยกระบวนการคำนวณสมดุลของเหลว-ของเหลว จากสมการทางอุณหพลศาสตร์เพื่อความน่าเชื่อถือจึงได้พิจารณาคำนวณเปรียบเทียบข้อมูลสมดุลกับข้อมูลที่ได้มีผู้เคยทำการศึกษาสมดุลของเหลว-ของเหลวไว้ จากการค้นหาข้อมูลสมดุลของเหลว-ของเหลวของระบบที่เกี่ยวข้องที่สนใจจะทำการศึกษาพบว่าปรากฏมีดังนี้ สำหรับตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มพาราฟินส์ข้อมูลสมดุลของระบบที่มีผู้รายงานไว้ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงพันธะเดี่ยวคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 6-9 (เฮกเซน เฮปเทน ออกเทน โนเนน)[26] และเดคเคน[27] สำหรับตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกส์ ประกอบด้วย เบนซีน[28] โทลูอีน[29] และไซลีน (พาราไซลีนและออโธไซลีน)[30] และสำหรับตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มแนฟทีน ได้แก่ ไซโคลเฮกเซน[31] เป็นต้น โดยทั้งหมดศึกษา ณ สภาวะ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดันมากกว่าความดัน ณ จุดเดือดของสาร ยกเว้นกรณีของเดคเคนที่ศึกษาไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยการศึกษาสมดุลของเหลว – ของเหลวเป็นการทดลองหาจุดสมดุลของเฟสตัวทำละลายและเฟสน้ำ ซึ่งทำการทดลองโดยเริ่มต้นด้วยตัวทำละลายหลังจากนั้นจึงเติมน้ำลงไปเรื่อยๆจนเกิดความขุ่น (cloud point) จึงจะถือว่าเริ่มมีการแบ่งเฟส สำหรับเฟสน้ำก็ทำเช่นเดียวกัน

3.1.2 สมดุลระหว่างไอ-ของเหลว (Vapor-Liquid Equilibrium)

การกลั่นนั้นเป็นการอาศัยพลังงานในการแยกสาร โดยพลังงานจะไปทำให้ของเหลวบางส่วนกลายเป็นไอทำให้ระบบเปลี่ยนเป็นไอกับของเหลวทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสารเกิดขึ้นเมื่อถึงจุดสมดุลปริมาณองค์ประกอบในแต่ละเฟสจะไม่เปลี่ยนไป ซึ่งการพิจารณาสมดุลไอ-ของเหลว ต้องพิจารณาข้อมูลสมดุลไอ-ของเหลวประกอบด้วย ซึ่งมีทั้งกรณีที่สมดุลไอ – ของเหลวพบการเกิดและไม่พบของผสมจุดเดือดคงที่ดังรูปที่ 3.3



(ก.) (ข.)

รูปที่ 3.3 สมดุลไอ–ของเหลว ของระบบสาร 2 องค์ประกอบ

ก. พฤติกรรมเป็นแบบอุดมคติ(Ideal System)

ข. พฤติกรรมเป็นแบบไม่อุดมคติ(Non-Ideal System)

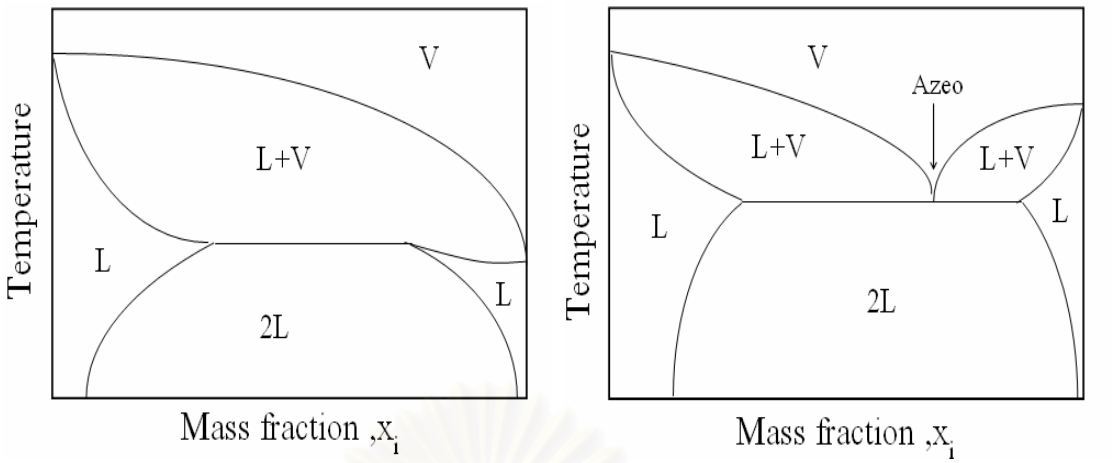
การแยกสารตัวถูกละลายที่สกัดแล้วออกจากสารตัวทำละลายเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการสกัด สำหรับการแยกด้วยวิธีการกลั่นจำเป็นต้องเปรียบเทียบจุดเดือดของสารตัวทำละลายกับจุดเดือดของสารตัวถูกละลาย และการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างสารตัวถูกละลายกับสารตัวทำละลาย ดังตัวอย่างที่สรุปไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวทำละลายที่มีการรายงานไว้ว่าเกิดของผสมจุดเดือดคงที่กับเอทานอล ณ ความดันบรรยากาศ [17]

ตัวทำละลาย	ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละโดยมวล)	จุดเดือดของของผสม (องศาเซลเซียส)
เฮกเซน	21	58.68
เฮปเทน	48.27	72
เบนซีน	32.37	68.24
โทลูอีน	68.06	76.65
ไซโคลเฮกเซน	30.5	64.9

3.1.3 สมดุลระหว่างไอ-ของเหลว-ของเหลว(Vapor-Liquid-Liquid Equilibrium)

เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างของเหลวด้วยกันเองและระหว่างไอกับของเหลวทำให้เกิดสมดุลระหว่างเฟส 2 จุด เช่น การเติมเบนซีนลงไปในสมดุลไอ-ของเหลวทำให้เกิดของผสมจุดเดือดคงที่ใหม่ซึ่งเมื่อทำการควบแน่นพบว่ากลายเป็นของเหลว2เฟส



(ก.) (ข.)

รูปที่ 3.4 สมดุลไอ–ของเหลว–ของเหลว ของระบบสาร 3 องค์ประกอบ [32]
ก. แบบไม่พบการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่
ข. แบบพบการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่

จากรูปที่ 3.4 สมดุลไอ-ของเหลว-ของเหลว ชนิด ก. นั้นเป็นชนิดที่ไม่พบการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ สำหรับ ชนิด ข. เมื่อของผสมจุดเดือดคงที่นั้นเกิดการควบแน่นจากไอกลายเป็นของเหลวจะพบว่าของเหลวจะเกิดการแยกชั้น

3.2 แบบจำลองสมดุลระหว่างเฟส

คุณสมบัติและสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้นจำเป็นต่อการจำลองกระบวนการแยกสารทุกระบบ โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับ สมดุลเฟส และพลังงาน เนื่องจากกระบวนการในวิศวกรรมเคมีนั้นประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆหลายขั้นตอนซึ่งแต่ละขั้นตอนก็เหมาะสมกับสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นหน้าที่ของผู้ใช้ในการเลือกสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ให้เหมาะสมกับสิ่งที่พิจารณา ที่สภาวะสมดุล ศักย์เคมีของแต่ละองค์ประกอบในแต่ละเฟสจะเท่ากัน

สารละลายอุดมคตินั้นค่าสัมประสิทธ์กิจกรรมของเหลว(activity coefficient) จะมีค่าเป็นหนึ่ง แต่ในกรณีที่สารละลายเป็นสารละลายไม่อุดมคตินั้นจำเป็นจะต้องคิดค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว ซึ่งได้มีผู้เสนอแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ไว้มากมายซึ่งการเลือกใช้ก็ต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับระบบ ในงานวิจัยนี้นั้นจะทำการทดสอบแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ในขั้นต้นก่อนนำไปใช้งานจริง สมการที่สามารถคำนวณระบบที่ประกอบด้วยของเหลว 2 เฟสนั้นประกอบไปด้วย

สำหรับตัวบ่งชี้ที่ใช้ในการบอกว่าสภาวะของระบบเข้าสู่สมดุลแล้วได้แก่ค่า ฟูกาซิตี้ (fugacity), $\overline{f_i}$ สำหรับระบบสมดุลของเหลว-ของเหลวเป็นดังนี้

$$\overline{f_{iL}^{(1)}} = \overline{f_{iL}^{(2)}} \tag{3.6}$$

$$\gamma_{iL}^{(1)} x_i^{(1)} = \gamma_{iL}^{(2)} x_i^{(2)} \tag{3.7}$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธ์กิจกรรมของเหลว(activity coefficient), γ_i สามารถคำนวณได้จากสมการทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งได้มีผู้ทำการศึกษาและพัฒนาขึ้นมาให้ใช้งานด้วยกันหลากหลายสมการ แต่สำหรับกรณีของเหลวก็มีสมการที่ใช้ได้ไม่กี่สมการตามข้อกำหนดหรือเงื่อนไขของสมการนั้นๆ

ตารางที่ 3.3 สมการทางอุณหพลศาสตร์กับลักษณะการใช้งาน

สมการทางอุณหพลศาสตร์	LLE	VLE		VLLE	
		ideal	non - ideal	non-azeo	azeo
Regular Solution		✓			
Van Laar		✓			
SRK		✓			
Peng - Robinson		✓			
Hiranuma (HRNM)	✓	✓			
Margules	✓	✓			
T. K. Wilson	✓	✓			
NRTL	✓	✓	✓	✓	
UNIQUAC	✓	✓	✓	✓	
UNIFAC	✓	✓	✓	✓	

* หมายเหตุ ✓ สำหรับ LLE สามารถใช้คำนวณพบการแยกเฟส

✓ สำหรับ VLE ideal สามารถใช้คำนวณพบการเกิดสมดุลไอ – ของเหลว

✓ สำหรับ VLE non-ideal สามารถใช้คำนวณพบการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ 2 องค์ประกอบ

✓ สำหรับ VLLE azeo หมายถึงใช้คำนวณพบการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ 3 องค์ประกอบ

สำหรับแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของ UNIQUAC และ NRTL นั้น เมื่อนำไปทดสอบด้วยโปรแกรมช่วยคำนวณกลับไม่พบเห็นการแยกเฟส ทั้งนี้เนื่องจาก สมการทั้งคู่นั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาหาค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์กิจกรรมของเหลวด้วยการทดลองแล้วจึงนำมาคำนวณค่าสำหรับระบบที่ต้องการศึกษา แต่สมการของ UNIFAC จะคำนวณได้ด้วยอาศัยคุณสมบัติของหมู่ฟังค์ชั่นของสารประกอบจึงง่ายต่อการศึกษา

- แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ UNIFAC,

(UNIQUAC Functional-group Activity Coefficient)

$$\ln \gamma_I = \ln \gamma_I^C + \ln \gamma_I^R$$

$$= \ln(\psi_i / x_i) + \bar{Z}/2\, q_i \ln(\theta_i / \psi_i) + l_i - (\psi_i / x_i) \sum_{J=1}^{C} x_j l_j$$

$$+ q_i \left[1 - \ln\left(\sum_{J=1}^{C} \theta_j T_{ji}\right) - \sum_{J=1}^{C} \left((\theta_j T_{ji}) / \left(\sum_{K=1}^{C} \theta_k T_{kj}\right)\right) \right] \quad (3.8)$$

$$\psi_i = (x_i r_i / \sum_{i=1}^{C} x_i r_i) = \text{segment fraction} \quad (3.9)$$

$$\theta_i = (x_i q_i / \sum_{i=1}^{C} x_i q_i) = \text{area fraction} \quad (3.10)$$

$$T_{ji} = \exp((u_{ji} - u_{ii})/RT) \quad (3.11)$$

$$l_j = (\bar{Z}/2)(r_j - q_j) - (r_j - 1) \quad (3.12)$$

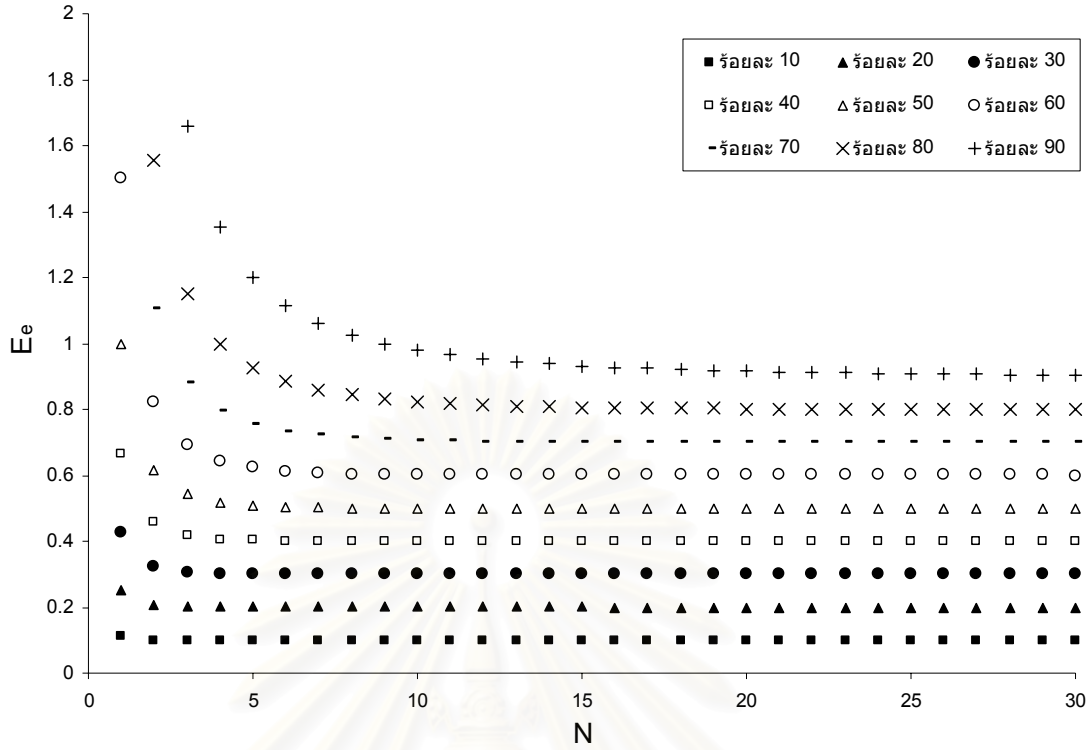
$$r_i = \sum_k \nu_k^{(i)} R_k \quad (3.13)$$

$$q_i = \sum_k \nu_k^{(i)} Q_k \quad (3.14)$$

3.3 การออกแบบและการจำลองการสกัด

3.3.1 การออกแบบหอสกัด

จากความสัมพันธ์ของเครมเซอร์ตามสมการที่ 3.15 ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดเอทานอล จำนวนขั้นสมดุลการสกัดและค่าคงที่การสกัด เพื่อจะทำการเลือกจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบหอสกัดนั้นจึงได้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาพิจารณาให้อยู่ในรูปของกราฟเพื่อจะได้เห็นภาพของผลของจำนวนการสกัดที่มีต่อค่าคงที่การสกัดและร้อยละการสกัดเอทานอลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้วาดกราฟความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.15 โดยกำหนดร้อยละการสกัดเอทานอลให้เป็นค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้ คือ ตั้งแต่ 10 – 90 แล้วนำค่าที่ได้มาพล๊อตลงบนกราฟแล้วพิจารณาผลของจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่มีต่อค่าคงที่การสกัด ได้ผลดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ผลของจำนวนขั้นสมดุลการสกัดต่อค่าคงที่การสกัด เมื่อสกัดเอทานอลได้ร้อยละ 10 ถึง 90 โดยมวลของเอทานอลที่มีในสารละลายเริ่มต้น

จากรูปตามความสัมพันธ์ของเครมเซอร์พบว่า เมื่อจำนวนขั้นสมดุลการสกัดเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าคงที่การสกัดเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งเท่ากับสัดส่วนของเอทานอลที่ต้องการสกัดนั่นเอง โดยการสกัดเอทานอลที่น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยมวล และจำนวนขั้นสมดุลของการสกัดนั้นน้อยกว่า 5 ขั้น พบว่าจำนวนขั้นสมดุลการสกัดไม่มีผลต่อค่าคงที่การสกัดเอทานอล นั่นคือไม่ว่าจะเพิ่มจำนวนขั้นสมดุลการสกัดไปจะไม่ส่งผลให้ค่าคงที่การสกัดลดลง และการสกัดเอทานอลที่มากกว่าร้อยละ 50 โดยมวล และจำนวนขั้นสมดุลการสกัดน้อยกว่า 10 ขั้น พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนขั้นสมดุลการสกัดพบว่าค่าคงที่การสกัดเอทานอลลดลงอย่างเห็นได้ชัด และการสกัดเอทานอลที่น้อยกว่าร้อยละ 80 โดยมวล และจำนวนขั้นสมดุลของการสกัดนั้นมากกว่า 10 ขั้น พบว่าจำนวนขั้นสมดุลการสกัดไม่มีผลต่อค่าคงที่การสกัดเอทานอล นั่นคือค่าคงที่การสกัดเอทานอลนั้นเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งจะเท่ากับค่าสัดส่วนของการสกัดเอทานอล และการสกัดเอทานอลที่ร้อยละ 90 โดยมวล และจำนวนขั้นสมดุลการสกัดตั้งแต่ 25 ขั้นขึ้นไปการเพิ่มจำนวนขั้นสมดุลจะไม่ส่งผลทำให้ค่าคงที่การสกัดเอทานอลนั้นลดลง

เกณฑ์ในการเลือกใช้ได้กำหนดไว้ดังนี้ คือ ณ ร้อยละการสกัดที่ต้องการสกัดใดๆนั้น เมื่อเพิ่มจำนวนขั้นสมดุลการสกัดแล้วทำให้ค่าคงที่การสกัดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่เกินร้อยละ 1 ของค่าคงที่สมดุลการสกัดที่จำนวนขั้นสมดุลอนันต์(N_∞)

3.3.2 หลักการคำนวณด้วยวิธีอย่างง่าย (Kremsor Estmation Method)

เครมเซอร์ (Kremsor) ได้เสนอแนวทางการคำนวณการสกัด เมื่อทราบค่าคงที่สมดุลการสกัดแล้ว โดยกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมดังนี้

- ค่าคงที่สมดุลการสกัดไม่ขึ้นกับปริมาณของสารตัวถูกละลายและสารตัวทำละลาย
- สารตัวทำละลายและสารตัวพาไม่ละลายเข้ากันแม้เพียงบางส่วน

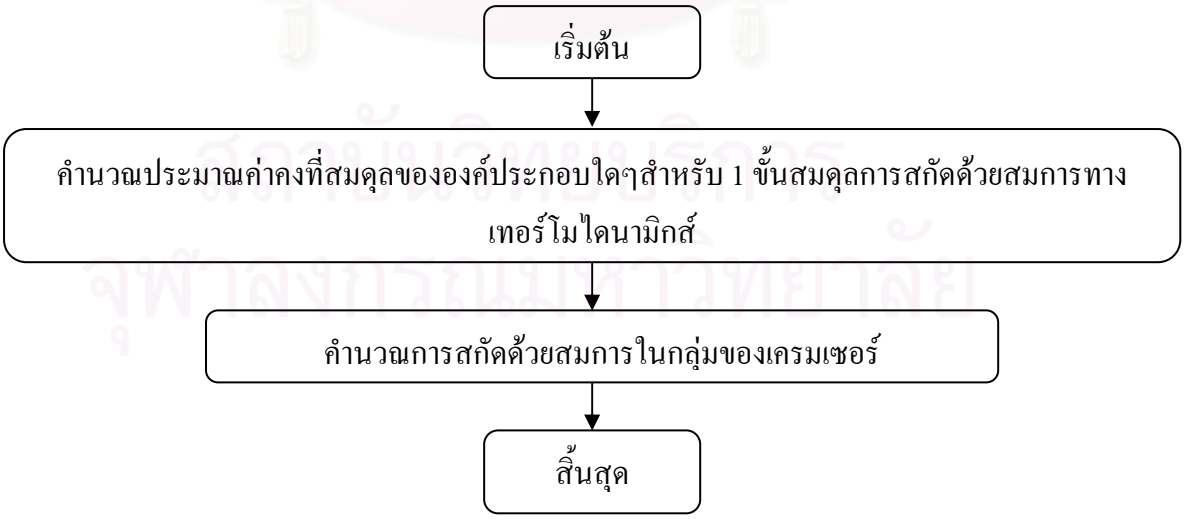
ดังนั้นสำหรับการสกัดในหอสกัดที่ไหลสวนทางกัน สัดส่วนของสารตัวถูกละลายเหลืออยู่สารตัวพาสามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์การคำนวณการสกัดด้วยวิธีของเครมเซอร์

$$Ø_i = (E_i-1)/(E_i^{N+1}-1) \quad (3.15)$$

$$E_i = K_i (S/W) \quad (3.16)$$

$$K_i = Y_i / X_i = (T,P,X_i,Y_i) \quad (3.17)$$

สารตัวถูกละลายสามารถถูกสกัดออกจากสารตัวพาได้หมดเมื่อค่าคงที่การสกัดมีค่ามากกว่า 1 และมีจำนวนขั้นสมดุลมากเพียงพอ การคำนวณแบบเครมเซอร์นั้นจะไม่พิจารณาถึงปัจจัยต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนขั้นสมดุลการสกัด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการสกัดเมื่อเปลี่ยนขั้นสมดุลแล้วความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหล และองค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงไปด้วยแต่เพื่อเป็นการคำนวณประมาณในขั้นต้นจึงไม่พิจารณาถึงตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวโดยมีวิธีการคำนวณดังรูปที่ 3.5



รูปที่3.6 แผนผังแสดงวิธีการคำนวณการสกัดด้วยสมการความสัมพันธุ์ของเครมเซอร์

3.3.3 หลักการคำนวณด้วยวิธีซับซ้อน (Rigorous Calculation Method)

เนื่องจากสารตัวทำละลายมักผสมปนเข้ากับสารตัวพาได้บางส่วนเสมอซึ่งไม่สอดคล้องกับสมมติฐานของเครมเซอร์ ดังนั้นกระบวนการสกัดจึงควรคำนวณอย่างละเอียดโดยพิจารณาอิทธิพลของการผสมกันได้บางส่วนของสารตัวทำละลายและสารตัวพา ปริมาณของสารตัวทำละลายต่อสมดุลการสกัด เป็นต้น สมการแบบจำลองกระบวนการสกัดจึงต้องประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวล(Material balance,M) สมการแสดงสมดุลเฟส(phase Equilibrium relation,E) กฎรวมเศษส่วนมวล(Sum of fraction,S) และสมการอนุรักษ์พลังงาน(Energy balance,H) สำหรับขั้นสมดุลแต่ละขั้นดังนี้

- สมการอนุรักษ์มวล (จำนวนสมการเท่ากับจำนวนองค์ประกอบสำหรับแต่ละขั้น)

$$L_{j-1}x_{i,j-1} + V_{j+1}y_{i,j+1} - L_j x_{i,j} - V_j y_{i,j} = 0 \qquad (3.18)$$

- สมการแสดงสมดุลเฟส (จำนวนสมการเท่ากับจำนวนองค์ประกอบสำหรับแต่ละขั้น)

$$y_{i,j} - K_{i,j}x_{i,j} = 0 \qquad (3.19)$$

- กฎรวมเศษส่วนมวล (จำนวน 1 สมการสำหรับแต่ละขั้นการสกัด)

$$\sum_{i=1}^{C} y_{i,j} - 1.0 = 0 \qquad (3.20)$$

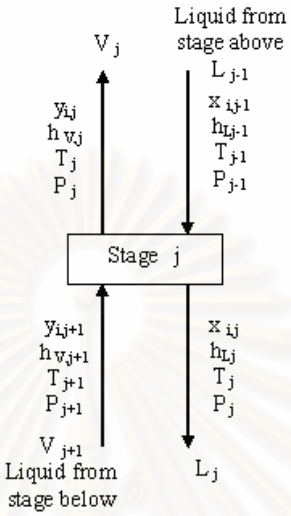
$$\sum_{i=1}^{C} x_{i,j} - 1.0 = 0 \qquad (3.21)$$

- สมการอนุรักษ์พลังงาน (จำนวน 1 สมการสำหรับแต่ละขั้นการสกัด)

$$L_{j-1}h_{L\,j-1} + V_{j+1}h_{V\,j+1} - L_j h_{Lj} - V_j h_{Vj} = 0 \qquad (3.22)$$

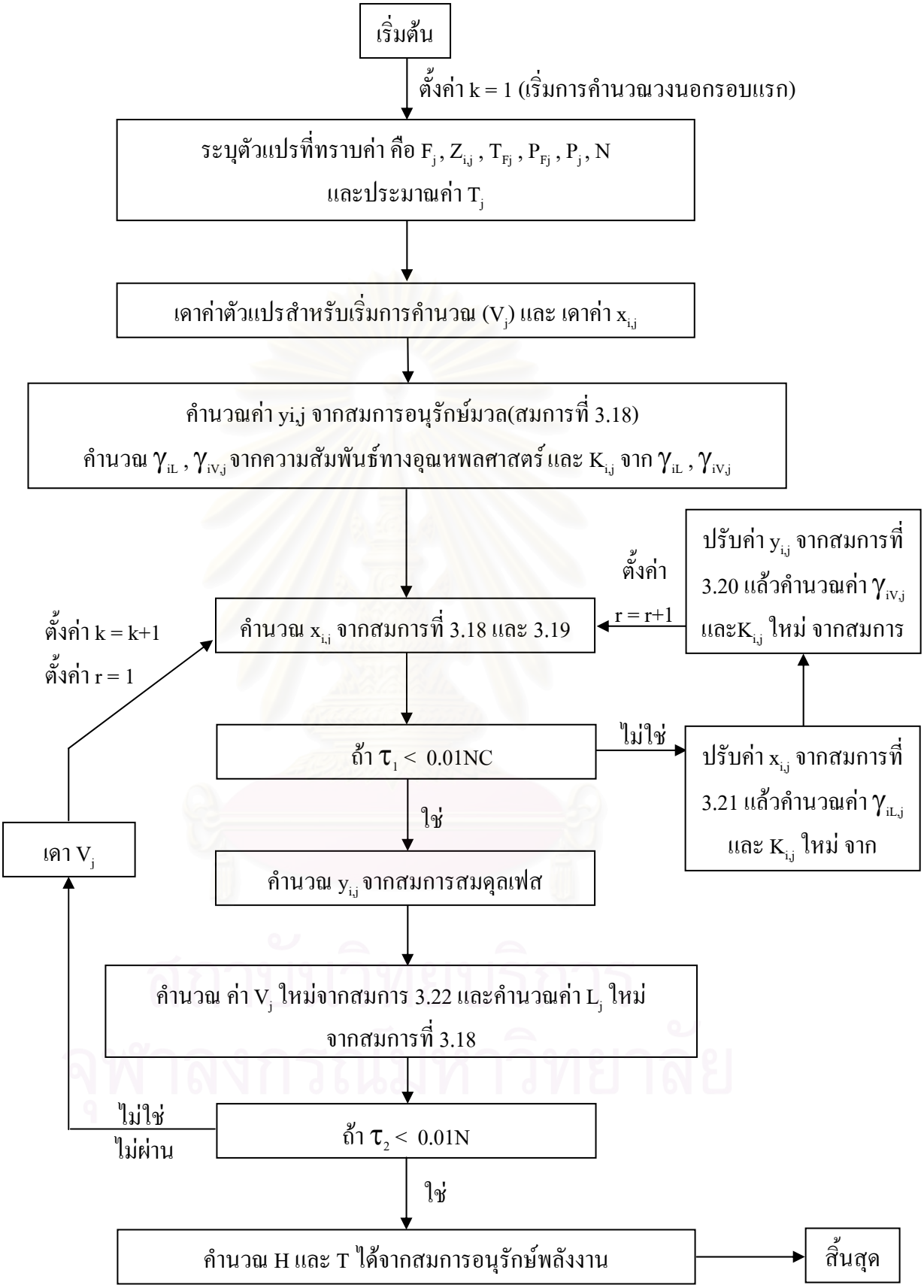
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการสกัดที่ต้องใช้จำนวนขั้นสมดุล N ขั้น ระบบสมการข้างต้นของจำนวนขั้นสมดุลทั้งหมดจะต้องคำนวณพร้อมกันทั้งหมด เพื่อให้ทราบอุณหภูมิ อัตราการไหล และสัดส่วนองค์ประกอบของสารประกอบทั้งหมด ในแต่ละขั้นสมดุล



รูปที่ 3.7 สมดุลขั้นที่ j สำหรับกระบวนการสกัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงวิธีการคำนวณการสกัดด้วยวิธีการคำนวณแบบซับซ้อน

บทที่ 4.

วิธีการจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย

การจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้ ขั้นตอนของการจำลองหน่วยสกัด ณ หอสกัด ขั้นตอนของการจำลองกระบวนการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายด้วยการกลั่น และชนิดของตัวทำละลายที่เลือกใช้สำหรับการสกัดเอทานอล แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวทำละลายอินทรีย์บริสุทธิ์ และตัวทำละลายอินทรีย์แบบผสม สำหรับสารละลายเอทานอลเริ่มต้นมีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 15 โดยมวล อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดทั้งปีของประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ. 2548

4.1 ชนิดของตัวทำละลายที่เลือกใช้

สำหรับตัวทำละลายอินทรีย์บริสุทธิ์มี 4 ชนิดดังนี้ คือ

1. กลุ่มพาราฟินส์ ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 3 -10 อะตอม ดังนี้ โพรเพน บิวเทน เพนเทน เฮกเซน เฮปเทน ออกเทน โนเนน และเดคเคน
2. กลุ่มแอลกอฮอล์ ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 5 -10 อะตอม ดังนี้ เพนทานอล เฮกซานอล เฮปทานอล ออกทานอล โนนานอล และเดคานอล
3. กลุ่มแนฟทีน ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 5 - 7 อะตอม ดังนี้ ไซโคลเพนเทน ไซโคลเฮกเซน เมทธิลไซโคลเพนเทน และเมทธิลไซโคลเฮกเซน
4. กลุ่มอะโรมาติกส์ ที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 6 – 8 อะตอม ดังนี้ เบนซีน โทลูอีน พาราไซลีน เมตาไซลีน ออโธไซลีน และเอทธิลเบนซีน

สำหรับตัวทำละลายอินทรีย์ผสมมี 3 ชนิดดังนี้ คือ

1. ก๊าซปิโตรเลียมเหลว ซึ่งมีสัดส่วนของโพรเพนในก๊าซปิโตรเลียมเหลวต่างๆกัน คือ ตั้งแต่ 0.1 - 0.9
2. รีฟอร์เมต (Reformate) ซึ่งมีสัดส่วนขององค์ประกอบของสารต่างๆในของผสม ดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของสารต่างๆในรีฟอร์เมต

องค์ประกอบ	สัดส่วนในของผสม (ร้อยละโดยมวล)
n-hexane	46.8
benzene	30.0
cyclohexane	1.9
2,2,4-Trimethyl Pentane	21.3

3. คอนเดนเสต (Condensate) ซึ่งมีสัดส่วนขององค์ประกอบของสารต่างๆในของผสมดังนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของสารต่างๆในคอนเดนเสต

องค์ประกอบ			สัดส่วนในของผสม (ร้อยละโดยมวล)
C 1	C1P	methane	0.00
C 2	C2P	ethane	0.00
C 3	C3P	propane	0.26
C 4	C4P	butane	4.73
C 5	C5P	pentane	8.44
	C5N	cyclopentane	0.60
C 6	C6P	hexane	8.41
	C6N	cyclohexane	4.30
	C6A	benzene	2.37
C 7	C7P	heptane	5.95
	C7N	methylcyclohexane	8.68
	C7A	toluene	4.34
C 8	C8P	octane	5.19
	C8N	ethylcyclohexane	2.74
	C8A	p-xylene	5.99
C 9	C9P	nonane	3.44
	C9N	n-propylcyclohexane	1.51
	C9A	n-propylbenzene	3.80
C 10	C10P	decane	2.96
	C10N	n-butylcyclohexane	0.09
	C10A	n-butylbenzene	1.74
C 11	C11P	Undecane	1.80
	C11N	methylnaphthalene	0.05
	C11A	n-pentylbenzene	0.53
olefin	olefin	ethylene	0.02
Residue(>200°c)	RES	dodecane	22.04

4.2 การออกแบบหน่วยสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย ณ หอสกัด

การออกแบบกระบวนการสกัด ณ หอสกัดชนิดหลายขั้นสมดุลการสกัด มีสิ่งที่ควรพิจารณาดังนี้

4.2.1 การพิจารณาจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่เหมาะสม

เนื่องจากการสกัดด้วยหอสกัดชนิดหลายขั้นสมดุลการสกัด ปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดจำนวนขั้นสมดุลการสกัดให้เหมาะสม มีดังนี้ ปริมาณของเอทานอลที่ต้องการสกัดคิดเป็นร้อยละของการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลเริ่มต้น และค่าคงที่การสกัด ตามความสัมพันธ์ของเครมเซอร์ ซึ่งเกณฑ์ในการเลือกใช้จำนวนขั้นสมดุลได้กำหนดไว้ดังนี้ คือ ณ ร้อย

ละการสกัดที่ต้องการสกัดใดๆนั้น เมื่อเพิ่มจำนวนขั้นสมดุลการสกัดแล้วทำให้ค่าคงที่การสกัดมีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่เกินร้อยละ 1 ของค่าคงที่สมดุลการสกัดที่จำนวนขั้นสมดุลอนันต์ (N_∞)

4.2.2 การเลือกใช้สมการทางอุณหพลศาสตร์ให้เหมาะสมสำหรับการสกัด

เนื่องจากสมการทางอุณหพลศาสตร์มีให้เลือกใช้จำนวนมาก แต่เพื่อความถูกต้องในการนำสมการมาใช้คำนวณสำหรับระบบสมดุลของเหลว – ของเหลว จึงจำเป็นต้องตรวจสอบสมการโดยการนำสมการทางอุณหพลศาสตร์ที่เลือกใช้มาคำนวณเปรียบเทียบผลกับรายงานผลการทดลองที่ได้มีผู้เคยทำการศึกษาไว้

4.2.3 การพิจารณาปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องใช้สำหรับการสกัด

การพิจารณาถึงปริมาณของตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับชนิดของตัวทำละลายต่างๆ แบ่งเป็น 2 ขั้น ดังนี้

- ขั้นแรกเป็นการคำนวณประมาณปริมาณการใช้ตัวทำละลายขั้นต้นตามสมการความสัมพันธ์ของเครมเซอร์ระหว่าง ค่าคงที่การสกัด และค่าคงที่สมดุลของเหลว-ของเหลวของเอทานอลซึ่งได้จากการคำนวณด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์ ด้วยการสกัดแบบจำนวนขั้นสมดุลการสกัด 1 ขั้น ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดันมากกว่าความดัน ณ จุดเดือดของสาร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของปริมาณตัวทำละลายต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้นเพื่อประโยชน์ในการกำหนดปริมาณการใช้ตัวทำละลายในขั้นถัดไป รวมถึงการประยุกต์เครมเซอร์ในการคำนวณผลสำหรับการจำลองการสกัด

- ขั้นที่สองคือการปรับแก้ค่าปริมาณการใช้ตัวทำละลายด้วยวิธีการคำนวณแบบซับซ้อนเนื่องจากการประมาณปริมาณการใช้ตัวทำละลายตามความสัมพันธ์ของเครมเซอร์นั้นมีสมมติฐานแตกต่างจากการคำนวณแบบซับซ้อนซึ่งมีการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดอย่างละเอียดมากกว่า ซึ่งเหมาะสำหรับการจำลองการสกัดแบบจำนวนขั้นสมดุลการสกัดมากกว่า 1 ขั้น โดยพิจารณาเป็นสัดส่วนของปริมาณตัวทำละลายที่ต้องใช้ต่อปริมาณของสารละลายเริ่มต้น

- เปรียบเทียบผลการคำนวณประมาณเบื้องต้นด้วยการประยุกต์ใช้เครมเซอร์ (kremsor)ในการคำนวณสำหรับตัวทำละลายที่หายไปและน้ำที่ปนเข้าไปในตัวทำละลายกับการคำนวณแบบซับซ้อน(Rigorous)

4.3 การจำลองการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายต่างๆ ณ หอสกัด

หลังจากทราบถึงจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่เหมาะสมสำหรับหอสกัดที่เลือกใช้ สมการทางอุณหพลศาสตร์ และปริมาณตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับชนิดของตัวทำละลาย จึงได้ทำการจำลองกระบวนการสกัด โดยผลการคำนวณการสกัดที่สนใจทำการศึกษามีดังนี้

1. ปริมาณของเอทานอลที่สามารถสกัดได้พิจารณาเป็นร้อยละของเอทานอลที่สกัดได้จากเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น

2. ปริมาณของน้ำที่ติดมากับตัวทำละลายพิจารณาเป็นร้อยละของน้ำในสารสกัด

3. ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำจากการสกัดพิจารณาเป็นสัดส่วนของปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้น

4. ความเข้มข้นของเอทานอลในสารสกัด และประเมินความบริสุทธิ์ของเอทานอลหลังแยกตัวทำละลายออกจนหมดเพื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการกลั่นแยก

4.4 การจำลองหน่วยการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย

เนื่องจากเอทานอลที่ได้ในสารสกัดมีความเข้มข้นไม่ได้ตามที่ต้องการ จึงต้องเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลด้วยการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

4.4.1 การพิจารณาความเป็นไปได้การกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย

เนื่องจากเอทานอลที่สกัดได้อยู่ในสารสกัดซึ่งประกอบด้วยตัวทำละลายและน้ำที่อาจปนมาได้บางส่วนดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการกลั่นแยกเพราะว่าในระบบการกลั่นอาจเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลให้ได้ตามต้องการ จึงได้คำนวณการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างสารต่างๆในระบบแล้วทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับผลการทดลองที่รายงานไว้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องสำหรับสมการทางอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณระบบสมดุลไอ-ของเหลว

4.4.2 การคำนวณการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย ด้วยหอกลั่น

ขั้นตอนแรกในการคำนวณออกแบบหอกลั่นสิ่งที่ควรพิจารณาก็คือ ความดันของหอกลั่นที่ใช้โดยมีข้อกำหนดดังนี้ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ออกทางยอดหอควรที่จะมีค่าสูงกว่า 32 องศาเซลเซียสเพราะว่าสารที่ใช้ในการหล่อเย็น ณ ตัวควบแน่นบนยอดหอกลั่น โดยปกติในประเทศไทยจะมีอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส [32] ดังนั้นความดันของหอกลั่นจึงควรกำหนดให้เพียงพอเพื่อควบคุมอุณหภูมิสารผลิตภัณฑ์ที่จะออกทางยอดหอกลั่น

สำหรับการคำนวณการกลั่นแยกแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือ การคำนวณการกลั่นแยกเบื้องต้นด้วยวิธีของFUG (Fenske-Underwood-Gilliland) ซึ่งขั้นตอนแรกต้อง คำนวณหาความดันยอดหอที่เหมาะสม คำนวณจำนวนขั้นสมดุลทางทฤษฎี(Minimum Theoretical Stages),N_{min} ด้วยสมการของ Fenske คำนวณค่าอัตราส่วนสารป้อนกลับน้อยที่สุด(Minimum Reflux Ratio),R_{min} ด้วยสมการของUnderwood และคำนวณค่าจำนวนขั้นสมดุลจริง(Actual Theoretical Stages),N_{actual} ด้วยสมการของ Gilliland เพื่อกำหนดค่าอัตราส่วนสารป้อนกลับที่ใช้จริง (Actual Reflux),R_{actual} ซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็น 1.5 เท่าของ R_{min} หลังจากนั้นจึงคำนวณตำแหน่งของสารป้อนด้วยสมการของ Kirkbride หลังจากนั้นจึงคำนวณพลังงานที่ใช้ในหอกลั่นด้วยสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Balance Equation)

และนำค่าที่ได้จากการคำนวณการกลั่นเบื้องต้นไปใช้ในการคำนวณการกลั่นแยกด้วยวิธีการแบบซับซ้อน(Rigorous) ซึ่งอาจต้องมีการปรับแก้ค่าเพื่อให้ผลการคำนวณถูกต้อง โดยแบ่งผลการคำนวณการกลั่นไว้ดังนี้

1. ความบริสุทธิ์ของเอทานอลหลังผ่านกระบวนการกลั่นแยก

2. ปริมาณของเอทานอลที่สามารถกลั่นแยกออกจากตัวทำละลายพิจารณาเป็นร้อยละของการกลั่นแยกเอทานอลออกจากเอทานอลในสารสกัด

3. ความบริสุทธิ์ของตัวทำละลายย้อนกลับเนื่องจากการออกแบบกระบวนการพิจารณาให้มีการนำตัวทำละลายกลับไปใช้

4. องค์ประกอบของหอกลั่นที่ใช้แยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย เช่น จำนวนขั้นสมดุลการกลั่น อัตราส่วนสารป้อนกลับ ความดันของหอกลั่น เป็นต้น

5. ปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องชดเชยก่อนนำกลับเข้าสู่กระบวนการสกัด

4.5 การพิจารณาการนำเอทานอลที่เหลือจากการสกัดกลับเข้าสู่กระบวนการสกัด

เนื่องจากการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลเริ่มต้นเมื่อร้อยละการสกัดเอทานอลมีค่าต่ำปริมาณของเอทานอลที่เหลืออยู่ในสารละลายยังมีความเข้มข้นสูงซึ่งอาจมีการพิจารณาให้มีการนำสารละลายเอทานอลไปเพิ่มความเข้มข้นให้เท่ากับความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเริ่มต้นก่อนผสมเข้าด้วยกันเข้าสู่หอสกัด

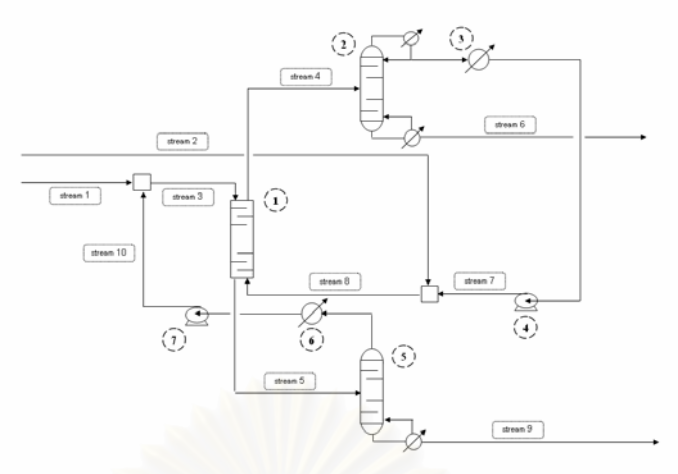
4.6 การเลือกใช้ชนิดของกระบวนการสกัดเอทานอลออกจากตัวทำละลาย

เป็นการนำหน่วยการสกัด หน่วยการกลั่น หน่วยเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล(สำหรับกระบวนการสกัดที่มีปริมาณของเอทานอลเหลือในสารละลายค่อนข้างมาก) อุปกรณ์สำหรับเพิ่มลดความดันและอุณหภูมิ มาต่อเชื่อมกันเพื่อพิจารณาถึงชนิดและจำนวนของอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับกระบวนการแบบต่อเนื่อง ซึ่งต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆในการออกแบบ คือ จุดเดือดของตัวทำละลายและการนำเอทานอลกลับสู่การสกัดเป็นต้น ซึ่งสำหรับการสกัดเอทานอลร้อยละ 80 และ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลที่เหลือจากกระบวนการสกัดมีค่าน้อยจึงพิจารณาให้ไม่มีการนำเอทานอลที่เหลือกลับเข้าสู่หน่วยของการสกัด ส่วนในกรณีของการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้นพบว่าปริมาณของเอทานอลที่เหลือในสารละลายสามารถนำกลับมาเพิ่มความเข้มข้นก่อนกลับเข้าสู่หน่วยการสกัดต่อไปจึงได้ทำการออกแบบกระบวนการโดยแบ่งเป็น 6 ชนิด ดังนี้

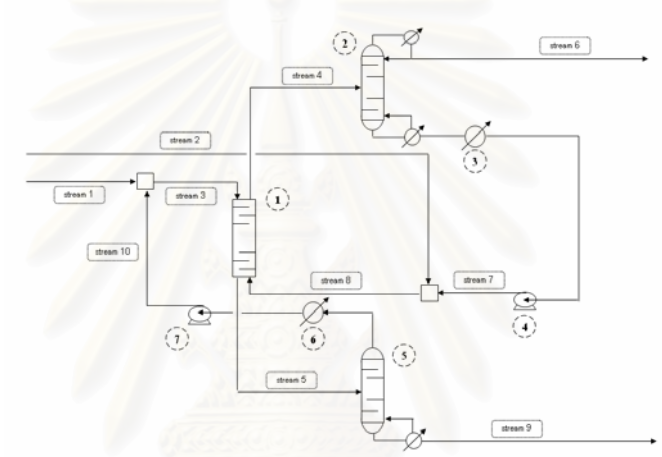
1. กระบวนการ ก.1 คือ นำเอทานอลกลับ และตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดต่ำกว่าเอทานอล
2. กระบวนการ ก.2 คือ นำเอทานอลกลับ และตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล
3. กระบวนการ ก.3 คือ นำเอทานอลกลับ และตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดต่ำกว่าและสูงกว่าเอทานอล
4. กระบวนการ ข.1 คือ ไม่นำเอทานอลกลับ และตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดต่ำกว่าเอทานอล
5. กระบวนการ ข.2 คือ ไม่นำเอทานอลกลับ และตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล
6. กระบวนการ ข.3 คือ ไม่นำเอทานอลกลับ และตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดต่ำกว่าและสูงกว่าเอทานอล

โดยแต่ละกระบวนการมีการใช้จำนวนและชนิดของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของกระบวนการที่เลือกใช้ซึ่งได้ทำการออกแบบแผนผังกระบวนการไว้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

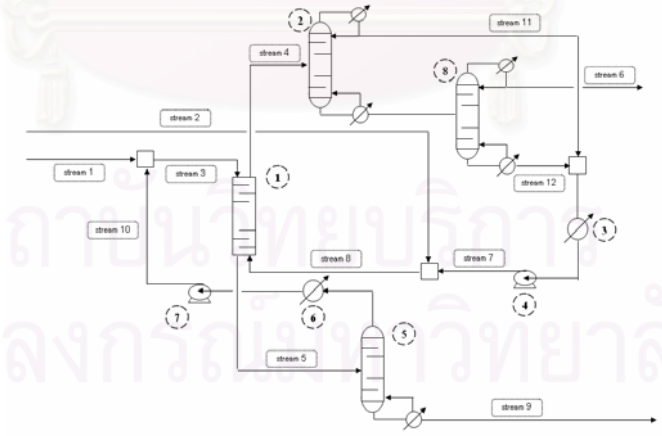
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(กระบวนการชนิด ก.1)



(กระบวนการชนิด ก.2)



(กระบวนการชนิด ก.3)

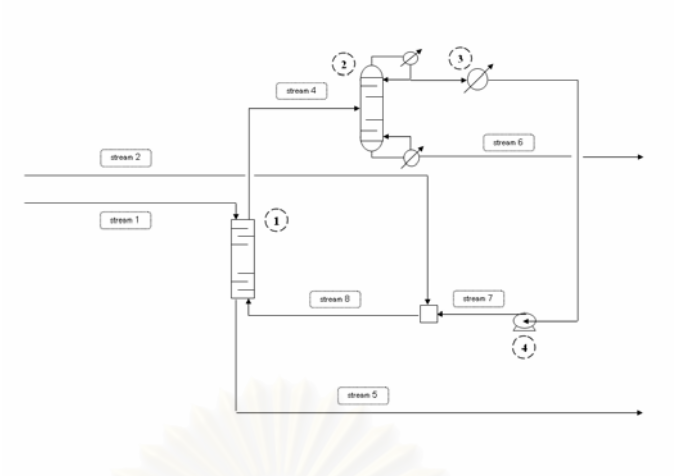
รูปที่ 4.1 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย แบบนำเอทานอลกลับสู่กระบวนการสกัด

ก.1 คือ ตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดต่ำกว่าเอทานอล

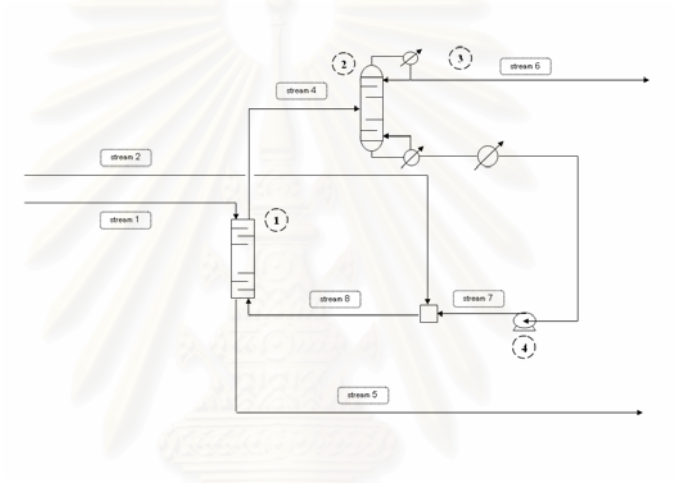
ก.2 คือ ตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล

ก.3 คือ ตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดต่ำกว่าและสูงกว่าเอทานอล

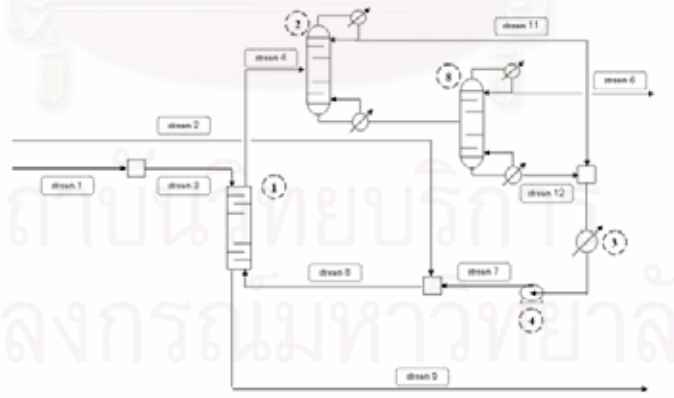
กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายในรูปที่ 4.1 ข้างต้นนั้นเป็นกระบวนการที่มีการออกแบบเพื่อให้มีการรองรับสำหรับหน่วยเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้เท่ากับความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้นก่อนจะนำเอทานอลที่เพิ่มความเข้มข้นแล้วกลับไปผสมกลับสารละลายเอทานอลเริ่มต้นก่อนกลับเข้าสู่กระบวนการสกัดอีกครั้งหนึ่ง เหตุผลที่ต้องมีการพิจารณานำเอทานอลที่เหลือจากการสกัดกลับเข้าสู่กระบวนการอีกครั้งนั้นก็คือการสกัดสามารถสกัดเอทานอลไปได้ปริมาณน้อย จึงทำให้เอทานอลที่คงเหลืออยู่ในเฟสของน้ำมีปริมาณสูง โดยหน่วยเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลจะอาศัยหอสตริปเปอร์ จำนวนขั้นสมดุล 5 ขั้น ในการเพิ่มความความเข้มข้นให้กับเอทานอลโดยจะทำการเปลี่ยนแปลงพลังงานเพื่อให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการหลังจากทำการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอล ณ หอสตริปเปอร์แล้วจำเป็นต้องมีการควบแน่นนึ่งจากเอทานอลที่เพิ่มความเข้มข้นแล้วอยู่ในสถานะไอ โดยต้องมีการดึงพลังงานออกจากหอควบแน่นในการควบแน่นสารละลายเอทานอลแล้วจึงทำการปรับความดันของสารละลายเอทานอลอีกครั้งหนึ่ง สำหรับกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายชนิด ก.1 นั้นตัวทำละลายผสมที่ใช้ในกระบวนการสกัดมีจุดเดือดต่ำกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ดังนั้นเอทานอลที่ได้จากการกลั่นจึงออกทางส่วนล่างของหอกลั่นสำหรับตัวทำละลายจะออกทางยอดหอกลั่น ซึ่งต้องมีการปรับอุณหภูมิและความดันของตัวทำละลายก่อนจะนำกลับไปสกัดใหม่อีกครั้งหนึ่ง สำหรับกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายชนิด ก.2 นั้นตัวทำละลายผสมที่ใช้ในกระบวนการสกัดมีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ดังนั้นเอทานอลที่ได้จากการกลั่นจึงออกทางยอดหอกลั่นส่วนตัวทำละลายจะออกทางส่วนล่างของหอกลั่นซึ่งต้องนำไปปรับความดันและอุณหภูมิก่อนกลับสู่การสกัดอีกครั้งหนึ่ง สำหรับกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายชนิด ก.3 นั้นตัวทำละลายผสมที่ใช้ในกระบวนการสกัดมีจุดเดือดสูงกว่าและต่ำกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ดังนั้นในการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายจึงต้องแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะแยกตัวทำละลายที่มีจุดเดือดต่ำกว่าเอทานอลออกไปก่อนด้วยการกลั่น ณ หอกลั่นที่ 1. ขั้นตอนต่อไปจึงแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายที่มีจุดเดือดสูงกว่าด้วยการกลั่น ณ หอกลั่นที่ 2. ซึ่งเอทานอลจะออกทางยอดหอและตัวทำละลายจะออกทางส่วนล่างของหอกลั่นซึ่งตัวทำละลายทั้ง 2 ส่วนจะนำมาผสมกันก่อนจะนำไปปรับอุณหภูมิและความดันก่อนเข้าสู่กระบวนการสกัดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจำนวนชนิดและอุปกรณ์ของกระบวนการทั้งสามก็จะแตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน



(กระบวนการชนิด ข.1)



(กระบวนการชนิด ข.2)



(กระบวนการชนิด ข.3)

รูปที่ 4.2 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย แบบไม่นำเอทานอลกลับสู่กระบวนการสกัด

ข.1 คือ ตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดต่ำกว่าเอทานอล

ข.2 คือ ตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล

ข.3 คือ ตัวทำละลายผสมที่ใช้มีจุดเดือดต่ำกว่าและสูงกว่าเอทานอล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายในรูปที่ 4.2 นั้นจะเป็นกระบวนการสำหรับการสกัดเอทานอลที่สามารถสกัดเอทานอลได้ในปริมาณมากทำให้เอทานอลที่เหลือในเฟสของน้ำนั้นมีปริมาณน้อยจึงไม่พิจารณาให้มีการนำเอทานอลกลับสู่กระบวนการสกัดอีกครั้งสำหรับกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายชนิด ข.1 นั้นตัวทำละลายผสมที่ใช้ในกระบวนการสกัดมีจุดเดือดต่ำกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ดังนั้นเอทานอลที่ได้จากการกลั่นจึงออกทางส่วนล่างของหอกลั่นสำหรับตัวทำละลายจะออกทางยอดหอกลั่น ซึ่งต้องมีการปรับอุณหภูมิและความดันของตัวทำละลายก่อนจะนำกลับไปสกัดใหม่อีกครั้งหนึ่ง สำหรับกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายชนิด ข.2 นั้นตัวทำละลายผสมที่ใช้ในกระบวนการสกัดมีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ดังนั้นเอทานอลที่ได้จากการกลั่นจึงออกทางยอดหอกลั่นส่วนตัวทำละลายจะออกทางส่วนล่างของหอกลั่นซึ่งต้องนำไปปรับความดันและอุณหภูมิก่อนกลับสู่การสกัดอีกครั้งหนึ่ง สำหรับกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายชนิด ข.3 นั้นตัวทำละลายผสมที่ใช้ในกระบวนการสกัดมีจุดเดือดสูงกว่าและต่ำกว่าเอทานอลบริสุทธิ์ดังนั้นในการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายจึงต้องแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะแยกตัวทำละลายที่มีจุดเดือดต่ำกว่าเอทานอลออกไปก่อนด้วยการกลั่น ณ หอกลั่นที่ 1. ขั้นตอนต่อไปจึงแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายที่มีจุดเดือดสูงกว่าด้วยการกลั่น ณ หอกลั่นที่ 2. ซึ่งเอทานอลจะออกทางยอดหอและตัวทำละลายจะออกทางส่วนล่างของหอกลั่นซึ่งตัวทำละลายทั้ง 2 ส่วนจะนำมาผสมกันก่อนจะนำไปปรับอุณหภูมิและความดันก่อนเข้าสู่กระบวนการสกัดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจำนวนชนิดและอุปกรณ์ของกระบวนการทั้งสามก็จะแตกต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน

โดยแต่ละชนิดของกระบวนการนั้นมีจำนวนชนิดและอุปกรณ์ที่แตกต่างกันเพื่อความสะดวกในการพิจารณาจึงได้ทำการสรุปกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับชนิดของตัวทำละลายที่ใช้และร้อยละการสกัดต่างๆไว้ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนและชนิดของอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในกระบวนการแต่ละแบบ

ชนิดกระบวนการ / อุปกรณ์ที่ต้องใช้	ก.1	ก.2	ก.3	ข.1	ข.2	ข.3
Extractor	1	1	1	1	1	1
Distillation Column	1	1	2	1	1	2
Stripping Column	1	1	1	-	-	-
Condenser	1	1	1	-	-	-
Cooler	1	1	1	1	1	1
pump	2	2	2	1	1	1
Mixer	2	2	3	1	1	2

กระบวนการแยกเอทานอลซึ่งมีด้วยกัน 6 ชนิดนั้นประกอบด้วยชนิดและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการต่างกัน โดยพบว่ามี 2 คู่ที่จำนวนและชนิดอุปกรณ์เท่ากัน คือ ชนิด ก.1 กับ ชนิด ก.2 และ ชนิด ข.1 กับ ชนิด ข.2 แต่สิ่งที่ต่างกันของทั้งคู่คือทิศทางการไหลตรงหอกลั่นแยกเอทานอล เพราะตัวทำละลายที่ใช้นั้นมีทั้งที่จุดเดือดต่ำกว่าและสูงกว่าเอทานอล และเมื่อเปรียบเทียบชนิด ก.1 กับ ข.1 และ ชนิด ก.2 กับ ข.2 นั้นจะต่างกันตรงที่ชนิด ก.1 และ ชนิด ก.2 นั้นมีส่วนของหอสตริปเปอร์ สำหรับ ชนิด ก.3 และ ชนิด ข.3 นั้นเป็นกรณีของการใช้ตัวทำละลายผสม ชนิดที่มีช่วงของจุดเดือดของผสมตกคร่อมจุดเดือดของเอทานอลโดยทั้งคู่นั้นมีส่วนที่ต่างกันคือชนิด ก.3 นั้นมีส่วนของหน่วยเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลกลับไปใช้ในการสกัดอีกครั้งทำให้จำนวนอุปกรณ์มากกกว่าชนิด ข.3 คือมี หอสตริปเปอร์เพิ่ม หอควบแน่น ปั๊ม และมิกเซอร์เพิ่มมาอย่างละ 1ตัว

4.7 การประเมินพลังงานสำหรับกระบวนการในการสกัดเอทานอลทั้งระบบ

เนื่องจากกระบวนการในการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลเริ่มต้นประกอบด้วยชนิดและอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งจำเป็นต้องมีการใช้หรือการดึงพลังงานออกจากระบบ ดังนั้นในการจำลองกระบวนการสกัดจึงแบ่งพลังงานออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานที่ต้องให้กับระบบ เช่น พลังงานความร้อนที่ได้จากไอน้ำในการแลกเปลี่ยนความร้อน พลังงานไฟฟ้าที่ให้กับปั๊มหรือคอมเพรสเซอร์ และ พลังงานที่ต้องดึงออกจากระบบ โดยพิจารณาเป็นพลังงานรวมและพิจารณาแยกทีละอุปกรณ์เช่น หอกลั่น หอสตริปเปอร์ หอเพิ่มลดความดันและอุณหภูมิ หอควบแน่น เป็นต้น

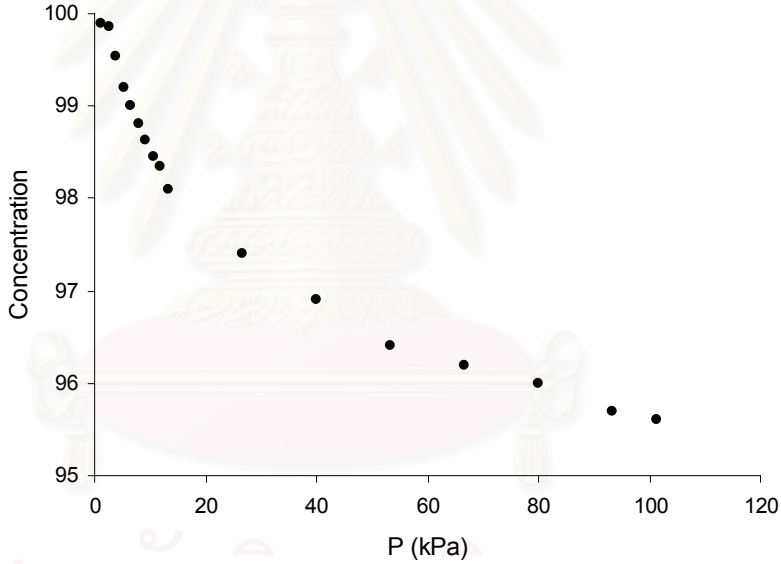
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5.
ผลการจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลาย

เนื่องจากกระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลได้มีผู้ทำการศึกษาไว้ด้วยกันหลายวิธี ที่สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลให้สูงกว่าร้อยละ 99 โดยมวล ดังนั้นจึงได้คำนวณกระบวนการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลด้วยวิธีการกลั่น ณ ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ การกลั่นแบบสับเปลี่ยนความดันและการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ไว้อย่างสังเขป ดังนี้

- การกลั่น ณ ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

จากการคำนวณผลของความดันระบบที่ลดลงต่อความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.1

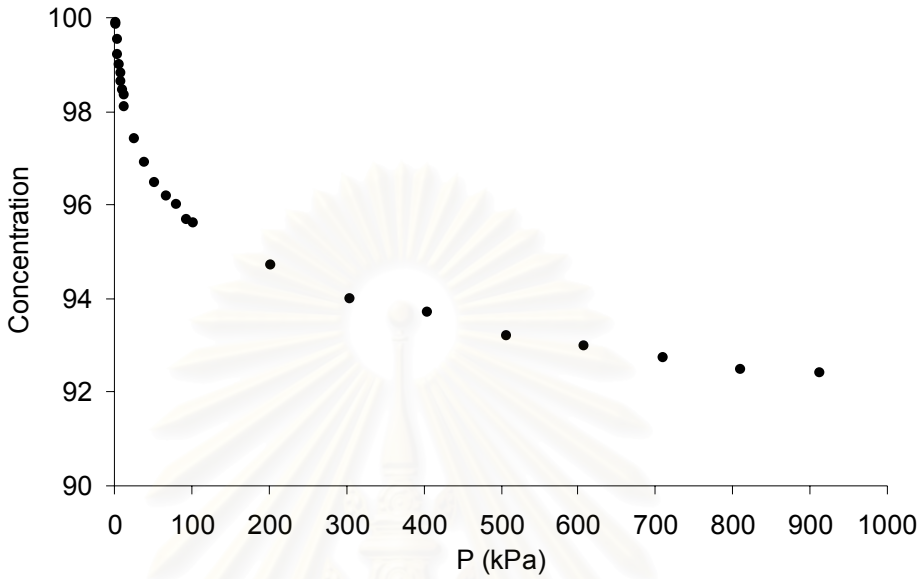


รูปที่ 5.1 ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ (ร้อยละโดยมวล) ณ ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

ดังนั้นจึงได้ทำการคำนวณการกลั่น ณ ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศซึ่งแผนผังกระบวนการแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยความดันของหอกลั่นที่เลือกใช้คือ 9 กิโลปาสคาลเท่ากับความดันที่มีผู้เคยศึกษาไว้ โดยเอทานอลที่กลั่นแยกได้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โดยมวลเท่ากัน พลังงานที่ใช้สำหรับการกลั่นเท่ากับ 7.16 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ซึ่งเมื่อเปรียบพลังงานที่คำนวณได้กับที่มีผู้ได้รายงานไว้แตกต่างกันร้อยละ 2.29 จำนวนขั้นสมดุลการกลั่นที่ใช้เท่ากับ 12 ขั้น

- การกลั่นแบบความดันต่างระดับ

จากการคำนวณผลของความดันระบบที่เพิ่มขึ้นต่อความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ (ร้อยละโดยมวล) ณ ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ

การกลั่นแบบความดันต่างระดับ สำหรับความดันที่เลือกใช้สำหรับหอกลั่นแรกคือ ความดันบรรยากาศปกติ โดยจะทำการกลั่นเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์เข้าใกล้จุดอะซิโอโทรปที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 94 โดยมวลหลังจากนั้นจะเพิ่มความดันแล้วทำการกลั่น ณ ความดันประมาณ 5 เท่าของความดันบรรยากาศโดยเอทานอลที่กลั่นแยกได้มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยมวล พลังงานที่ใช้ในระบบทั้งหมดเท่ากับ 9.35 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ จำนวนขั้นสมดุลการกลั่นของหอกลั่นที่หนึ่งเท่ากับ 10 ขั้น จำนวนขั้นสมดุลการกลั่นของหอกลั่นที่สองเท่ากับ 117 ขั้น จำนวนขั้นสมดุลการกลั่นที่ใช้ในหอที่สองเมื่อความดันที่ใช้สูงขึ้นมีค่ามากกว่าจำนวนขั้นสมดุลการกลั่นที่ใช้ในหอกลั่นที่ 1

- การสกัดเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้สำหรับการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลเริ่มต้นต้องคงสภาพเป็นของเหลว ความดันและอุณหภูมิที่เลือกใช้สำหรับกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์คือ ความดัน 98.7 บรรยากาศ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งสาเหตุที่เลือกใช้ก็คือจะกำหนดอุณหภูมิและความดันให้เท่ากับที่ได้มีผู้เคยทำการศึกษาไว้ และสัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้นเท่ากับ 1.12 หลังจากการสกัดจะนำสารสกัดไปลดความดันเพื่อแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากเอทานอลโดยลดความดันเหลือประมาณ

43.4 บรรยากาศ เอทานอลที่ได้หลังแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจะมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยมวล สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์จะนำไปเพิ่มความดันเพื่อให้กลายเป็นของเหลวแล้วนำกลับไปเข้าสู่กระบวนการสกัดอีกครั้ง สำหรับพลังงานที่ใช้สำหรับกระบวนการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งกระบวนการ เท่ากับ 0.212 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ โดยพลังงานที่ใช้เป็นส่วนใหญ่คือ พลังงานที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิและความดันเพื่อเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซให้กลายเป็นของเหลวเพื่อนำกลับเข้าสู่กระบวนการสกัดอีกครั้งหนึ่ง

เปรียบเทียบการคำนวณการกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลเทียบกับข้อมูลที่มีผู้รายงานไว้ โดยข้อมูลที่ได้เคยมีผู้รายงานไว้มีดังนี้ การกลั่น ณ ความดันบรรยากาศเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลจากสารละลายเอทานอลเริ่มต้นความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยมวล จนได้เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยมวล พลังงานที่ใช้ในการกลั่นแยกเท่ากับ13.56 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ ดังนั้นจึงทำการคำนวณเปรียบเทียบด้วยสมการของ UNIFAC เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการกลั่นแยกพบว่าการคำนวณด้วยการกลั่นด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์ของ UNIFAC ใช้พลังงานในการกลั่นเท่ากับ 12.27 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมเอทานอลที่ผลิตได้ จำนวนขั้นสมดุลการกลั่นเท่ากับ 11 ขั้น ตำแหน่งของสารป้อนสู่หอกลั่นคือขั้นที่ 8 อัตราส่วนสารป้อนกลับเท่ากับ 7

การจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายเป็นการคำนวณออกแบบกระบวนการผลิตเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นซึ่งกระบวนการผลิตนั้นเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง ขั้นแรกจะนำของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำมาสกัดเอาเอทานอลออกด้วยตัวทำละลาย ด้วยเหตุผลที่ว่าของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำนั้นไม่สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ด้วยการกลั่น ณ ความดันบรรยากาศ ให้สูงเกินกว่าจุดอะซิโอโทรปของเอทานอลกับน้ำปกติ ได้ตามที่กล่าวไปแล้วในบทก่อนๆ ตัวทำละลายที่ใช้นั้นแบ่งออกเป็นตัวทำลายบริสุทธิ์ และตัวทำละลายผสม การสกัดนั้นจะสกัดด้วยหอสกัดที่มีจำนวนขั้นสมดุลการสกัดมากกว่า 1 ขั้น โดยทิศทางการไหลเป็นการไหลแบบสวนทางกัน หลังผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆแล้ว ขั้นที่สองจะเป็นการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายด้วยหอกลั่น ในกรณีที่การสกัดนั้นสามารถสกัดเอาเอทานอลออกไปได้มาก เอทานอลที่เหลือในเฟสของน้ำอาจจะไม่นำกลับไปใช้อีก แต่ถ้าการสกัดเอทานอลนั้นเหลือเอทานอลอยู่มากจะพิจารณาให้มีการนำเอทานอลกลับไปใช้ใหม่อีกครั้งซึ่งในส่วนนี้ต้องมีการเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอล จึงจำเป็นต้องอาศัยหอสตริปเปอร์ ขั้นที่สามเป็นการควบคุมสภาวะของกระบวนการ ทั้งนี้เนื่องจากในการกลั่นนั้นได้กำหนดให้มีความดันเพิ่มในหอกลั่นซึ่งความดันล่างหอกลั่นจะมีค่ามากกว่าความดันยอดหอกลั่นเท่ากับ 0.1 บรรยากาศ จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับลดความดัน อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ออกจากหอกลั่นอาจจะต้องมีการนำกลับไปใช้อีกครั้งจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับเพิ่มลดอุณหภูมิ ขั้นสุดท้ายเป็นการจำลองกระบวนการทั้งหมด

ซึ่งจะมีการนำเอาอุปกรณ์ทั้งหมดมาต่อเชื่อมกันเพื่อให้กระบวนการผลิตเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง จากผลการจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายได้ผลดังสรุปซึ่งจะแบ่งพิจารณาเป็นส่วนๆเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจของผู้อ่านเป็นส่วนๆดังต่อไปนี้

การคำนวณออกแบบการสกัดนั้นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการสกัด ตัวแปรที่ส่งผลต่อการสกัดนั้นประกอบไปด้วย

- ชนิดของตัวทำละลาย เมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายผลของการสกัดจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากตัวทำละลายแต่ละชนิดจะให้ค่าคงที่สมดุลของแต่ละองค์ประกอบทั้งค่าคงที่สมดุลของเอทานอล ค่าคงที่สมดุลของน้ำและค่าคงที่สมดุลของตัวทำละลายเอง ต่างกันไป ซึ่งชนิดของตัวทำละลายได้ถูกกำหนดไว้ในบทก่อนหน้าแล้ว

- ปริมาณของตัวทำละลาย การเลือกใช้ปริมาณของตัวทำละลายให้เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากถ้าเลือกใช้ปริมาณของตัวทำละลายสูงเกินไปอาจทำให้เกิดความสิ้นเปลืองโดยใช้เหตุทั้งในเรื่องของค่าสารเคมี พลังงานที่ต้องใช้ และขนาดของอุปกรณ์ หรือถ้าเลือกใช้ปริมาณของตัวทำละลายน้อยเกินไปก็จะทำให้การสกัดไม่ได้ผลตามที่ต้องการ ซึ่งผลการคำนวณการใช้ปริมาณตัวทำละลายได้สรุปไว้แล้วในหัวข้อต่อไป

- สภาวะของการสกัด จะส่งผลต่อคุณสมบัติของสารเนื่องจากสภาวะเปลี่ยนแปลงไปคุณสมบัติของสารก็เปลี่ยนตามไปด้วย เช่น อุณหภูมิจะส่งผลต่อค่าคงที่สมดุลของสาร เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มลด การละลายของสารต่างๆในระบบจะเปลี่ยนแปลงทำให้สมดุลเปลี่ยนไปด้วย โดยในการจำลองการสกัดนั้นได้กำหนดสภาวะของการสกัดไว้โดยเลือกใช้ อุณหภูมิสำหรับการสกัดเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดทั้งปีของประเทศไทย และความดันที่ใช้ต้องมากพอที่จะทำให้สารทั้งหมดคงสภาพเป็นของเหลว ซึ่งจะสรุปสภาวะที่ต้องใช้สำหรับตัวทำละลายชนิดต่างๆไว้ในหัวข้อต่อไป

- จำนวนขั้นสมดุลของการสกัด จะส่งผลต่อร้อยละการสกัดของเอทานอลและปริมาณตัวทำละลายที่ต้องใช้ตามความสัมพันธ์ของเครมเซอร์ที่ได้กล่าวไปแล้ว

5.1 ผลการพิจารณาจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่เลือกใช้

ค่าคงที่การสกัดเอทานอลมีความสำคัญต่อการพิจารณาการสกัดเนื่องจากถ้าค่าคงที่การสกัดเอทานอลมีค่ามากนั้นจะส่งผลทำให้ต้องใช้ปริมาณตัวทำละลายมากขึ้นตามไปด้วยเพื่อที่จะได้ร้อยละการสกัดเอทานอลตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงได้กำหนดร้อยละการสกัดเอทานอลที่สนใจจะศึกษาเพื่อจะได้ค่าคงที่การสกัดน้อยที่สุดทั้งหมด 3 ค่า และประเมินจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ ดังแสดงในตารางที่5.1

ตารางที่ 5.1 จำนวนขั้นสมดุลการสกัดสำหรับหอสกัดเพื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น

การสกัดเอทานอล (ร้อยละโดยมวล)	จำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่ใช้	ค่าคงที่การสกัดเอทานอล
50	5	0.508
80	10	0.809
90	25	0.907

จำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่เลือกใช้เป็นจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่น้อยที่สุดสำหรับการสกัดเอทานอลให้ได้สัดส่วนตามที่กำหนดไว้ จากตารางการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลนั้น จำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่ใช้มีจำนวน 5 ขั้น ซึ่งจะได้ค่าคงที่การสกัดเอทานอลเท่ากับ 0.508 และการสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลนั้นจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่ใช้มีจำนวน 10 ขั้น ค่าคงที่การสกัดเอทานอลเท่ากับ 0.809 และสุดท้ายการสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลนั้นจำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่ใช้มีจำนวน 25 ขั้น ค่าคงที่การสกัดเอทานอลเท่ากับ 0.907

เมื่อทราบค่าคงที่การสกัดสำหรับการสกัดเอทานอลร้อยละการสกัด 50 80 และ 90 โดยมวลแล้ว จากความสัมพันธ์ของเครมเซอร์ตามสมการที่ 3.13 พบว่าค่าคงที่การสกัดนั้นขึ้นกับค่าคงที่สมดุลและสัดส่วนของตัวทำละลายต่อสารตั้งต้น ดังนั้นขั้นตอนต่อไปจึงเป็นการพิจารณาค่าคงที่สมดุลของเหลว-ของเหลวของเอทานอล และ สัดส่วนของตัวทำละลายต่อสารตั้งต้น

5.2 ผลการพิจารณาสมดุลของเหลว - ของเหลว

การพิจารณาการสกัดนั้นจะพิจารณาจากค่าคงที่สมดุล แต่เนื่องจากค่าคงที่สมดุลที่มีการรายงานเอาไว้นั้นมีสำหรับระบบบางระบบเพียงเท่านั้นและไม่สามารถเอาไปใช้เมื่อทำการเปลี่ยนสภาวะของระบบไป ดังนั้นจึงต้องอาศัยการประมาณค่าคงที่สมดุลจากการคำนวณ แต่เพื่อให้การคำนวณเป็นที่น่าเชื่อถือจึงได้ทำการเปรียบเทียบผลจากการทดลองที่มีผู้รายงานไว้กับผลจากการประมาณด้วยการคำนวณ เนื่องจากข้อมูลจากการทดลองนั้นรายงานไว้ไม่เพียงพอต่อการคำนวณค่าคงที่สมดุลเพื่อเปรียบเทียบกัน เพราะผลการทดลองรายงานไว้เพียงองค์ประกอบของสารในแต่ละเฟสหลังเข้าสู่สมดุลแล้วซึ่งไม่รายงานองค์ประกอบของสารก่อนเข้าสู่สมดุลซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการคำนวณค่าคงที่สมดุล การคำนวณค่าคงที่สมดุลจำเป็นต้องทราบสัดส่วนของสารตัวทำละลายต่อสารตั้งต้นก่อนเข้าสู่สมดุลเพราะค่าคงที่สมดุลจะเปลี่ยนไปเมื่อสัดส่วนของสารตัวทำละลายต่อสารตั้งต้นเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวที่สภาวะอิ่มตัว เนื่องจากผลการทดลองนั้นมีการรายงานองค์ประกอบของสารเมื่อเข้าสู่สมดุลโดยทดลองด้วยการใช้ปริมาณตัวทำละลายมากที่สุดเพื่อให้ได้ผลขององค์ประกอบของสารในเฟสตัวทำละลายอิ่มตัว และใช้ปริมาณตัวทำละลายน้อยที่สุดเพื่อให้ได้ผลขององค์ประกอบของสารในเฟสน้ำอิ่มตัว

การประมาณสมดุลของเหลว-ของเหลวนั้นอาศัยการคำนวณด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งสมการทางอุณหพลศาสตร์นั้นมีหลายสมการต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน ตามที่แดสงไว้ในตารางที่3.3 จึงได้คำนวณเปรียบเทียบสมดุลของระบบน้ำ-เอทานอล-รีฟอร์เมต ด้วยสมการ UNIFAC,UNIQAUC และNRTL พบว่าการคำนวณด้วยสมการUNIQUACและNRTLนั้นกลับไม่พบเห็นการแยกเฟสของสาร จึงเลือกใช้สมการ UNIFAC สำหรับการคำนวณการสกัดซึ่งได้เปรียบเทียบขั้นถัดไปด้วยผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวทำละลายต่างๆ ดังนี้ พาราฟินส์(จำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 6- 9) อะโรมาติกส์(เบนซีน โทลูอีน พาราไซลีน และออโธไซลีน) แนฟทีน(ไซโคลเฮกเซน)

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วยสมการ UNIFAC กับผลการทดลอง

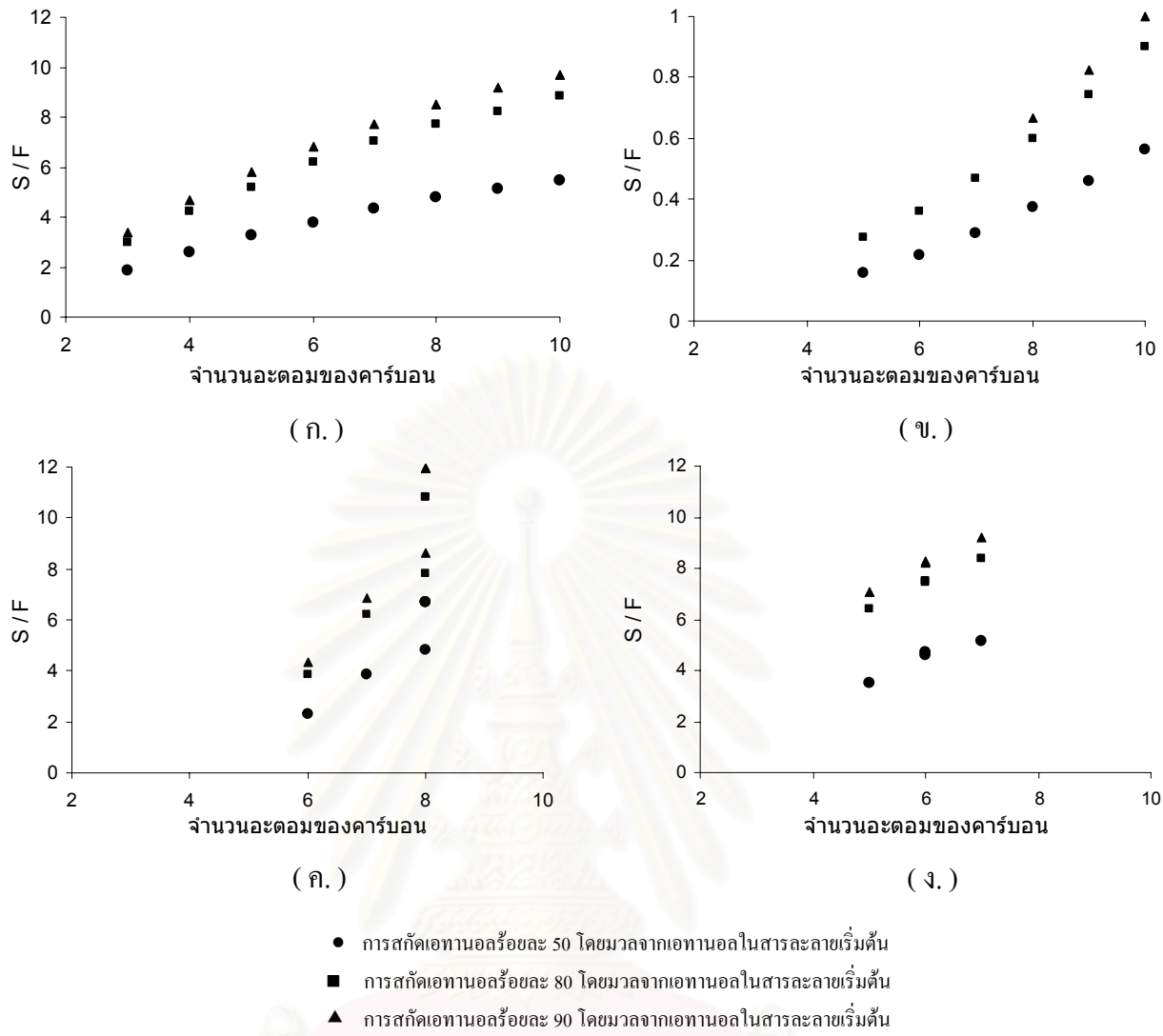
สมดุลของเหลว-ของเหลวของ เอทานอล-น้ำ-ตัวทำละลาย (ชนิดตัวทำละลายที่ใช้)	ความคลาดเคลื่อนของ E ในสารน้ำ (ค่าเฉลี่ย,%)	E ในสารสกัด (ค่าเฉลี่ย,%)	ความคลาดเคลื่อนของ W ในสารสกัด (ค่าเฉลี่ย,%)	W ในเฟสน้ำ (ค่าเฉลี่ย,%)
เฮกเซน	4.49	1.78	13.08	5.18
เฮบเทน	4.32	1.99	10.26	6.06
ออกเทน	3.59	0.90	9.66	5.49
โนเนน	2.82	0.90	8.37	2.94
เบนซีน	15.41	2.73	14.03	4.25
โทลูอีน	8.46	1.88	10.69	6.44
พาราไซลีน	13.37	0.35	13.85	4.02
ออโธไซลีน	12.19	0.25	13.37	4.88
ไซโคลเฮกเซน	7.77	2.42	6.12	3.01

จากการประมาณสมดุลของเหลว-ของเหลวแล้วเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองพบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในกรณีของการใช้ตัวทำละลาย เฮกเซน เฮปเทน ออกเทน โนเนน เบนซีน โทลูอีน พาราไซลีน ออโธไซลีนและไซโคลเฮกเซน ไม่เกินร้อยละ 20 ดังนั้นในประมาณค่าคงที่สมดุลการสกัดสำหรับตัวทำละลายต่างๆ นั้นจะเลือกใช้สมการทางอุณหพลศาสตร์ของ UNIFAC ในการคำนวณการสกัด

จากผลการคำนวณค่าคงที่การสกัดและค่าคงที่สมดุลสามารถนำไปคำนวณประมาณสัดส่วนของตัวทำละลายต่อสารตั้งต้นขั้นต้นด้วยวิธีการของเครมเซอร์ได้ เพื่อความสะดวกในการประมาณปริมาณตัวทำละลายที่ต้องใช้ในการสกัดเอทานอลด้วยวิธีการคำนวณแบบซับซ้อนในขั้นต่อไป

5.3 ปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องใช้ในการสกัดเอทานอล

หลังจากประเมินปริมาณตัวทำละลายในขั้นต้นด้วยวิธีการคำนวณของเครมเซอร์แล้วจึงได้คำนวณปริมาณการใช้ตัวทำละลายด้วยวิธีการแบบซับซ้อนซึ่งมีสมมติฐานแตกต่างไปจากการคำนวณด้วยเครมเซอร์ โดยได้แบ่งผลการคำนวณสำหรับตัวทำละลายต่างๆ ออกเป็นกลุ่มๆ เพื่อให้สะดวกต่อการเปรียบเทียบไว้ 4 กลุ่มดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ผลของจำนวนอะตอมของคาร์บอนต่ออัตราส่วนของปริมาณของตัวทำละลายต่อปริมาณของสารละลายเริ่มต้น เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

สำหรับการใช้ตัวทำละลายในของกลุ่มพาราฟินส์ ผลการคำนวณพบว่าการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของโพรเพนที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 2 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่า สำหรับการใช้เดคเคนเป็นตัวทำละลาย และการสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของโพรเพนที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 3 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 9 เท่า สำหรับการใช้เดคเคนเป็นตัวทำละลาย และการสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของโพรเพนที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 3 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 10 เท่า สำหรับการใช้เดคเคนเป็นตัวทำ

ละลาย เมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนในตัวทำละลายสูงขึ้นปริมาณการใช้ตัวทำละลายจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเป็นขั้วของตัวละลายพาราฟินส์จะลดลงเมื่อขนาดของโมเลกุลยาวขึ้นทำให้ความสามารถในการสกัดเอทานอลของตัวทำละลายนั้นๆลดลง การจะสกัดเอทานอลให้ได้ปริมาณที่ต้องการจึงจำเป็นต้องอาศัยปริมาณของตัวทำละลายที่มากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของแอลกอฮอล์ ผลการคำนวณพบว่าการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของเพนทานอลที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 0.1 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 0.5 เท่า สำหรับการใช้เดคานอลเป็นตัวทำละลาย และการสกัดเอทานอลร้อยละ 80โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของเพนทานอลที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 0.2 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 0.8 เท่า สำหรับการใช้เดคานอลเป็นตัวทำละลาย และการสกัดเอทานอลร้อยละ 90โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของเพนทานอลที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 0.6 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 1 เท่า สำหรับการใช้เดคานอลเป็นตัวทำละลาย เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของพาราฟินส์กับแอลกอฮอล์เมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนเท่ากันนั้นพบว่าปริมาณการใช้ตัวทำละลายในการสกัดด้วยพาราฟินส์สูงกว่าแอลกอฮอล์ หลายเท่า เพราะว่าค่าการละลายของเอทานอลในตัวทำละลายกลุ่มแอลกอฮอล์มีค่าสูงกว่าพาราฟินส์ เนื่องจาก โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบทั้งคู่มีลักษณะเป็นเส้นตรงเหมือนกัน แต่แอลกอฮอล์จะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้มีสภาพความเป็นขั้วสูงกว่าพาราฟินส์

สำหรับการใช้ตัวทำละลายในของกลุ่มอะโรมาติกส์ ผลการคำนวณพบว่าการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของเบนซีนที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 2 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 7 เท่า สำหรับการใช้เอทธิลเบนซีนเป็นตัวทำละลาย และการสกัดเอทานอลร้อยละ 80โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของเบนซีนที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 3 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 11 เท่า สำหรับการใช้เอทธิลเบนซีนเป็นตัวทำละลาย และการสกัดเอทานอลร้อยละ 90โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของเบนซีนที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 4 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 12 เท่า สำหรับการใช้เอทธิลเบนซีนเป็นตัวทำละลาย เมื่อเปรียบเทียบการใช้ไซลีนแต่ละชนิดที่มีตำแหน่งของหมู่เมทธิล 2 หมู่แต่ตำแหน่งที่เกาะนั้นต่างกันของ พาราไซลีน เมตาไซลีน และออโธไซลีน พบว่าผลของปริมาณการใช้ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดมีค่าเท่ากันแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของหมู่เมทธิลไม่ส่งผลต่อปริมาณการใช้ตัวทำละลาย แต่เมื่อเปรียบเทียบโทลูอีนกับเอทธิลเบนซีนนั้นที่ขนาดของหมู่อัลคิลที่เกาะกับวงเบนซีนมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 1 หมู่ของเมทธิลเป็น 1 หมู่ของเอทธิลกลับพบว่าผลของ

ปริมาณการใช้ตัวทำละลายมีค่าสูงขึ้น และการที่หมู่เอทธิล 1 หมู่ของเอทธิลเบนซีนเทียบกับ 2 หมู่ของเมทธิลของไซลีน พบว่าปริมาณการใช้ตัวทำละลายของเอทธิลเบนซีนนั้นสูงกว่าไซลีน

สำหรับการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของแนฟทีน ผลการคำนวณพบว่าการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของไซโคลเพนเทนที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 3 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่า สำหรับการใช้เมทธิลไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย และการสกัดเอทานอลร้อยละ 80โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของไซโคลเพนเทนที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 6 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 8 เท่า สำหรับการใช้เมทธิลไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย และการสกัดเอทานอลร้อยละ 90โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณของไซโคลเพนเทนที่ใช้ในการสกัดต้องไม่น้อยกว่า 7 เท่าของปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้นและเพิ่มขึ้นเป็น 9 เท่า เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้ตัวทำละลายแนฟทีนพบว่า เมื่อกรณีที่จำนวนอะตอมของคาร์บอนเท่ากับ 6 ได้แก่ เมทธิลไซโคลเพนเทน กับไซโคลเฮกเซน ปริมาณการใช้ตัวทำละลายจะใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบเมทธิลไซโคลเพนเทนกับไซโคลเพนเทนจะเห็นว่าเมื่อมีหมู่เมทธิลเพิ่มขึ้นปริมาณการใช้ตัวทำละลายก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของอะโรมาติกส์กับแนฟทีน ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลมีลักษณะเป็นวงคล้ายคลึงกัน พบว่าเมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนเท่ากัน ปริมาณการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของแนฟทีนสูงกว่าอะโรมาติกส์

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้ตัวทำละลายระหว่างพาราฟินส์ (เฮปทานอลและออกทานอล) และอะโรมาติกส์(โทลูอีนและไซลีน) ที่จำนวนอะตอมของคาร์บอนเท่ากับ 7 และ 8 อะตอม พบว่าปริมาณการใช้ตัวทำละลายมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกรณีของเฮกเซนกับเบนซีนกลับพบว่าปริมาณการใช้ตัวทำละลายของเฮกเซนนั้นมีค่ามากกว่าเบนซีน แสดงให้เห็นว่าการที่มีหมู่อัลคิลมาเกาะวงเบนซีนจะส่งผลให้อิทธิพลของวงเบนซีนต่อปริมาณการใช้ตัวทำละลายลดต่ำลง สำหรับแนฟทีนกรณีของไซโคลเพนเทนปริมาณการใช้ตัวทำละลายแตกต่างจากกรณีของเพนเทนไม่มากนักเมื่อเทียบกับผลต่างของเบนซีนกับเฮกเซนแสดงว่าการจัดเรียงโมเลกุลของสารที่เป็นวงแบบแนฟทีนส่งผลน้อยกว่าการจัดเรียงโมเลกุลของสารที่เป็นวงแบบอะโรมาติกส์

สำหรับการเปรียบเทียบปริมาณการใช้ตัวทำละลายทุกกลุ่มเมื่อมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนเท่ากันที่คาร์บอน 6 และ 7 อะตอม พบว่าปริมาณการใช้ตัวทำละลายในการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายเริ่มต้น เรียงจากมากไปน้อย มีดังนี้ แนฟทีน พาราฟินส์ อะโรมาติกส์ และแอลกอฮอล์ ตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบปริมาณการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มเดียวกันสำหรับตัวทำละลายทุกชนิดพบว่าเมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณการใช้ตัวทำละลายในการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้นตามไปด้วย

5.4 ผลการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์

หลังจากทราบจำนวนขั้นสมดุลของการสกัด สภาวะของการสกัด ปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องใช้ จึงได้จำลองหอสกัดแบบทิศทางการไหลสวนทางกันด้วยวิธีการคำนวณแบบซับซ้อน ซึ่งหลังจากการจำลอง ณ หอสกัด แล้วจึงได้พิจารณาถึงผลของการสกัดประกอบไปด้วย ปริมาณของเอทานอลที่สามารถสกัดได้ ปริมาณของเอทานอลที่เหลือในเฟสน้ำ ปริมาณของน้ำที่ติดมากับตัวทำละลาย ปริมาณของตัวทำละลายที่หายไปจากการสกัด ความเข้มข้นของเอทานอลในเฟสสกัด

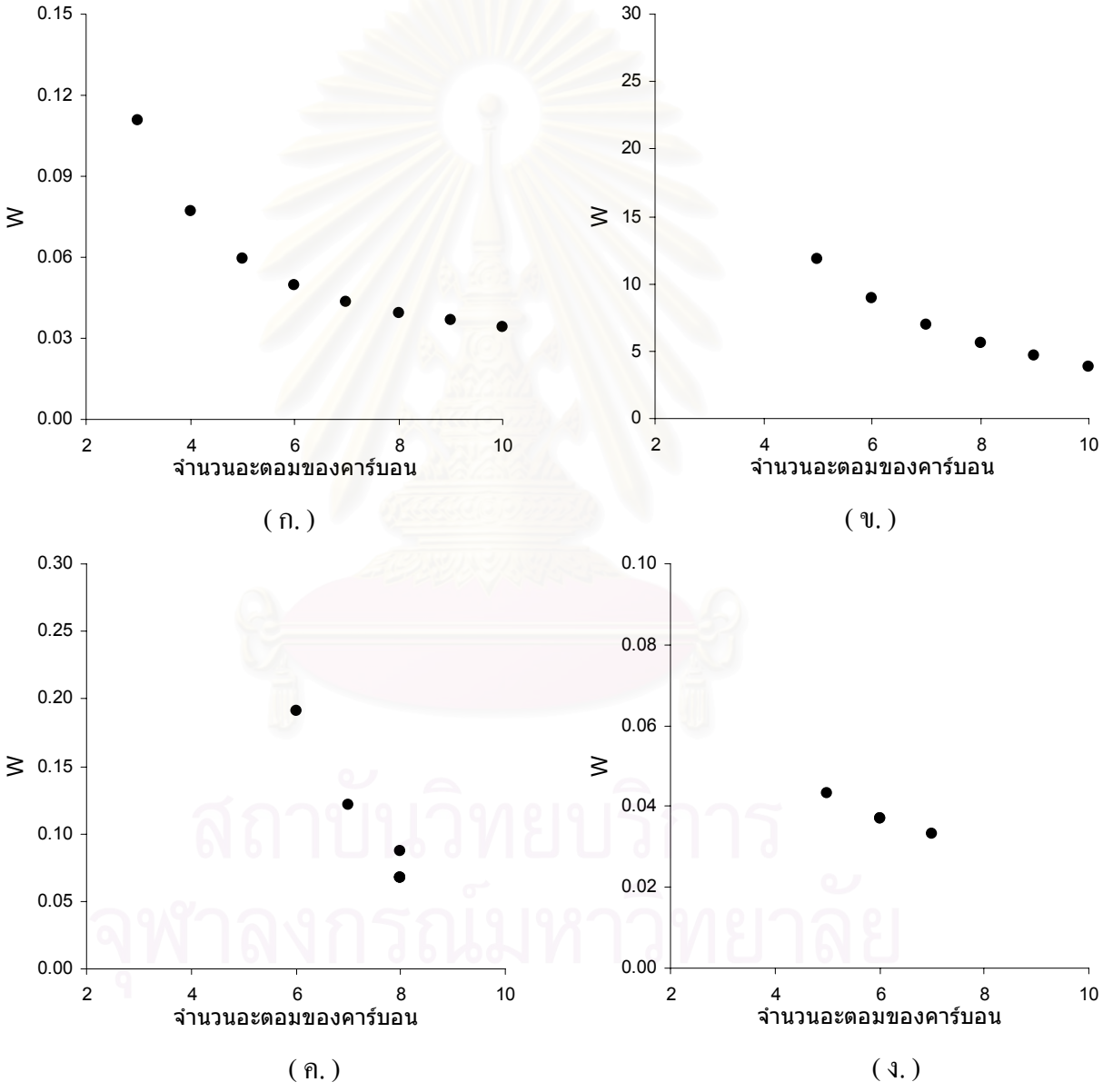
5.4.1 ปริมาณของน้ำที่ปนเปื้อนในตัวทำละลาย

เนื่องจากการสกัดเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลนั้นไม่ได้มีเฉพาะเอทานอลเท่านั้นที่สามารถถูกละลายเข้าสู่ตัวทำละลาย จึงต้องพิจารณาปริมาณของน้ำที่ติดมากับตัวทำละลายหลังผ่านการสกัด เนื่องจากการพิจารณาการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายจะต้องนำน้ำที่ติดมากับตัวทำละลายมาพิจารณาประกอบด้วย สำหรับการพิจารณาปริมาณน้ำที่ติดมากับตัวทำละลายหลังการสกัด ณ หอสกัด ปริมาณของตัวทำละลายที่ใช้นั้นมีปริมาณไม่เท่ากันสำหรับตัวทำละลายทุกชนิดในการใช้ตัวทำละลายในการสกัดเอทานอล ดังนั้นผลการคำนวณจึงไม่รายงานเป็นปริมาณของน้ำที่ปนมากับตัวทำละลาย ควรพิจารณาน้ำที่ปนมากับตัวทำละลายในลักษณะของสัดส่วนของน้ำที่ปนมากับตัวทำละลายต่อปริมาณของตัวทำละลายที่ใช้ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.5

จากการคำนวณพบว่าสำหรับตัวทำละลายทุกชนิดเมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนสูงขึ้นปริมาณของน้ำที่ติดไปกับตัวทำละลายจากการสกัดลดลง และในกรณีของการใช้ตัวทำละลายในกลุ่ม พาราฟินส์ อะโรมาติกส์ และแนฟทีน ปริมาณน้ำที่ปนมาด้วยน้อยมากไม่ถึงร้อยละ 0.5 แต่สำหรับการใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย ปริมาณน้ำที่ปนมาด้วยสูงมากเมื่อเทียบกับตัวทำละลายกลุ่มอื่น คือปริมาณของน้ำที่ปนมาในกรณีของเพนทานอลมีค่าเท่ากับร้อยละ 5 โดยมวล และมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 30 สำหรับการใช้เดคานอลเป็นตัวทำละลาย ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายด้วยการกลั่น สำหรับกรณีของการใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย การพิจารณาของผสมจุดเดือดคงที่จะต้องพิจารณาถึงการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ของน้ำกับตัวทำละลายด้วย นอกเหนือจากการพิจารณา เอทานอลกับตัวทำละลาย และเอทานอลกับน้ำ

เมื่อพิจารณา ณ การสกัดเอทานอลร้อยละใดๆของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้นพบว่าเมื่อปริมาณเอทานอลที่ต้องการสกัดสูงขึ้นปริมาณการใช้ตัวทำละลายจะต้องมากตามไปด้วยทำให้เอทา

นอลที่สกัดได้ในตัวทำละลายสูงขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำที่ปนเข้ามาในตัวทำละลายสูงขึ้นเมื่อใช้ตัวทำละลายมากขึ้นแต่เมื่อพิจารณาปริมาณของน้ำคิดเป็นสัดส่วนของน้ำในตัวทำละลายจะได้ค่าใกล้เคียงกัน ทุกร้อยละการสกัดเอทานอล โดยได้ทำการทดสอบสมดุลของน้ำกับตัวทำละลายโดยไม่พิจารณาเอทานอลในระบบ โดยกำหนดปริมาณของน้ำและตัวทำละลายตามระบบที่มีเอทานอล ได้ผลคือ ปริมาณตัวทำละลายมากขึ้นน้ำที่ปนมากับตัวทำละลายก็จะมากขึ้นตามไปด้วยแต่เมื่อพิจารณาเป็นสัดส่วนของน้ำในตัวทำละลายพบว่าค่าที่ได้เท่ากันทุกร้อยละการสกัด



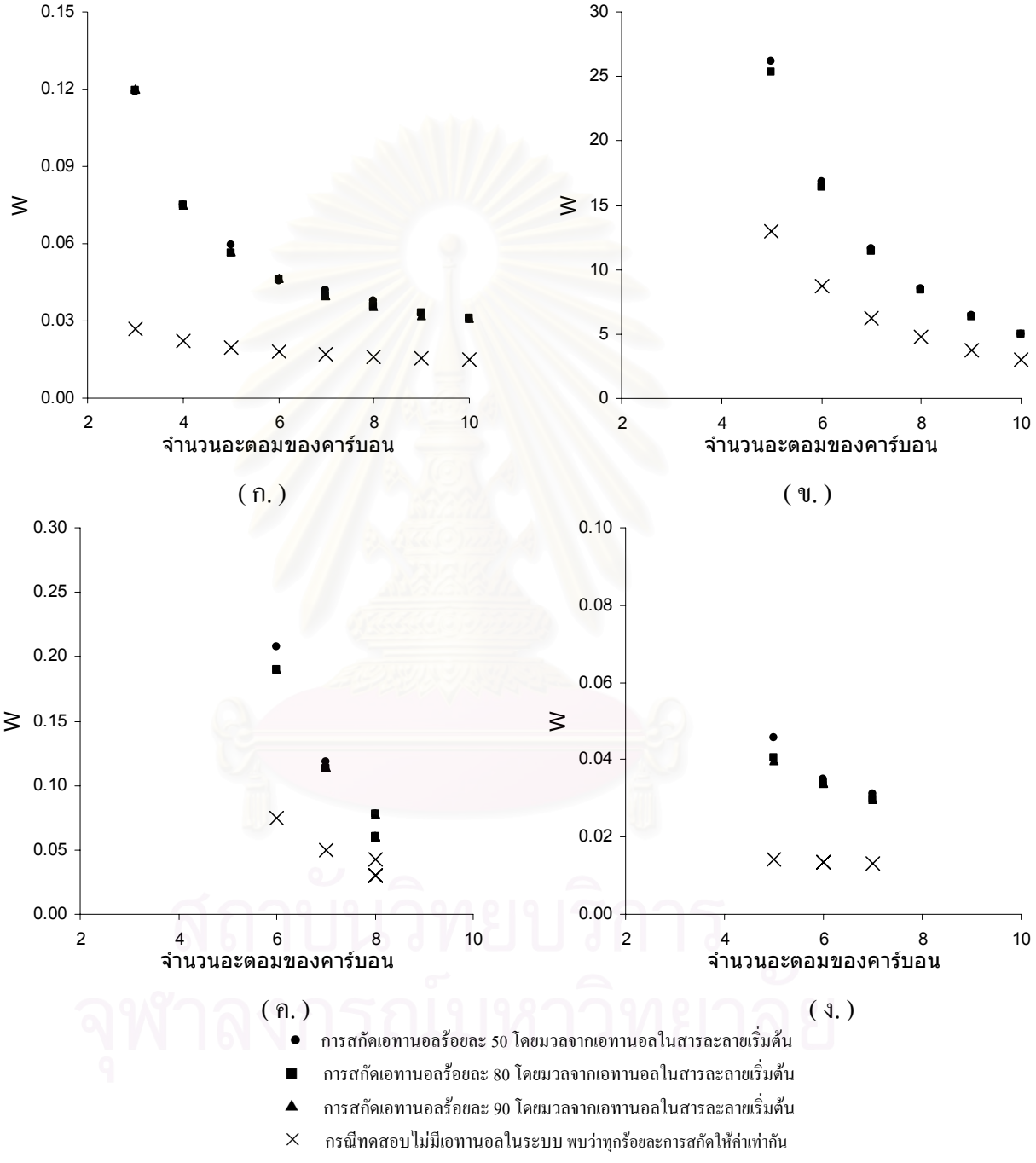
รูปที่ 5.4 สัดส่วนของน้ำในตัวทำละลายหลังการสกัด (ร้อยละโดยมวล) จากการคำนวณประยุกต์ด้วยสมการของเครมเซอร์

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พบว่าทุกร้อยละการสกัดน้ำที่ปนเข้ามาในสารสกัดเมื่อคิดเป็นความเข้มข้นของน้ำในสารสกัดจะได้ค่าเท่ากันทั้งร้อยละการสกัดเอทานอล 50 80 และ 90 ซึ่งปริมาณน้ำที่ติดมาเมื่อนำไปเทียบกับการจำลองการสกัดด้วยวิธีแบบซับซ้อนพบว่ามีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 5.5 สัดส่วนของน้ำในตัวทำละลายหลังการสกัด (ร้อยละโดยมวล)
เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล จากการจำลองการสกัดด้วยวิธีแบบซับซ้อน

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของน้ำที่ปนมากับสารสกัดด้วยวิธีการคำนวณจากการประยุกต์ใช้สมการในกลุ่มของเครมเซอร์กับการคำนวณด้วยวิธีการแบบซับซ้อนพบว่ากรณีของการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของพาราฟินส์ อะโรมาติกส์และแนฟทีนค่าที่ได้มีความแตกต่างกันไม่มากเท่ากับกรณีของการใช้ตัวทำละลายแอลกอฮอล์ในการสกัด

เปรียบเทียบผลของเอทานอลในตัวทำละลาย พบว่าจากรูป เมื่อเอทานอลที่สกัดได้มีปริมาณมากขึ้นปริมาณของน้ำที่ปนมากับสารสกัดก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อพิจารณาค่าปริมาณของน้ำที่ปนมากับสารสกัดทั้งหมดหักลบกับปริมาณของน้ำที่ปนมากับตัวทำละลายโดยไม่มีผลของเอทานอลหารด้วยปริมาณของเอทานอลในสารสกัด($(W-W_{org})/EtOH$) จะพบว่าจะได้ค่าคงที่เท่ากับ 0.044 ซึ่งก็คือความสามารถในการดึงน้ำมาของเอทานอล และเมื่อพิจารณาพบว่าปริมาณน้ำที่ปนมาเนื่องจากเอทานอลนั้นมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของน้ำในของผสมจุดเดือดคงที่

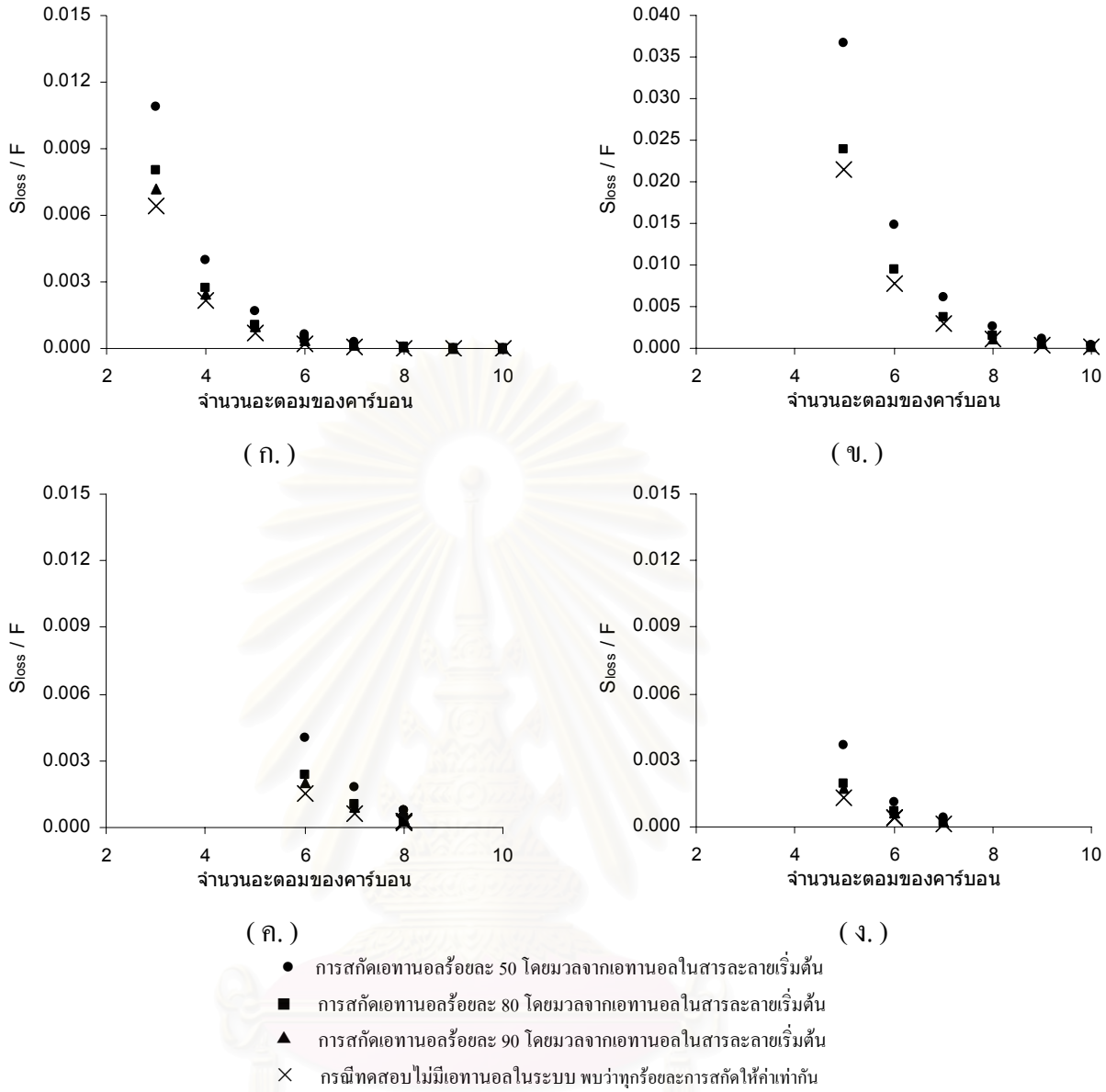
5.4.2 ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัด

ปัจจัยต่อไปที่จะพิจารณาหลังการสกัดได้แก่ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัดโดยจะถูกน้ำละลายไปด้วยบางส่วน ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.6

จากผลการพิจารณาปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำจากกระบวนการสกัดพบว่าปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.04 โดยมวล สำหรับตัวทำละลายทุกชนิด ซึ่งการสูญเสียตัวทำละลายจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการสกัดทำให้ปริมาณตัวทำละลายในส่วนการสกัดนั้นไม่เพียงพอจึงต้องมีการชดเชยด้วยการเติมตัวทำละลายเข้าไป แต่เมื่อนำปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียไปพิจารณาประกอบกับตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดพบว่าปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัดน้อยมากดังนั้นการชดเชยตัวทำละลายจึงพิจารณาตัวทำละลายที่สูญเสียจากการกลั่นเป็นสำคัญโดยอาจนำปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียจากการสกัดไปพิจารณาประกอบ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากันในกลุ่มต่างๆพบว่า การใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายสำหรับการสกัดจะมีการสูญเสียตัวทำละลายไปมากที่สุด รองลงมาคือ พาราฟินส์ อะโรมาติกส์ ตามลำดับ และตัวทำละลายที่สูญเสียน้อยที่สุดจากการสกัดคือตัวทำละลายในกลุ่ม แนฟทีน

เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายเดียวกัน ณ การสกัดเอทานอลร้อยละใดๆ โดยมวลจากเอทานอลในสารละลายเริ่มต้นพบว่าเมื่อปริมาณของเอทานอลที่ต้องการสกัดสูงขึ้นจำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายมากขึ้นแต่ผลของตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำกลับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาผลการสกัดในเฟสของน้ำปริมาณของเอทานอลเมื่อร้อยละการสกัดสูงขึ้นเอทานอลที่คงเหลือในเฟสของน้ำจะลดลง โดยเมื่อเอทานอลในน้ำลดลงการละลายของตัวทำละลายในสารละลายจะต่ำลง



รูปที่ 5.6 ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำจากการสกัด คิดเป็นสัดส่วนของตัวทำละลายที่สูญเสียต่อปริมาณสารละลายเริ่มต้น เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล

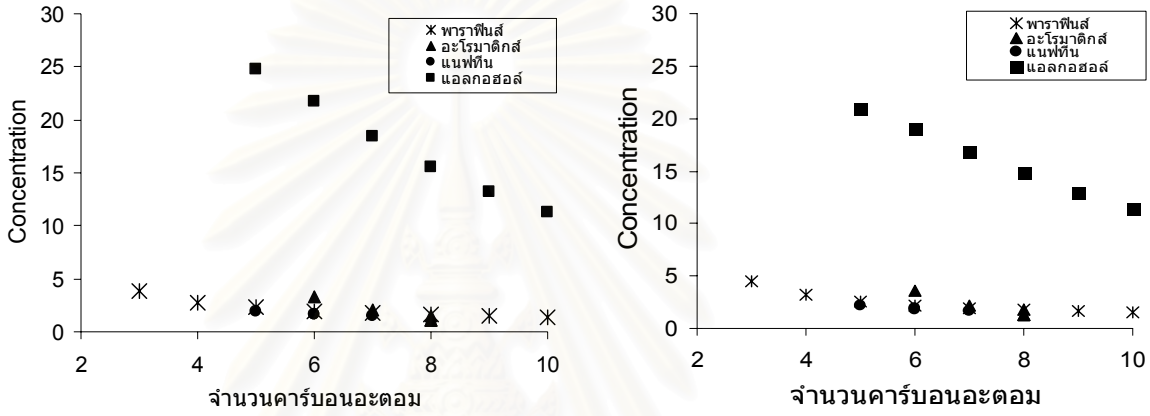
ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

เปรียบเทียบผลของเอทานอลในน้ำ พบว่าจากรูป เมื่อเอทานอลที่เหลือในน้ำมีปริมาณมากขึ้นปริมาณของตัวทำละลายที่ติดมากับน้ำก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อพิจารณาค่าปริมาณของตัวทำละลายที่ติดมากับน้ำทั้งหมดหักลบกับปริมาณของตัวทำละลายที่ติดมากับน้ำโดยไม่มีผลของเอทานอลหารด้วยปริมาณของเอทานอลในน้ำ($(S_{loss}-S_W)/EtOH$) จะพบว่าจะได้ค่าคงที่เท่ากับ 0.066 ซึ่งก็คือความสามารถในการดึงตัวทำละลายมาของเอทานอล

5.4.3 ความเข้มข้นของเอทานอลในเฟสตัวทำละลายหลังการสกัด

ตัวแปรสุดท้ายที่จะการพิจารณาหลังจากการสกัดคือความเข้มข้นของเอทานอลที่สามารถสกัดได้ โดยจากการสรุปผลการคำนวณพบว่า ร้อยละการสกัดเอทานอลไม่ส่งผลต่อค่าความเข้มข้นของเอทานอลที่สามาถสกัดได้ นั่นคือเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละการสกัดเอทานอลมากขึ้นแต่ความเข้มข้นของเอทานอลที่สกัดได้กลับมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนนี้จึงได้คิดเป็นค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของเอทานอลทั้ง ที่ร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวลการสกัดเอทานอล ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงความเข้มข้นเฉลี่ยของเอทานอลหลังการสกัด (ร้อยละโดยมวล)
ก. ผลจากการจำลองการสกัดด้วยวิธีแบบซับซ้อน
ข. ผลจากการคำนวณประยุกต์จากสมการของเครมเซอร์

เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของเอทานอลในสารสกัดจากการคำนวณทั้ง 2 วิธี พบว่ากรณีของแอลกอฮอล์การคำนวณแบบซับซ้อนได้ความเข้มข้นเอทานอลแตกต่างกันมากโดยการคำนวณแบบซับซ้อนให้ค่าสูงกว่า สำหรับกรณีการใช้ตัวทำละลายกลุ่มอื่นนั้นผลที่ได้มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก

จากการคำนวณแบบซับซ้อนความเข้มข้นเฉลี่ยของเอทานอลหลังการสกัดด้วยตัวทำละลายในกลุ่มของพาราฟินส์ความเข้มข้นของเอทานอลในสารสกัดสำหรับการใช้โพรเพนเป็นตัวทำละลาย มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.9 โดยมวล และมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 1.3 โดยมวล สำหรับการใช้เดคเคนเป็นตัวทำละลาย และความเข้มข้นเฉลี่ยของเอทานอลหลังการสกัดด้วยตัวทำละลายในกลุ่มของอะโรมาติกส์ความเข้มข้นของเอทานอลในสารสกัดสำหรับการใช้เบนซีนเป็นตัวทำละลาย มีค่า

เท่ากับร้อยละ 3.3 โดยมวล และมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 1.5 โดยมวล สำหรับการใช้ไซลีน เป็นตัวทำละลายและความเข้มข้นเฉลี่ยของเอทานอลหลังการสกัดด้วยตัวทำละลายในกลุ่มของแนฟทีน ความเข้มข้นของเอทานอลในสารสกัดสำหรับการใช้ไซโคลเพนเทนเป็นตัวทำละลาย มีค่าเท่ากับร้อยละ 2 โดยมวล และมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 1.5 โดยมวล สำหรับการใช้ เมทธิลไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย และความเข้มข้นเฉลี่ยของเอทานอลหลังการสกัดด้วยตัวทำละลายในกลุ่มของแอลกอฮอล์ความเข้มข้นของเอทานอลในสารสกัดสำหรับการใช้เพนทานอลเป็นตัวทำละลาย มีค่าเท่ากับร้อยละ 25 โดยมวล และมีค่าลดลงเป็นร้อยละ 11 โดยมวล สำหรับการใช้เดคานอลเป็นตัวทำละลาย ดังนั้นสรุปได้ว่าเมื่อใช้ตัวทำละลายที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นความเข้มข้นของเอทานอลหลังการสกัดจะมีค่าต่ำลง ในกรณีของการใช้ตัวทำละลายในกลุ่ม พาราฟินส์ อะโรมาติกส์ และแนฟทีนนั้น ความเข้มข้นของเอทานอลที่สกัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณไม่เกินร้อยละ4 โดยมวล ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการใช้ตัวทำละลายสูง และมีการสูญเสียปริมาณตัวทำละลายน้อยและมีน้ำติดมาในสารสกัดน้อย ต่างจากในกรณีของการใช้แอลกอฮอล์ที่พบว่าปริมาณการใช้ตัวทำละลายต่ำกว่าทำให้ความเข้มข้นเอทานอลที่สกัดได้มีค่าสูงมาก อีกทั้งการใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายนั้น ปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัดมีค่าสูง ทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้น แม้จะมีน้ำติดมาด้วยสูงกว่าการใช้ตัวทำละลายชนิดอื่น แต่เมื่อเทียบสัดส่วนกันแล้วทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นสูง

5.5 การประเมินการกลั่นแยกเอทานอลเบื้องต้น

หลังจากจำลองกระบวนการสกัดพบว่าเอทานอลที่ได้นั้นผสมอยู่กับตัวทำละลายและน้ำซึ่งติดมาด้วยบางส่วน โดยรายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น จึงจำเป็นต้องแยกเอทานอลออกจากเฟสสกัด ซึ่งการแยกนั้นอาศัยวิธีการกลั่น เมื่อกล่าวถึงการกลั่นแยกทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการกลั่นโดยตรงได้แก่ ทฤษฎีสมดุลไอ-ของเหลว ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในข้างต้น จากการพิจารณาสมดุลไอ-ของเหลว ของสารซึ่งประกอบไปด้วย เอทานอล ตัวทำละลาย และน้ำ โดยในกรณีของการใช้ตัวทำละลายในกลุ่ม พาราฟินส์ อะโรมาติกส์ และแนฟทีน จึงพิจารณาสมดุลไอ-ของเหลวในส่วนของ เอทานอลกับตัวทำละลาย และกำหนดให้ปริมาณของน้ำเป็นไปตามสัดส่วนที่ได้จากการสกัดเปรียบเทียบกับกรณีของการพิจารณาไม่ให้น้ำรบกวนระบบสมดุลไอ-ของเหลวของเอทานอลกับตัวทำละลายคือกำหนดให้ไม่มีน้ำในระบบพบว่า ผลของสมดุลไอ-ของเหลวของเอทานอลกับตัวทำละลายทั้ง 2 กรณีนั้นให้ผลเท่ากันเนื่องจากปริมาณน้ำที่ปนมากับตัวทำละลายนั้นมีค่าสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับเอทานอลและตัวทำละลายนั่นคือไม่ถึงร้อยละ 0.2 โดยมวล ส่วนในกลุ่มของแอลกอฮอล์นั้นมีน้ำติดมาด้วยในปริมาณมากถึงระหว่างร้อยละ 5-30 โดยมวล ดังนั้นการพิจารณาสมดุลไอ-ของเหลวของเอทานอลกับตัวทำละลายนั้นต้องนำน้ำมาพิจารณาประกอบด้วย

เนื่องจากสมดุลไอ-ของเหลวของสารไม่เป็นไปตามอุดมคติ การแยกนั้นจึงประสบกับปัญหา โดยการพิจารณาการกลั่นแยกขั้นต้นต้องพิจารณาสารประกอบซึ่งมีคุณสมบัติจุดเดือดคงที่ทำให้การกลั่นแยกสารดังกล่าวไม่สามารถแยกสารดังกล่าวออกจากกันได้ดังนั้นถ้าระบบการกลั่นแยกเกิดของผสมจุดเดือดคงที่เกิดขึ้นต้องพิจารณาของผสมจุดเดือดคงที่ประกอบด้วย โดยคุณสมบัติของผสมจุดเดือดคงที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว ซึ่งก่อนทำการกลั่นแยกจึงต้องพิจารณาว่าระบบสามารถเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ และมีอุณหภูมิของจุดเดือดคงที่ของผสมมากกว่าหรือน้อยกว่าสารในระบบเนื่องจากถ้ามีอุณหภูมิจุดเดือดต่ำที่สุด ของผสมจุดเดือดคงที่จะเป็นสารผลิตภัณฑ์จากการกลั่นแยกที่ออกทางยอดหอกลั่น ส่วนถ้ามีอุณหภูมิจุดเดือดสูงที่สุด ของผสมจุดเดือดคงที่จะเป็นสารผลิตภัณฑ์จากการกลั่นแยกที่ออกทางก้นหอกลั่น

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบการคำนวณความบริสุทธิ์ของเอทานอลและจุดเดือดของของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายอินทรีย์

ชนิดตัวทำละลาย	ผลจากการคำนวณ		ผลจากการทดลอง [28]		ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
	องค์ประกอบของผสม (ร้อยละโดยมวลของเอทานอล)	จุดเดือดของผสม (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบของผสม (ร้อยละโดยมวลของเอทานอล)	จุดเดือดของผสม (องศาเซลเซียส)	
โพรเพน	(-)	(-)			
บิวเทน	(-)	(-)			
เพนเทน	5.95	34.47			
เฮกเซน	21.48	58.55	21.00	58.68	1.03
เฮบเทน	48.63	71.38	48.27	72.00	-0.06
ออกเทน	69.15	76.80			
โนเนน	96.90	78.40			
เดคเคน	(-)	(-)			
เบนซีน	32.77	67.63	32.37	68.24	0.17
โทลูอีน	68.05	76.85	68.06	76.65	0.12
เมตาไซลีน	(-)	(-)			
ออโธไซลีน	(-)	(-)			
พาราไซลีน	(-)	(-)			
เอธทิลเบนซีน	99.00	78.30			
ไซโคลเพนเทน	11.43	45.32			
ไซโคลเฮกเซน	30.00	64.60	30.50	64.90	-1.05
เมทิลไซโคลเพนเทน	23.34	59.94			
เมทิลไซโคลเฮกเซน	44.43	71.59			
เพนทานอล	(-)	(-)			
เฮกซานอล	(-)	(-)			
เฮปทานอล	(-)	(-)			
ออกทานอล	(-)	(-)			
โนนานอล	(-)	(-)			
เดคานอล	(-)	(-)			

*หมายเหตุ (-) หมายถึง จากการคำนวณปรากฏว่าไม่พบ

ของผสมจุดเดือดคงที่ที่ต้องพิจารณาประกอบด้วย ของผสมระหว่างเอทานอลกับน้ำ ซึ่ง ณ ความดันบรรยากาศปกติมีจุดเดือดอยู่ที่ 78.4 องศาเซลเซียส ณ ความเข้มข้นร้อยละ 95.6 โดยมวล และของผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายซึ่งในกรณีของพาราฟินส์ อะโรมาติกส์ และแนฟทีนนั้นน้ำมีสัดส่วนน้อยมากดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างน้ำกับตัวทำละลาย แต่ในกรณีของการใช้แอลกอฮอล์นั้นจะพิจารณาการเกิดอะซิโอโทรปของน้ำกับตัวทำละลาย สุดท้ายจะพิจารณาของผสมระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลาย สำหรับการใช้ตัวทำละลายทั้งหมด ซึ่งได้คำนวณคุณสมบัติของผสมจุดเดือดคงที่ไว้ด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์ของ UNIFAC และได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่มีผู้ได้ทำการรายงานข้อมูลไว้ มาเปรียบเทียบเพื่อความน่าเชื่อถือสำหรับการใช้สมการทางอุณหพลศาสตร์กับระบบสมดุล ไอ-ของเหลวในขั้นถัดไป โดยผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 5.3

จากการพิจารณาเปรียบเทียบผลการคำนวณของผสมจุดเดือดคงที่ด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์ของ UNIFAC กับผลจากการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ ได้ผลใกล้เคียงกันทั้งองค์ประกอบของสาร ณ ตำแหน่งของผสมจุดเดือดคงที่และอุณหภูมิของผสมจุดเดือดคงที่ จึงทำการคำนวณของผสมจุดเดือดคงที่ของเอทานอลกับตัวทำละลายที่ใช้ทั้งหมด พบว่าในกลุ่มตัวทำละลายชนิดพาราฟินส์ไม่พบของผสมจุดเดือดคงที่ถ้าใช้ตัวทำละลาย โพรเพน บิวเทน และเดคเคน ส่วนตัวทำละลายพาราฟินส์ที่เหลือเมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในกลุ่มตัวทำละลายชนิดอะโรมาติกส์ พบของผสมจุดเดือดคงที่เฉพาะการใช้ เบนซีน และเอทธิลเบนซีน เป็นตัวทำละลายโดยมีแนวโน้มของความเข้มข้นเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนเพิ่มขึ้น ในกลุ่มตัวทำละลายชนิดแนฟทีนนั้นพบของผสมจุดเดือดคงที่ทั้งหมดโดยแนวโน้มเพิ่มตามจำนวนอะตอมคาร์บอนต่อความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่เหมือนกับกรณีของพาราฟินส์และอะโรมาติกส์ และสำหรับในกลุ่มตัวทำละลายชนิดแอลกอฮอล์นั้นจากการคำนวณไม่พบของผสมจุดเดือดคงที่

สรุปในการกลั่นแยกเอทานอลออกจากของผสมในกรณีที่ใช้ตัวทำละลาย พาราฟินส์ อะโรมาติกส์ แนฟทีน และแอลกอฮอล์ จึงไม่พิจารณาของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับน้ำ เนื่องจากน้ำที่ติดมาด้วยมีปริมาณน้อยมาก และของผสมจุดเดือดคงที่ของน้ำกับตัวทำละลาย โดยจะพิจารณาเฉพาะของผสมจุดเดือดคงที่ของเอทานอลกับตัวทำละลาย

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบการคำนวณความบริสุทธิ์ของตัวทำละลายและจุดเดือดของของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างตัวทำละลายอินทรีย์กับน้ำ

ชนิดตัวทำละลาย	ผลจากการคำนวณ		ผลจากการทดลอง [28]		ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
	องค์ประกอบของผสม (ร้อยละโดยมวลของตัวทำละลาย)	จุดเดือดของผสม (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบของผสม (ร้อยละโดยมวลของตัวทำละลาย)	จุดเดือดของผสม (องศาเซลเซียส)	
บิวทานอล	53.51	93.05	53.45	92.30	0.46
เพนทานอล	46.97	94.54			
เฮกซานอล	40.95	96.31			
เฮปทานอล	36.76	97.73			
ออกทานอล	34.08	97.92			
โนนานอล	31.92	98.36			
เดคานอล	30.37	99.62			

ผลการคำนวณของผสมจุดเดือดคงที่นั้นคิดสัดส่วนของเอทานอลที่ปนอยู่ตามที่ได้ในเฟสสกัดเพื่อรบกวนสมดุลไอ-ของเหลว ของตัวทำละลายกับน้ำ จากการคำนวณพบว่าตัวทำละลายทั้งหมดในกลุ่มของแอลกอฮอล์เกิดของผสมจุดเดือดคงที่กับน้ำ แต่เนื่องจากผสมจุดเดือดคงที่ของตัวทำละลายต่างๆกับน้ำนั้นมีค่าจุดเดือดของผสมจุดเดือดคงที่สูงกว่า ของผสมจุดเดือดคงที่ของเอทานอลกับน้ำ

5.6 ผลการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย

การกลั่นนั้นเป็นกระบวนการแยกสารโดยอาศัยหลักการของสมดุลไอ-ของเหลว ในการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายนั้นมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้ดังนี้ องค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกนั่นคือชนิดตัวทำละลาย สัดส่วนของสารต่างๆที่ต้องการแยก สภาวะของการกลั่น จำนวนขั้นสมดุลของการกลั่น สัดส่วนของสารย้อนกลับ ซึ่งจากการคำนวณได้สรุปรายละเอียดต่างๆของหอกลั่นที่ใช้ไว้ดังตารางที่ 5.5

จากการคำนวณพบว่ากรณีของการใช้พาราฟินส์เป็นตัวทำละลายจำนวนขั้นสมดุลการกลั่นแยกเอทานอลอยู่ระหว่าง 10-25ขั้น และเพนเทนนั้นใช้จำนวนขั้นสมดุลการกลั่นน้อยที่สุดเนื่องจากความบริสุทธิ์ของเพนเทนที่กลั่นได้นั้นน้อยที่สุดเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องของผสมจุดเดือดคงที่ ผลของจำนวนขั้นสมดุลการกลั่นนั้นพอสรุปได้ว่า เมื่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้สูงขึ้นส่งผลให้จำนวนขั้นสมดุลการสกัดที่จะต้องใช้สูงขึ้นตามไปด้วย การใช้อะโรมาติกส์เป็นตัวทำละลายจำนวนขั้นสมดุลการกลั่นแยกเอทานอลอยู่ระหว่าง 12-21 ขั้น เมื่อความบริสุทธิ์ของเอทา

นอลที่ต้องการสูงขึ้นจำนวนขั้นสมดุลที่ต้องใช้ก็ต้องมากขึ้นตามไปด้วยสำหรับในกรณีของแนฟทีนและแอลกอฮอล์ก็เช่นกัน สำหรับสัดส่วนของสารป้อนกลับสู่หอกลั่นของการใช้อะโรมาติกส์และแนฟทีนนั้นสูงกว่าพาราฟินส์และแอลกอฮอล์ ดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 สมรรถนะและองค์ประกอบของหอกลั่น

ชนิดตัวทำละลาย	ความเข้มข้นเฉลี่ยของเอทานอล (ร้อยละโดยมวล)		องค์ประกอบของหอกลั่น			
			จำนวนขั้นสมดุล	ความดัน	อุณหภูมิยอดหอ	อัตราส่วน
	ก่อนกลั่น	หลังกลั่น	เหนือ feed / ใต้ feed	(บรรยากาศ)	(องศาเซลเซียส)	สารป้อนกลับ
โพรเพน	3.86	98.97	8 / 10	11	32.07	0.58
บิวเทน	2.82	99.21	7 / 10	3	33.14	0.36
เพนเทน	2.32	5.06	4 / 6	1	42.61	0.42
เฮกเซน	1.94	20.04	8 / 6	1	57.19	0.78
เฮบเทน	1.76	41.22	10 / 7	1	70.20	0.21
ออกเทน	1.61	65.13	10 / 9	1	76.08	0.31
โนเนน	1.45	87.49	11 / 11	1	78.10	0.57
เดคเคน	1.37	95.88	13 / 11	1	79.15	0.39
เบนซีน	3.28	28.64	4 / 5	1	64.55	6.27
โทลูอีน	2.02	56.97	7 / 4	1	75.18	9.25
เมตาไซลีน	1.13	88.71	9 / 7	1	78.05	9.40
ออโธไซลีน	1.13	88.81	9 / 7	1	78.06	9.17
พาราไซลีน	1.12	88.74	9 / 7	1	78.04	9.23
เอทธิลเบนซีน	1.54	82.34	10 / 2	1	78.05	7.46
ไซโคลเพนเทน	1.98	9.16	2 / 1	1	44.21	7.24
ไซโคลเฮกเซน	1.62	28.89	3 / 2	1	63.36	7.71
เมทธิลไซโคลเพนเทน	1.64	21.72	3 / 2	1	58.63	12.17
เมทธิลไซโคลเฮกเซน	1.48	42.40	4 / 3	1	70.52	13.59
เพนทานอล	24.74	50.28	10 / 12	1	80.21	1.16
เฮกซานอล	21.80	55.30	11 / 13	1	80.72	1.24
เฮปทานอล	18.47	59.93	12 / 14	1	81.16	1.62
ออกทานอล	15.55	63.66	14 / 16	1	81.84	1.91
โนนานอล	13.25	65.47	16 / 16	1	82.31	1.43
เดคานอล	11.23	67.93	17 / 18	1	85.88	0.72

หมายเหตุ จำนวนขั้นสมดุลไม่นับรวม feed stage

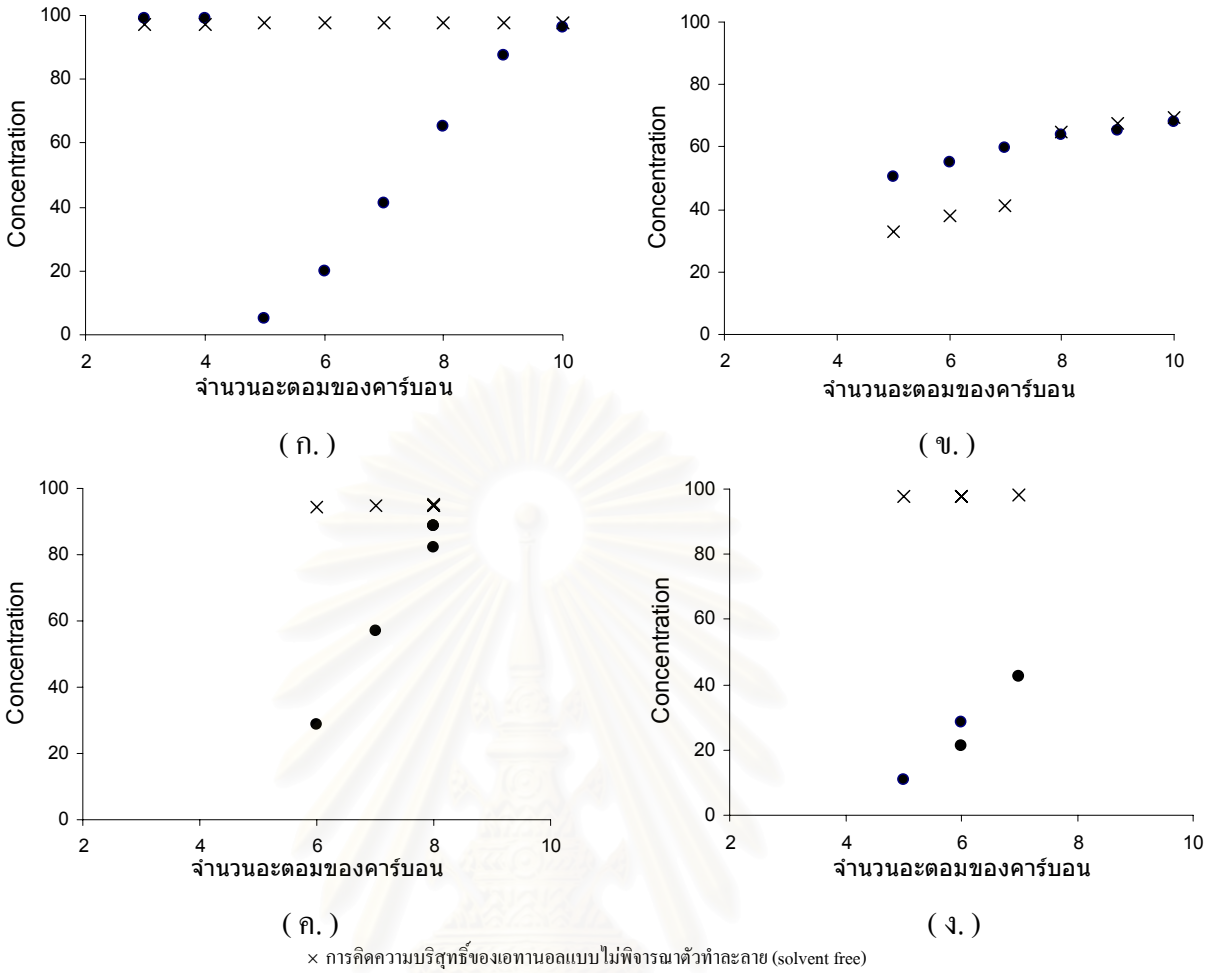
5.6.1 ความบริสุทธิ์ของเอทานอลหลังผ่านกระบวนการกลั่นแยก

หลังจากการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆ เอทานอลที่ได้ในสารสกัดนั้นมีความเข้มข้นต่ำอีกทั้งยังผสมอยู่กับตัวทำละลาย และในกรณีของการใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายยังมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นข้อจำกัดในการนำเอทานอลไปใช้งานตามลักษณะของการใช้งานในปัจจุบัน ดังนั้นการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายจึงเป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตเอทานอลให้บริสุทธิ์หลังผ่านกระบวนการสกัด ซึ่งในขั้นถัดไปจะเป็นการพิจารณาการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายโดยอาศัยกระบวนการกลั่น ดังนั้นก่อนจะเข้าสู่หัวข้อของ

กระบวนการกลั่นจึงได้ประเมินถึงผลลัพธ์อย่างสังเขปหลังการสกัดเพื่อประโยชน์ในการคำนวณขั้นต่อไป โดยวิธีการพิจารณานั้นจะกำหนดสมมติฐานว่าสามารถแยกเอาตัวทำละลายออกจากของผสมได้อย่างสมบูรณ์(Solvent free) ก็คือความเข้มข้นของเอทานอลจะคิดจาก เอทานอลผสมน้ำ เพียงแค่นั้น ไม่คิดตัวทำละลายเข้าไปด้วย หลังจากคำนวณแล้วจึงสรุปผลเพื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการกลั่นแยก จากการคำนวณพบว่าความบริสุทธิ์ที่ได้จากการไม่คิดปริมาณตัวทำละลายที่ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 80 และ90 โดยมวลนั้นให้ค่าใกล้เคียงกันดังนั้นจึงสรุปผลการคำนวณแล้วแสดงผลความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้ในรูปของค่าเฉลี่ย

จากการคำนวณความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้หลังการสกัดแบบไม่พิจารณาปริมาณของตัวทำละลาย พบว่าการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของพาราฟินส์ ความบริสุทธิ์ของเอทานอลหลังแยกตัวทำละลายออกหมดได้เท่ากับ ร้อยละ 97-98 โดยมวล และการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของอะโรมาติกส์ ความบริสุทธิ์ของเอทานอลหลังแยกตัวทำละลายออกหมดได้เท่ากับ ร้อยละ 94-95.5 โดยมวล การใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของแนฟทีนความบริสุทธิ์ของเอทานอลหลังแยกตัวทำละลายออกหมดได้เท่ากับ ร้อยละ 98 โดยมวล และการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของแอลกอฮอล์ความบริสุทธิ์ของเอทานอลหลังแยกตัวทำละลายออกหมดได้เท่ากับ ร้อยละ30-70 โดยมวล และพบว่าในกรณีของการใช้ พาราฟินส์ อะโรมาติกส์ และแนฟทีน นั้นการเพิ่มจำนวนคาร์บอนอะตอมของตัวทำละลายไม่ส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้สูงขึ้น ต่างจากกรณีของแอลกอฮอล์เมื่อเพิ่มจำนวนอะตอมของคาร์บอนทำให้ความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้มีค่าสูงขึ้น ในกลุ่มแอลกอฮอล์ตัวทำละลายที่ให้ค่าความเข้มข้นของเอทานอลสูงที่สุดได้แก่ เดคานอล และต่ำที่สุดได้แก่ เพนทานอล

หลังจากการจำลองกระบวนการสกัด ในความเป็นจริงการที่กำหนดสมมติฐานไว้ว่าสามารถแยกตัวทำละลายออกหมดโดยสิ้นเชิงนั้นไม่สามารถดำเนินการได้ ขั้นตอนต่อไปจึงจะพิจารณาการจำลองกระบวนการกลั่นแยกแบบซับซ้อน ดังนั้นจึงได้พิจารณาการกลั่นแยกโดยอาศัยหลักการสมดุลไอ-ของเหลวซึ่งอาจมีการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ตามที่ได้รายงานไว้ในตอนต้นและวิธีการจำลองกระบวนการกลั่นแยกที่อธิบายไปแล้วในบทก่อนหน้า จากการคำนวณการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายพบว่า ในกรณีที่มีข้อจำกัดในการแยกเอทานอลนั้นความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้จะไม่ตรงตามที่ได้กำหนดสมมุติฐานไว้จากการประเมินสมดุลไอ-ของเหลวในขั้นต้นว่าสามารถแยกตัวทำละลายออกหมด สำหรับผลของความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้จากการกลั่นแยกตามที่ได้คำนวณนั้นที่ร้อยละการสกัดต่างๆมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นจึงคิดเป็นค่าเฉลี่ยแล้วสรุปไว้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลที่ได้หลังการกลั่นแยกออกจากตัวทำละลาย

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

การแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายในกรณีของการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มพาราฟินส์ โพรเพน และ บิวเทน นั้นสามารถกลั่นแยกให้มีความบริสุทธิ์สูงถึงประมาณร้อยละ 99 โดยมวลได้ เนื่องจากในการประมาณในขั้นต้นโพรเพน และ บิวเทนนั้นไม่พบของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลาย และเมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนตั้งแต่ 5 อะตอมเป็นต้นไปพบว่ามีการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายทำให้ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นแยกได้ไม่สามารถเพิ่มให้สูงเกินกว่าความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายได้ และพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนอะตอมของคาร์บอนพบว่าความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้จะเพิ่มตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถกลั่นแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99 โดยมวลของเอทานอลได้

ในกรณีของการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของอะโรมาติกส์ พบว่าความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นแยกได้นั้นไม่สามารถกลั่นแยกให้มีความบริสุทธิ์ให้สูงถึงร้อยละ 99 โดยมวลได้ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายนั่นเอง โดยความบริสุทธิ์เอทานอลที่ได้สำหรับการใช้เบนซีนเป็นตัวทำละลายมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 28 โดยมวล และจะเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 90 โดยมวล สำหรับการใช้ไซลีนเป็นตัวทำละลาย โดยที่จำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 8 นั้น ไซลีนให้ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้สูงกว่าเอทธิลเบนซีน และเมื่อเพิ่มจำนวนอะตอมของคาร์บอนพบว่าความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ส่วนในกรณีของการใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของแนฟทีน พบว่าความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นแยกได้นั้นไม่สามารถกลั่นแยกให้มีความบริสุทธิ์ให้สูงถึงร้อยละ 99 โดยมวลได้ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายนั่นเอง โดยความบริสุทธิ์เอทานอลที่ได้สำหรับการใช้ไซโคลเพนเทนเป็นตัวทำละลายมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 8 โดยมวล และจะเพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 43 โดยมวล สำหรับการใช้เมทธิลไซโคลเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย โดยที่จำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 8 นั้น ไซโคลเฮกเซนให้ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้สูงกว่าเมทธิลไซโคลเพนเทน และเมื่อเพิ่มจำนวนอะตอมของคาร์บอนพบว่าความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

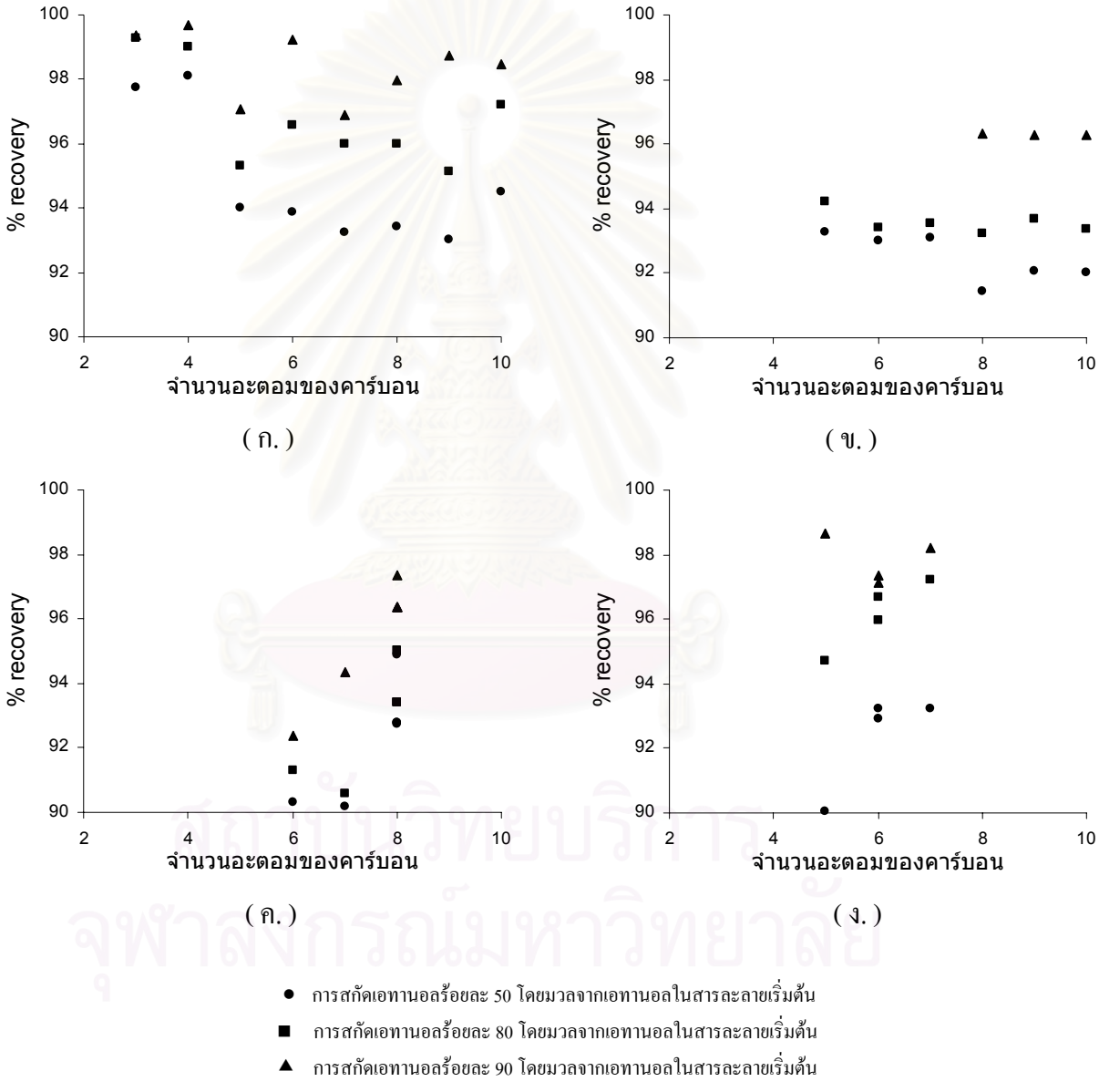
ในกลุ่มของแอลกอฮอล์นั้นความบริสุทธิ์ของเอทานอลนั้นถูกจำกัดด้วยของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับน้ำเนื่องจากปริมาณน้ำที่ปนมากับสารสกัดมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับน้ำ ทำให้การกลั่นแยกเอทานอลไม่สามารถกลั่นแยกให้มีความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 95.6 โดยมวลได้ และพบว่าในทางทฤษฎีนั้นการสามารถกลั่นเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลให้มีค่าเข้าใกล้ของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับน้ำ แต่การจำลองกระบวนการกลั่นครั้งนี้ประสบปัญหาไม่สามารถกลั่นแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์สูงไปจนใกล้ร้อยละ 95.6 โดยมวลได้ จึงทำการกลั่นแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์สูงเท่าที่สามารถทำได้ซึ่งได้ความบริสุทธิ์ของเอทานอลอยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยมวล

สรุปผลการคำนวณความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้จากการกลั่นแยกพบว่ากรณีของการใช้ตัวทำละลายแล้วสามารถกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายให้มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99 โดยมวลนั้นมี โพรเพน และ บิวเทน แต่สภาวะของกระบวนการนั้นมีการใช้ความดันของระบบสูงกว่ากรณีอื่นๆ สาเหตุที่จำเป็นต้องใช้ความดันสูงก็เนื่องจากระบบทำความเย็นนั้นใช้น้ำในการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งน้ำหล่อเย็นที่ใช้มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส ซึ่งการเพิ่มความดันของหอกลั่นจะทำให้อุณหภูมิของไอยอดหอสูงพอที่จะใช้น้ำหล่อเย็น เช่น เท่ากับ 32.07 องศา

เซลเซียสสำหรับการใช้โพรเพนเป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะมีผลต่างของอุณหภูมิระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารประมาณ 7 องศาเซลเซียส

5.6.2 ปริมาณของเอทานอลที่ได้หลังผ่านกระบวนการกลั่นแยก

หลังจากผ่านการสกัดแล้วได้สรุปถึงปริมาณของเอทานอลที่สามารถสกัดได้ด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆแล้ว ซึ่งได้นำเฟสสกัดมากลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายโดยปริมาณของเอทานอลที่สามารถกลั่นแยกได้ สามารถสรุปผลได้ดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 สัดส่วนของเอทานอลที่กลั่นแยกได้จากปริมาณของเอทานอลในสารสกัด เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

จากผลการผลิตเอทานอลจากสารละลายเอทานอลเริ่มต้นความเข้มร้อยละ 15 โดยมวลได้ความบริสุทธิ์ต่างๆขึ้นกับชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด โดยอัตราการผลิตเอทานอลที่กำหนดไว้ คือ ร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล จากสารละลายเอทานอลเริ่มต้นพบว่าอัตราการผลิตเอทานอลมีทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.6 ซึ่งในกรณีที่สูงกว่าไม่พิจารณาว่าเป็นปัญหาในการผลิต แต่กรณีที่ได้เอทานอลต่ำกว่านั้นถ้าต้องการให้ได้อัตราการผลิตตามที่ต้องการสามารถปรับเพิ่มปริมาณการใช้ตัวทำละลายได้เพื่อให้ได้อัตราการผลิตตามที่ต้องการได้

ตารางที่ 5.6 แสดงความบริสุทธิ์และปริมาณของเอทานอลที่ผลิตได้

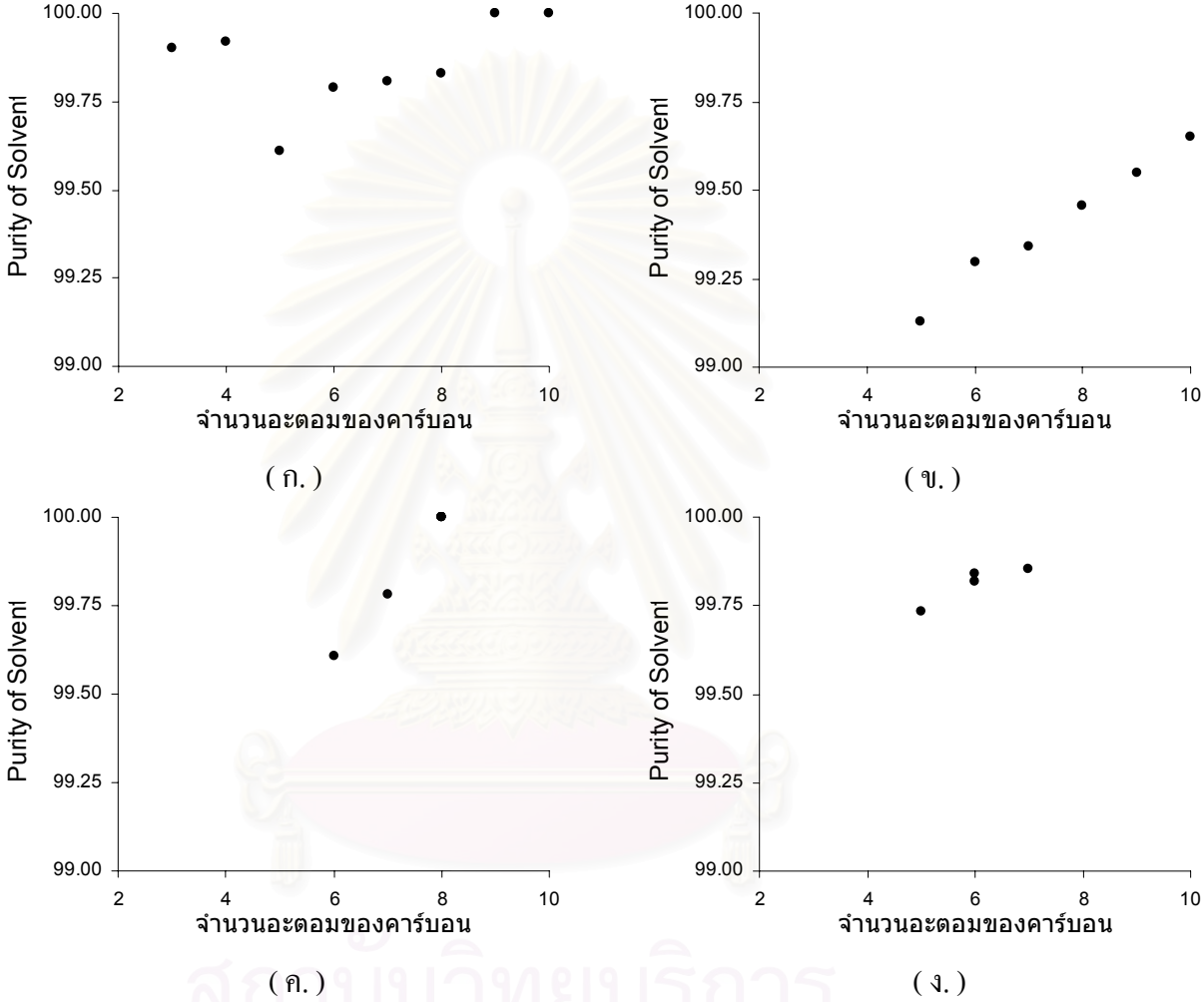
ชนิดตัวทำละลาย	% Purity of Ethanol	% Recovery of Ethanol		
		ร้อยละ 50	ร้อยละ 80	ร้อยละ 90
โพรเพน	98.97	49.93	80.12	90.22
บิวเทน	99.21	50.25	81.58	90.20
เพนเทน	5.06	53.77	82.14	90.76
เฮกเซน	20.04	50.37	82.12	89.40
เฮบเทน	41.22	54.44	82.09	90.61
ออกเทน	65.13	54.40	82.06	90.56
โนเนน	87.49	50.29	81.98	89.62
เดคเคน	95.88	50.37	81.97	90.47
เบนซีน	28.64	53.66	83.46	92.96
โทลูอีน	56.97	55.14	82.63	92.46
เมตาไซลีน	88.71	50.67	82.04	91.24
ออโธไซลีน	88.81	50.52	81.84	91.57
พาราไซลีน	88.74	50.53	81.80	91.23
เอทธิลเบนซีน	82.34	50.47	81.96	90.71
ไซโคลเพนเทน	9.16	52.17	81.93	89.86
ไซโคลเฮกเซน	28.89	50.57	82.02	90.55
เมทธิลไซโคลเพนเทน	21.72	54.68	82.02	90.55
เมทธิลไซโคลเฮกเซน	42.40	54.19	81.49	89.88
เพนทานอล	50.28	52.76	80.25	
เฮกซานอล	55.30	52.27	80.34	
เฮปทานอล	59.93	51.91	80.19	
ออกทานอล	63.66	51.70	80.21	90.47
โนนานอล	65.47	51.79	80.37	90.15
เดคานอล	67.93	49.79	80.52	90.31

* หมายเหตุ ปริมาณของเอทานอลที่ได้คิดเทียบกับสารละลายเอทานอลเริ่มต้น

สำหรับ ออกทานอล โนนานอล และเดคานอล ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวล ไม่สามารถจำลองการผลิตได้ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้า

5.6.3 ความบริสุทธิ์ของตัวทำละลายที่ย้อนกลับสู่การสกัด

เนื่องจากการกลั่นแยกเอทานอลนั้นพบว่าปริมาณเอทานอลที่กลั่นแยกออกจากตัวทำละลายนั้นไม่สามารถกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายได้ทั้งหมด ทำให้เอทานอลปนไปกับตัวทำละลายในปริมาณเล็กน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาความบริสุทธิ์ของตัวทำละลายที่จะนำกลับเข้าสู่กระบวนการอีกครั้ง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของตัวทำละลายย้อนกลับเข้าสู่หอสกัด

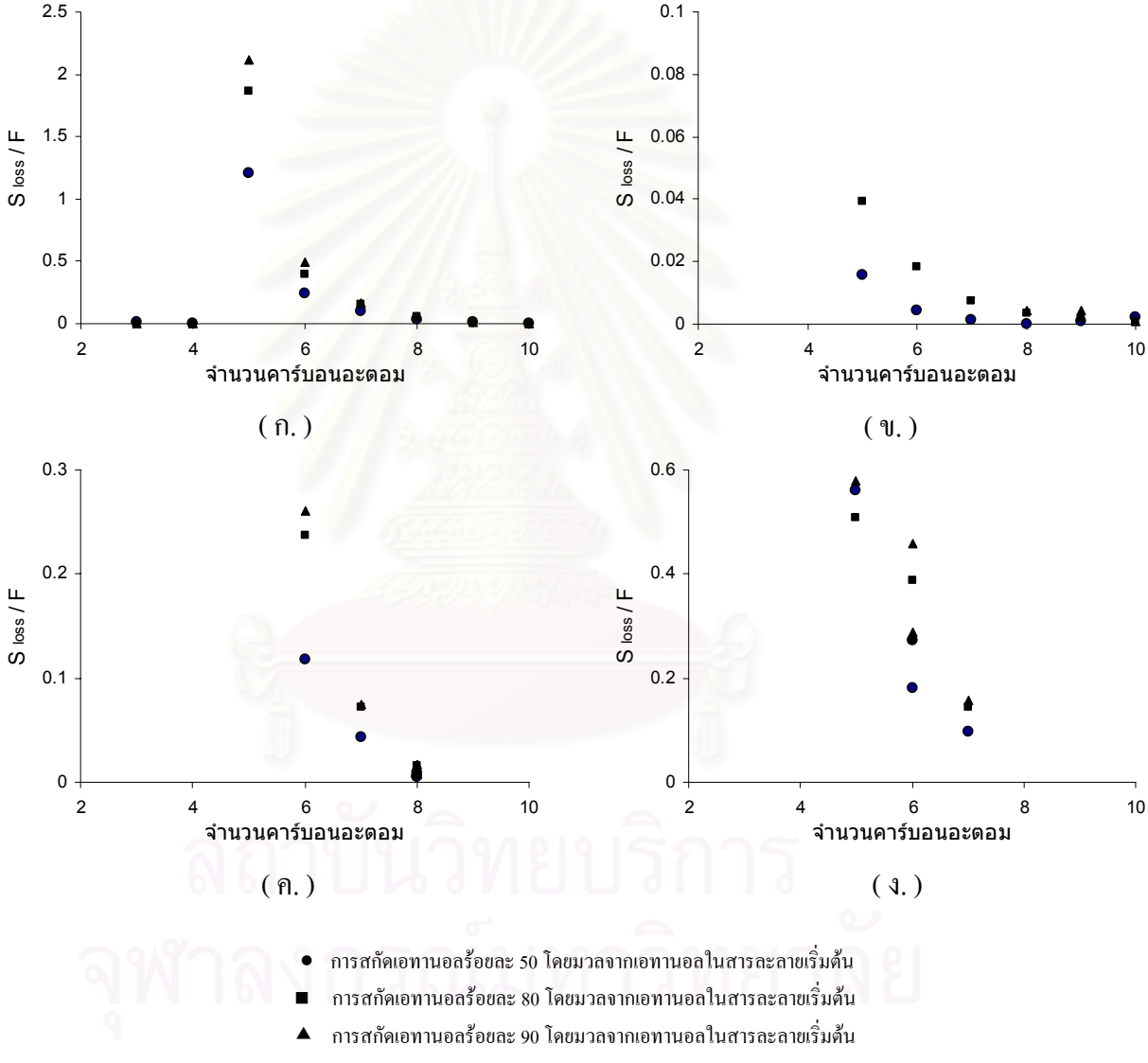
ก. ตัวทำละลายในกลุ่มพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายในกลุ่มแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายในกลุ่มอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายในกลุ่มแนฟทีน

จากผลการคำนวณพบว่าความบริสุทธิ์ของตัวทำละลายที่ย้อนกลับเข้าสู่กระบวนการสกัดนั้นมีค่าเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 99 โดยมวลของตัวทำละลาย ซึ่งการที่จะตัวทำละลายกลับเข้าสู่กระบวนการสกัดอีกครั้งนั้นจำเป็นต้องทำให้ตัวทำละลายมีความบริสุทธิ์สูงซึ่งจากผลการคำนวณสามารถนำตัวทำละลายกลับเข้าสู่กระบวนการสกัดได้แต่อาจจะต้องมีการผสมตัวทำละลายเข้าไปเพิ่มบางส่วนเนื่องจากมีการสูญเสียตัวทำละลายไปกับเอทานอลที่ได้จากการกลั่น

5.6.4 ปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องสูญเสียจากการกลั่นแยกเอทานอล

เนื่องจากปริมาณตัวทำละลายนั้นมีการสูญเสียออกจากระบบ 2 ทางด้วยกันคือจากการสกัดและจากการกลั่นโดยปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับการสกัดนั้นได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นซึ่งมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่สูญเสียไปจากการกลั่น แต่การพิจารณาชดเชยปริมาณตัวทำละลายนั้นต้องพิจารณา 2 ส่วนประกอบกัน ซึ่งผลการชดเชยตัวทำละลายสำหรับตัวทำละลายต่างๆนั้นได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 สัดส่วนของตัวทำละลายที่สูญเสียจากการกลั่นต่อปริมาณสารละลายเริ่มต้นเมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการชดเชยปริมาณตัวทำละลายเมื่อใช้ตัวทำละลายในกลุ่ม พาราฟินส์ พบว่า สัดส่วนของตัวทำละลายต่อสารละลายเริ่มต้นที่ต้องชดเชยมีค่าไม่เกิน 2.5 โดยเมื่อความบริสุทธ์ของเอทานอลที่กลั่นได้มีความบริสุทธิ์สูง ปริมาณตัวทำละลายที่ต้องชดเชยจะน้อย เช่น กรณีการใช้โพรเพนและบิวเทนเป็นตัวทำละลายพบว่าปริมาณตัวทำละลายที่ชดเชยนั้นต้องใช้ปริมาณต่ำมากเพราะเอทานอลที่กลั่นได้มีความบริสุทธิ์สูงมาก ส่วนเมื่อกลั่นเอทานอลได้ความบริสุทธิ์ต่ำ ปริมาณตัวทำละลายที่ต้องชดเชยก็จะสูง เช่น กรณีการใช้เพนเทนเป็นตัวทำละลายพบว่าปริมาณตัวทำละลายที่ชดเชยนั้นต้องใช้ปริมาณสูงมากเพราะเอทานอลที่กลั่นได้มีความเข้มข้นต่ำมาก และพบอีกว่าเมื่อการสกัดนั้นใช้ปริมาณตัวทำละลายมากขึ้นปริมาณตัวทำละลายที่อยู่ในสารสกัดซึ่งเข้าสู่หอกลั่นก็จะสูงขึ้นตามลำดับทำให้เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการสกัดเอทานอล 50 80 และ 90 โดยมวลนั้นปริมาณตัวทำละลายที่ต้องชดเชยจะมากขึ้นตามลำดับ

จากผลการคำนวณพบว่ากรณีการใช้ อะโรมาติกส์ พบว่าสัดส่วนของตัวทำละลายต่อสารละลายเริ่มต้นที่ต้องชดเชยมีค่าไม่เกิน 0.3 กรณีการใช้ แนฟทีน พบว่าสัดส่วนของตัวทำละลายต่อสารละลายเริ่มต้นที่ต้องชดเชยมีค่าไม่เกิน 0.6 กรณีการใช้แอลกอฮอล์พบว่าสัดส่วนของตัวทำละลายต่อสารละลายเริ่มต้นที่ต้องชดเชยมีค่าไม่เกิน 0.08

จากผลการคำนวณปริมาณการชดเชยตัวทำละลายเมื่อใช้ตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิดให้ผลใกล้เคียงกันคือ เมื่อการกลั่นได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง ปริมาณตัวทำละลายที่ต้องชดเชยการสูญเสียจะต่ำ และเมื่อการกลั่นได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ ปริมาณตัวทำละลายที่ต้องชดเชยการสูญเสียจะสูง

5.6.5 การนำเอทานอลที่เหลือจากการสกัดกลับเข้าสู่การสกัดใหม่

หลังการสกัดเอทานอลออกจากน้ำด้วยตัวทำละลายแล้วนอกจากกระบวนการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายแล้วยังต้องพิจารณาถึงปริมาณเอทานอลที่เหลือจากการสกัดซึ่งพบว่าปริมาณเอทานอลที่เหลือจากการสกัดในกรณีของร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวลนั้นปริมาณเอทานอลที่เหลือในเฟสของน้ำยังมีปริมาณมากพอ จึงพิจารณาให้มีการนำเอทานอลกลับไปใช้ในการสกัดอีกครั้ง ซึ่งก่อนการนำเอทานอลกลับไปใช้ในการสกัดอีกครั้งนั้น จึงได้ทำการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลให้มีความเข้มข้นสูงขึ้นด้วยหอสตริปเปอร์ให้มีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นของเอทานอลเริ่มต้น ซึ่งจากการคำนวณพบว่าจำนวนขั้นสมดุลในการเพิ่มความเข้มข้นให้กับเอทานอลที่ใช้นั้นเท่ากันทุกระบบคือ 5 ขั้นสมดุล แต่จะแตกต่างกันตรงปริมาณการใช้พลังงานซึ่งจะได้สรุปในหัวข้อต่อไป ส่วนในกรณีของร้อยละการสกัดเอทานอล 80 และ 90โดยมวลนั้นเอทานอลที่เหลืออยู่ในเฟสของน้ำหลังการสกัดนั้นมีปริมาณน้อยจึงไม่พิจารณาให้มีการนำเอทานอลกลับมาใช้ในการสกัดใหม่อีกครั้งเนื่องจากการนำเอทานอลกลับมาใช้ในการสกัดอีกครั้งต้องสิ้นเปลืองทั้งค่าใช้จ่ายในเรื่องของพลังงานและค่าอุปกรณ์

5.7 ผลการประเมินพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการ

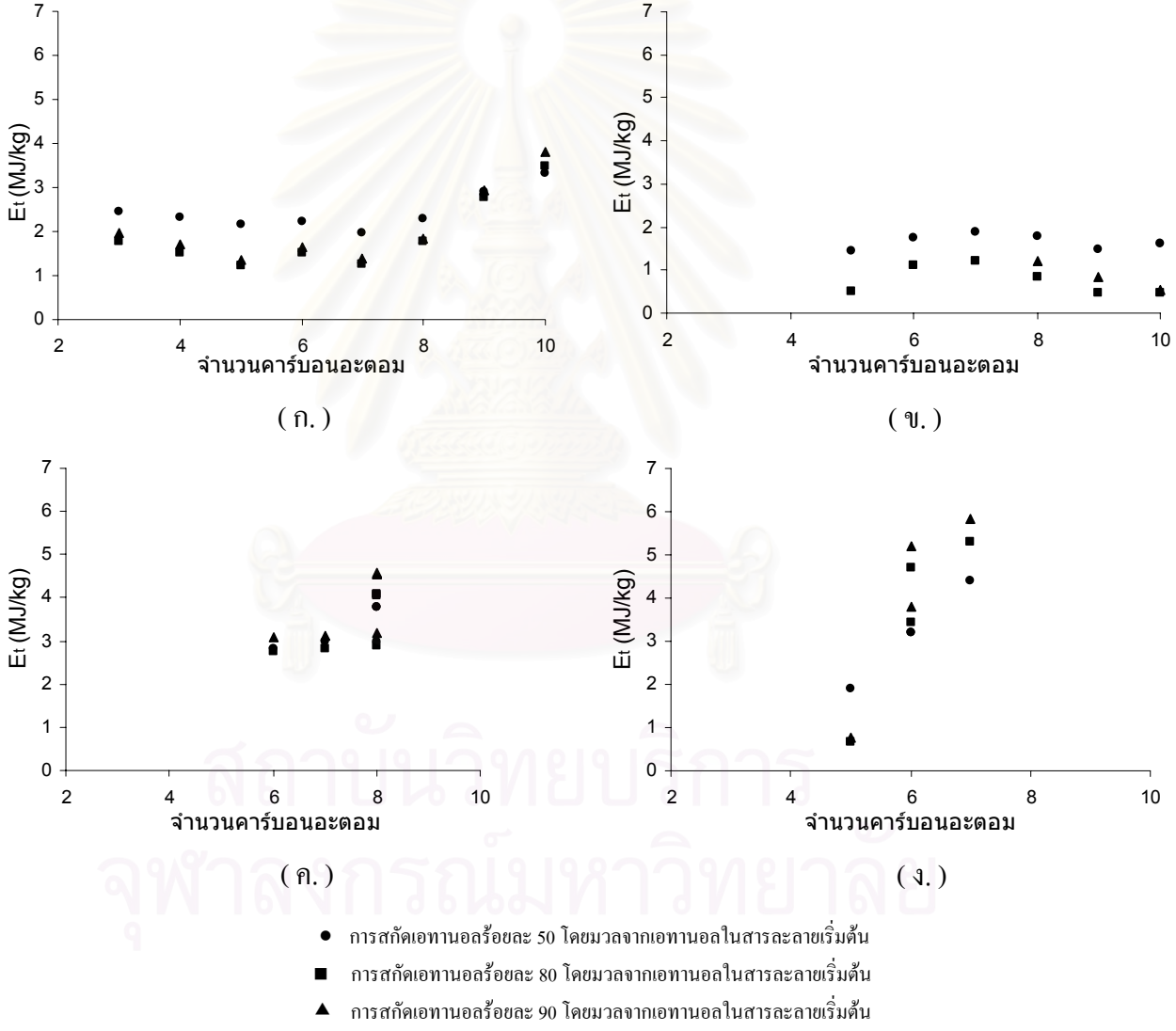
จากการจำลองกระบวนการแยกเอทานอลนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการแยกเอทานอลนั้นประกอบด้วย พลังงานสำหรับการกลั่น พลังงานสำหรับการเพิ่มลดความดัน พลังงานสำหรับการเพิ่มลดอุณหภูมิ พลังงานสำหรับการควบแน่น เป็นต้น โดยพลังงานสำหรับกระบวนการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้ คือ พลังงานที่ต้องให้กับกระบวนการ และ พลังงานที่ต้องดึงออกจากกระบวนการ สำหรับการพิจารณาพลังงานของกระบวนการจะแบ่งพิจารณาทีละส่วน สำหรับพลังงานที่ต้องให้จะพิจารณาดังนี้ พลังงานความร้อนที่ต้องให้กับหอกลั่น พลังงานความร้อนที่ต้องให้กับหอสตริปเปอร์ และพลังงานรูปอื่นๆ เช่น งานที่ต้องให้กับปั้มในการเพิ่มความดันของระบบ เป็นต้น พลังงานที่ออกจากกระบวนการจะพิจารณาดังนี้ พลังงานที่ต้องดึงออกจากหอกลั่น พลังงานที่ต้องดึงออก ณ คอนเดนเซอร์ที่แยกจากหอกลั่น พลังงานที่ต้องดึงออก ณ อุปกรณ์ทำความเย็น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.7.1 พลังงานที่ต้องให้กับกระบวนการ

หลังจากประเมินการใช้พลังงานทั้งหมดสำหรับกระบวนการสกัดและแยกเอทานอล พลังงานที่ต้องให้กระบวนการประกอบด้วย พลังงานความร้อนที่ต้องให้กับหอกลั่น พลังงานความร้อนที่ต้องให้กับหอสตริปเปอร์ งานที่ต้องให้กับปั๊ม ซึ่งได้ผลดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

- พลังงานทั้งหมดที่ต้องให้กับกระบวนการคือผลรวมของพลังงานทั้งหมดที่ต้องให้กระบวนการ และเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าสำหรับการสกัดเอทานอลร้อยละ 80และ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น เมื่อใช้ปริมาณตัวทำละลายมากขึ้นพลังงานของกระบวนการจะมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.12



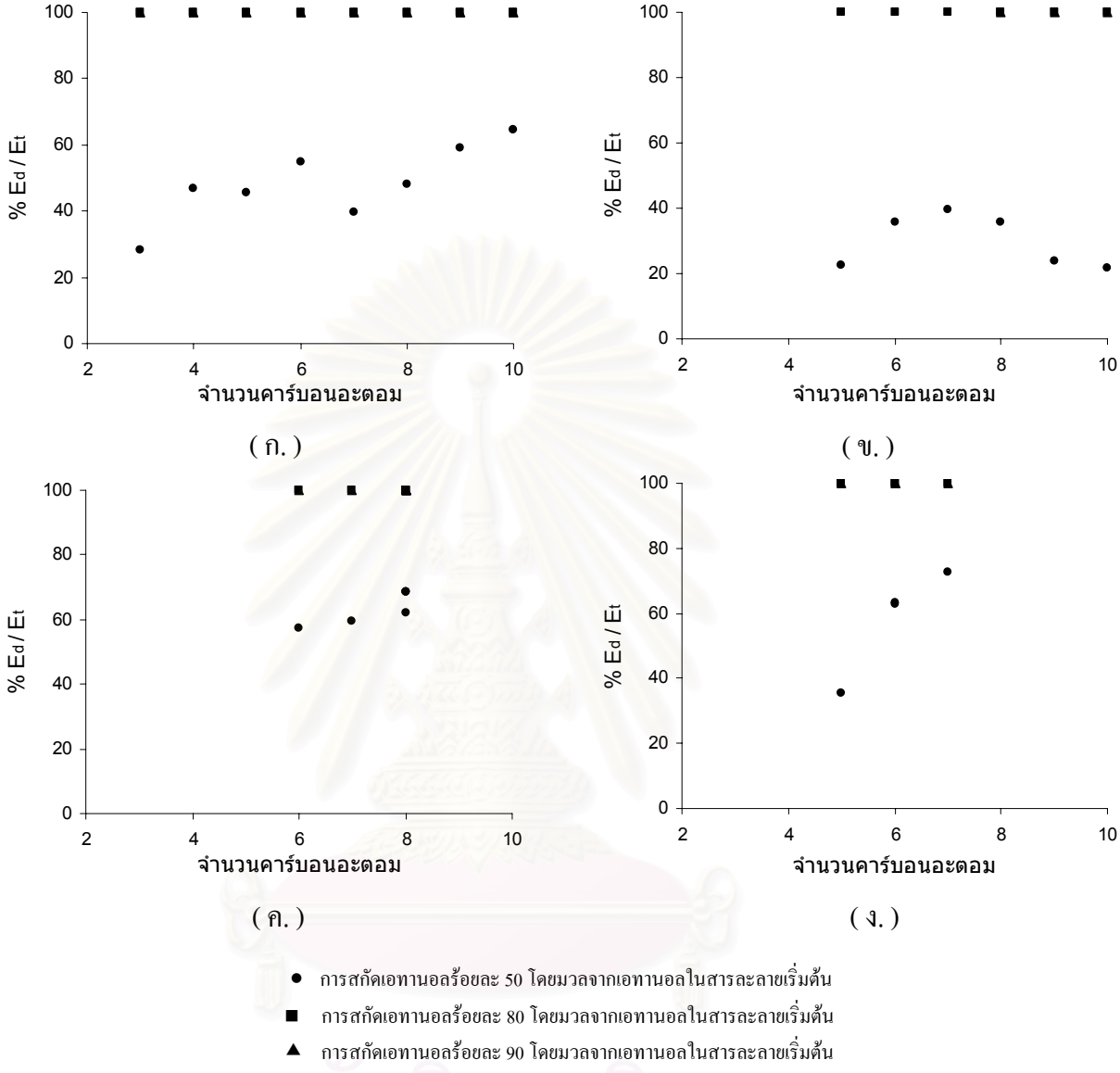
รูปที่ 5.12 พลังงานทั้งหมดที่ต้องให้กับกระบวนการต่อมวลของสารละลายเริ่มต้น เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- พลังงานที่ต้องให้สำหรับหอกลั่น



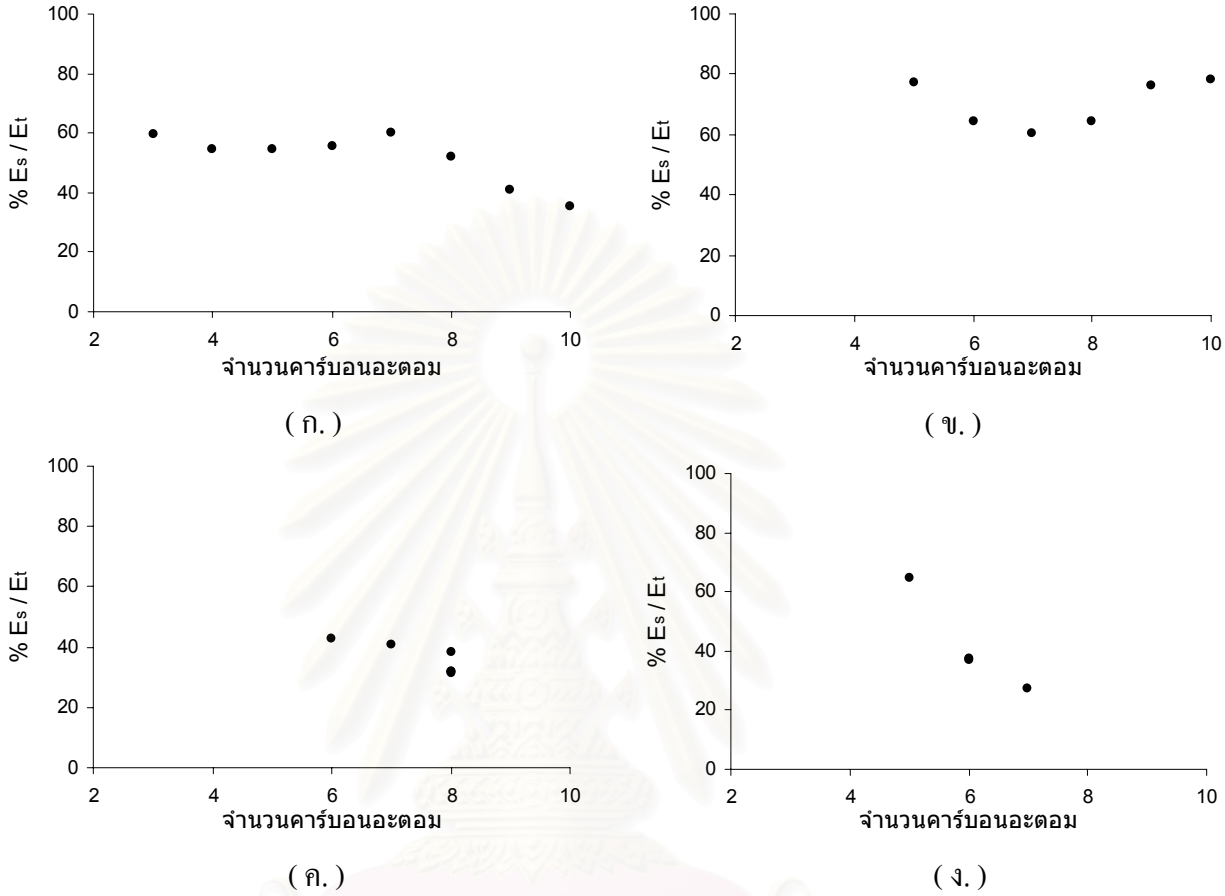
รูปที่ 5.13 ร้อยละของพลังงานความร้อนที่ต้องให้สำหรับการกลั่น ณ หอกลั่น ต่อ พลังงานรวมของทั้งกระบวนการ เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

จากรูปที่ 5.13 เมื่อพิจารณาถึงปริมาณพลังงานที่ต้องให้สำหรับหอกลั่นในกรณีของ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 และ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ปริมาณพลังงานที่ต้องให้หอกลั่นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ต้องให้กระบวนการ พบว่า พลังงานสำหรับการกลั่นเป็นพลังงานโดยส่วนใหญ่สำหรับกระบวนการ แต่สำหรับ การสกัดเอทานอลร้อย

ละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้นพลังงานที่ต้องให้สำหรับกระบวนการยังประกอบไปด้วยพลังงานที่ต้องให้สำหรับหอสตริปเปอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ร้อยละของพลังงานความร้อนที่ต้องให้สำหรับหอสตริปเปอร์ ต่อ พลังงานรวมของทั้งกระบวนการ ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น

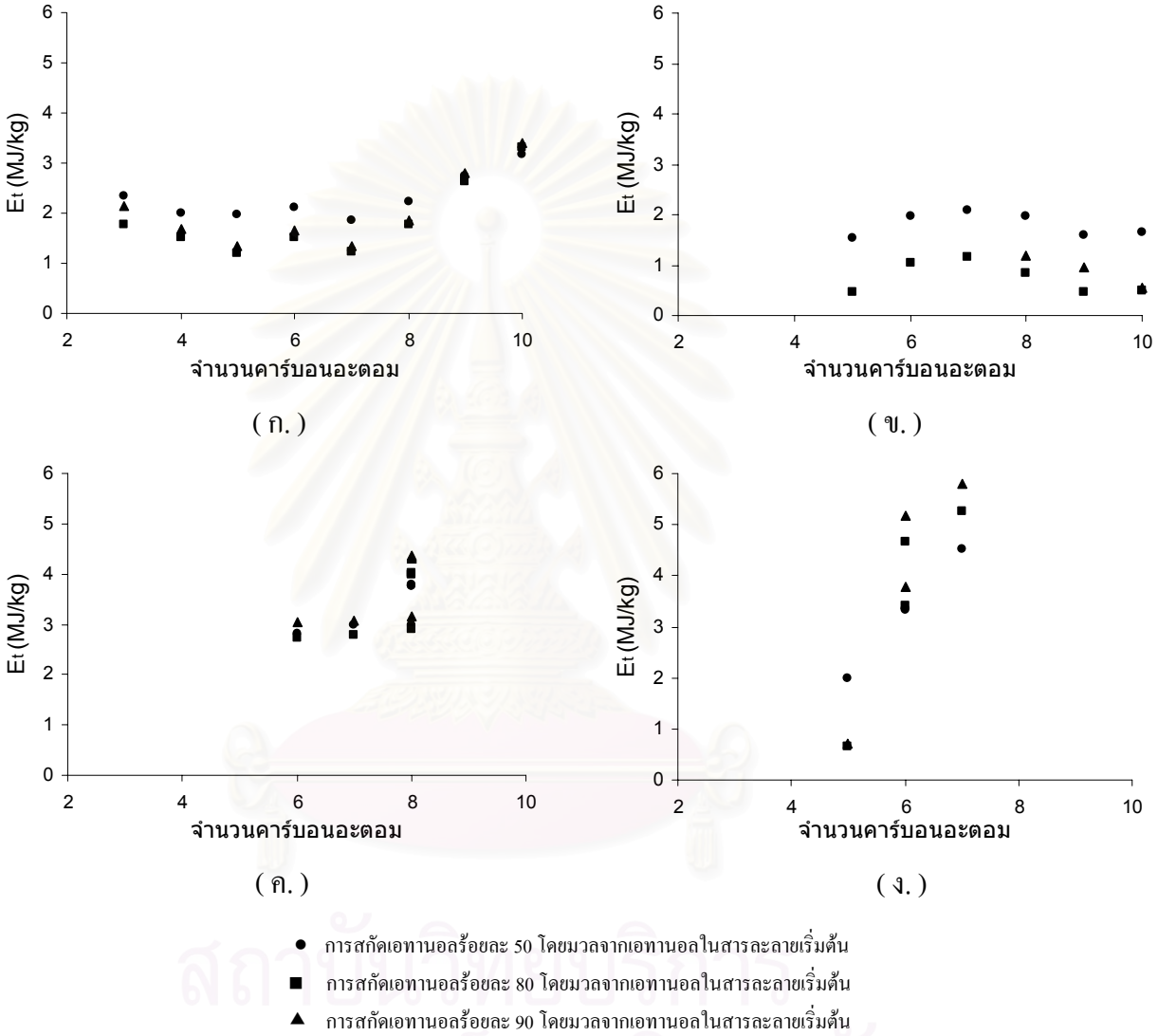
ก. ตัวทำละลายในกลุ่มพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายในกลุ่มแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายในกลุ่มอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายในกลุ่มแนฟทีน

จากผลการจำลองกระบวนการสกัดแยกเอทานอล พลังงานในส่วนของพลังงานความร้อนที่ต้องให้กับหอกลั่นและหอสตริปเปอร์ เป็นพลังงานเกือบทั้งหมดที่ต้องให้กับกระบวนการ นอกจากพลังงานที่ต้องให้ในรูปของพลังงานความร้อนแล้วยังต้องให้พลังงานกับกระบวนการในรูปของพลังงานอื่น เช่น พลังงานที่ให้กับปั๊มสำหรับเพิ่มความดัน แต่เมื่อพิจารณาเทียบกับพลังงานรวมทั้งระบบพบว่าพลังงานที่ใช้สำหรับการเพิ่มความดันน้อยกว่าพลังงานความร้อนมากซึ่งเมื่อคิดเป็นร้อยละแล้วพบว่าไม่ถึงร้อยละ 1 ของพลังงานรวมทั้งกระบวนการ

5.7.2 พลังงานที่ต้องดึงออกจากกระบวนการ

พลังงานที่ดึงออกจากกระบวนการนั้นเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมดโดยแบ่งเป็นพลังงานความร้อน ณ หอกลั่น พลังงานความร้อน ณ หอควบแน่น พลังงานความร้อน ณ อุปกรณ์ทำความเย็น (ซึ่งสามารถดูแผนผังกระบวนการผลิตได้จากบทที่ 4) ดังแสดงในรูปที่ 5.15



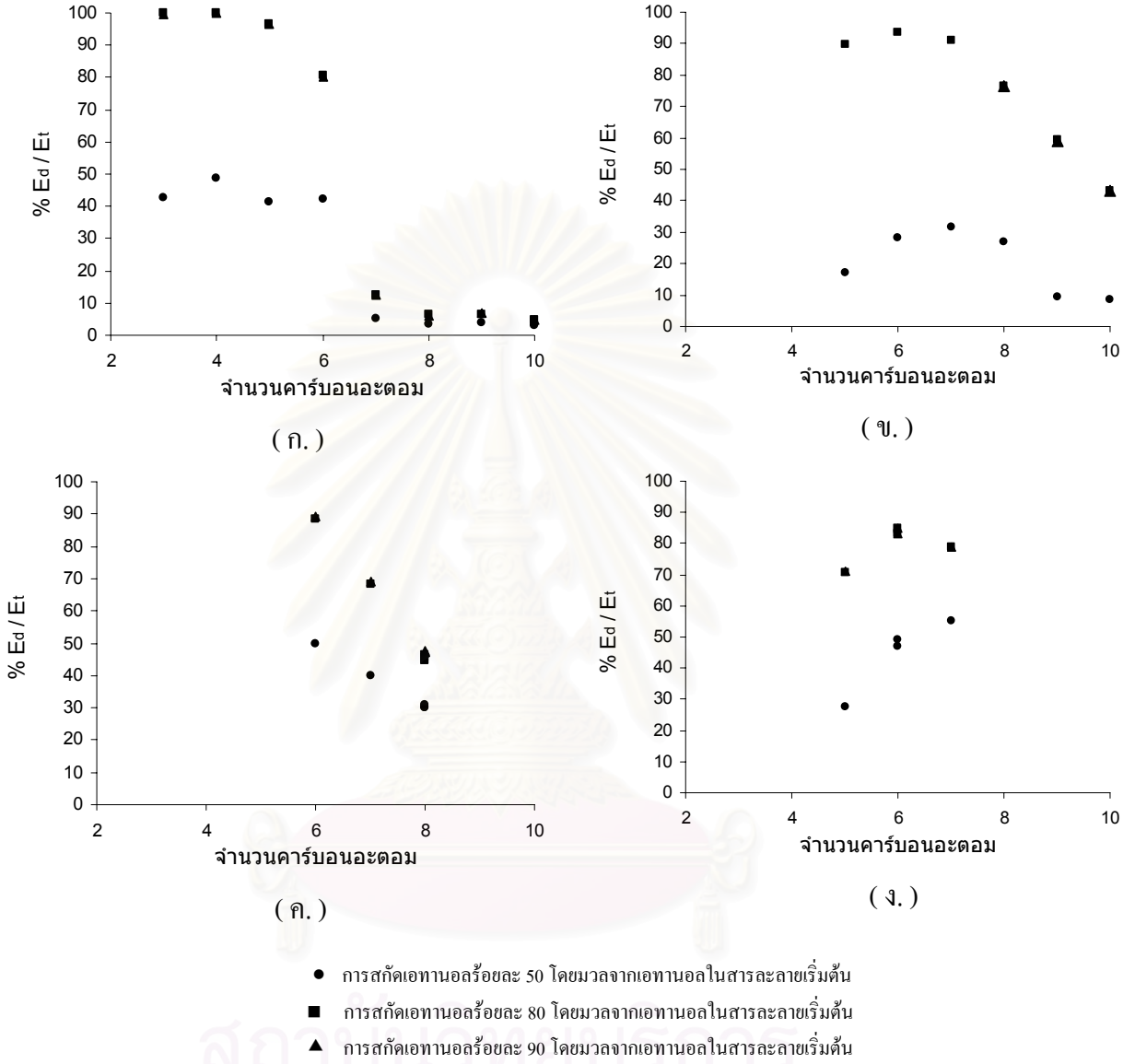
รูปที่ 5.15 พลังงานที่ต้องดึงออกจากกระบวนการต่อมวลของสารละลายเริ่มต้น เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

ปริมาณพลังงานรวมที่ดึงออกจากกระบวนการพบว่าใกล้เคียงกับพลังงานที่ให้กับกระบวนการ โดยพลังงานแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้ พลังงานสำหรับการควบแน่นของหอกลั่น พลังงาน

สำหรับการควบแน่น ณ หอควบแน่น พลังงานในการลดอุณหภูมิ สำหรับพลังงานที่ดึงออกจากหอกลั่น แสดงดังรูปที่ 5.16

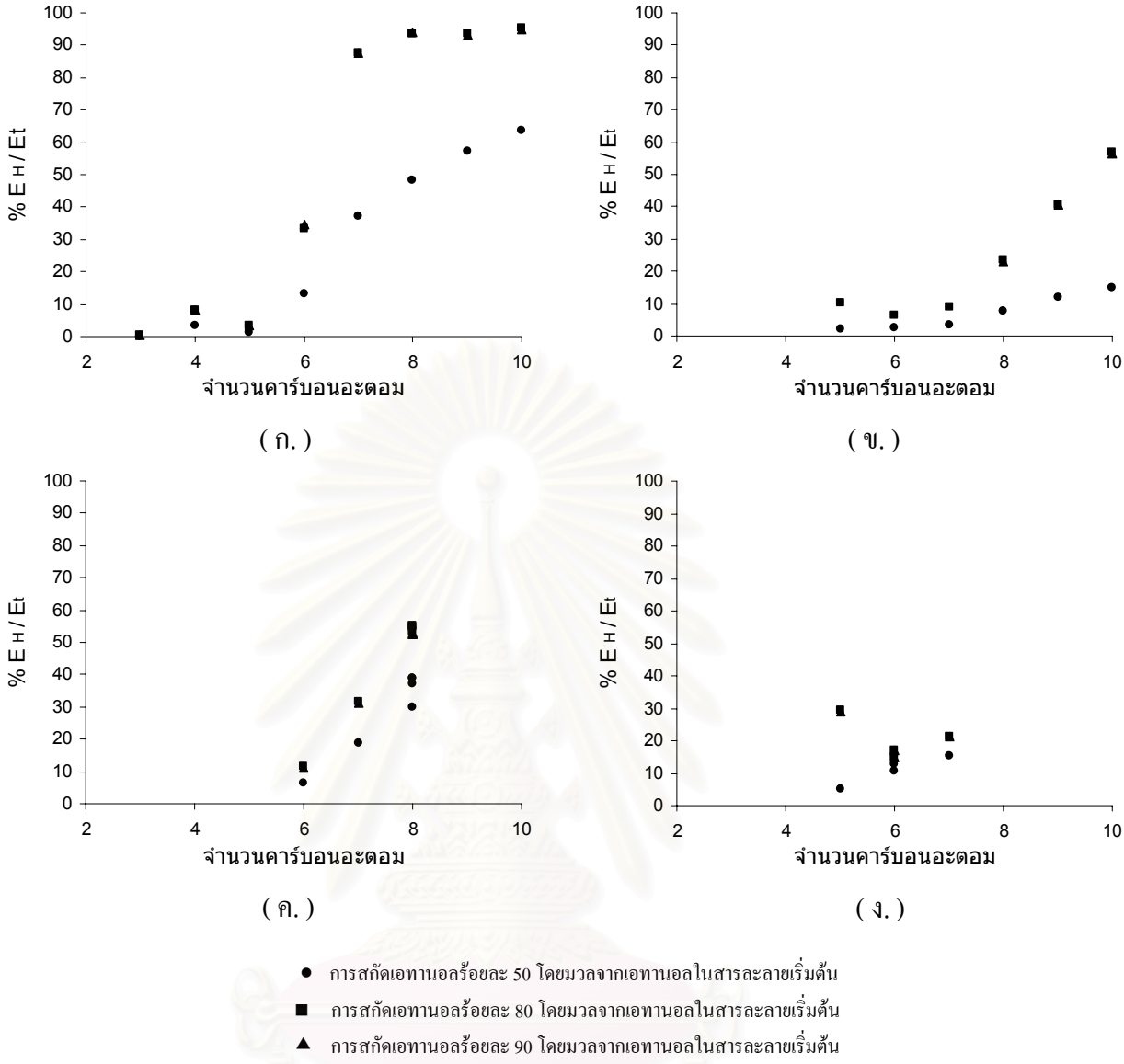


รูปที่ 5.16 ร้อยละของพลังงานที่ต้องดึงออกจากหอกลั่นต่อพลังงานรวมที่ต้องดึงออกทั้งหมด เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

เมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานที่ดึงออกจากหอกลั่นพบว่ายังมีพลังงานอื่นอยู่อีกส่วนหนึ่งนั่นคือพลังงานที่ต้องดึงออกจากหน่วยลดอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5.17

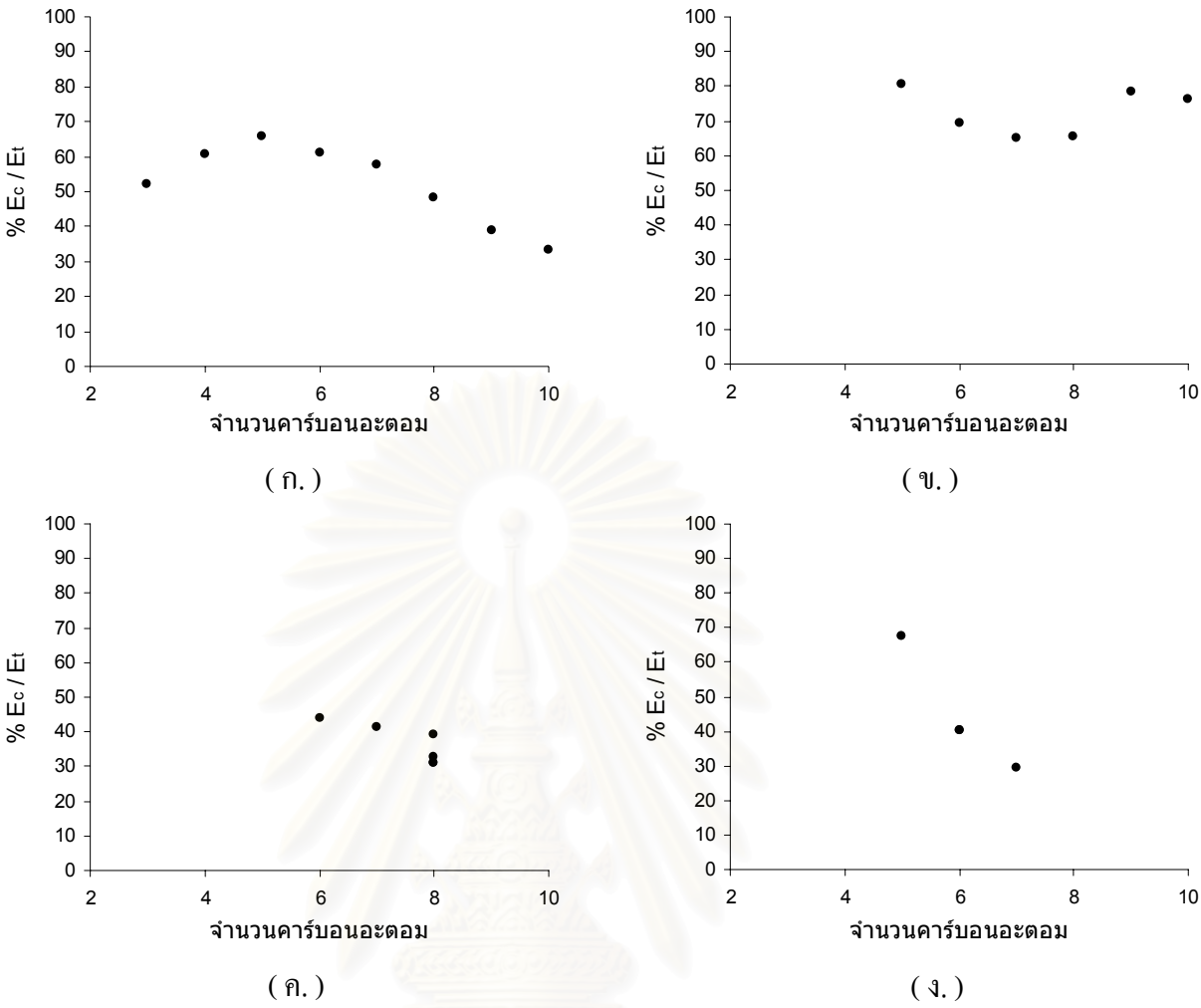


รูปที่ 5.17 ร้อยละของพลังงานที่ต้องดึงออกจากหน่วยลดอุณหภูมิต่อพลังงานรวมที่ต้องดึงออกทั้งหมด เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวล

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

เมื่อพิจารณาการสกัดเอทานอลร้อยละ 80 และ 90 พบว่าพลังงานรวมทั้งสองส่วนเป็นพลังงานทั้งหมดของกระบวนการ แต่สำหรับกระบวนการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้นพบว่า ยังมีพลังงานสำหรับการควบแน่นเอทานอลหลังทำการเพิ่มความบริสุทธิ์ ณ หอสตริปเปอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ร้อยละของพลังงานที่ต้องดึงออกจากหอควบแน่นต่อพลังงานรวมที่ต้องดึงออกทั้งหมด ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น

ก. ตัวทำละลายพาราฟินส์ ข. ตัวทำละลายแอลกอฮอล์

ค. ตัวทำละลายอะโรมาติกส์ ง. ตัวทำละลายแนฟทีน

สรุปพลังงานที่ให้กับกระบวนการแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. พลังงานที่ต้องให้กับกระบวนการ ซึ่งประกอบด้วยพลังงาน 3 ส่วน ได้แก่ พลังงานความร้อนที่ให้กับหอกลั่น พลังงานความร้อนที่ให้กับหอสตริปเปอร์ และพลังงานที่ให้กับปั๊ม ตามลำดับ

2. พลังงานที่ต้องดึงออกจากกระบวนการ ซึ่งประกอบด้วยพลังงาน 3 ส่วน ได้แก่ พลังงานที่ต้องดึงออกจากหอกลั่น พลังงานที่ต้องดึงออกจากหอทำความเย็น และพลังงานที่ต้องดึงออกจากหอควบแน่น

5.8 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายผสม

หลังจากสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์แล้วได้พบว่าในการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์นั้นมีปัญหาในการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย คือไม่สามารถแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99 โดยมวล ยกเว้นกรณีของการใช้โพรเพนและบิวเทน เนื่องจากการเกิดของของผสมจุดเดือดคงที่จึงได้พิจารณาเลือกตัวทำละลายซึ่งเป็นตัวทำละลายผสมซึ่งเมื่อมีองค์ประกอบของสารในระบบมากกว่า 3 ขึ้นไปยังไม่พบว่ามีการรายงานการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ดังนั้นจึงช่วยแก้ปัญหาในการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย อีกทั้งตัวทำละลายบริสุทธิ์ เช่น พาราฟินส์ อะโรมาติกส์ และแนฟทีน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นแยกในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมซึ่งไม่นิยมผลิตให้บริสุทธิ์สูงเนื่องจากโดยปกติจะผลิตเป็นสัดส่วนของสารต่างๆ ดังนั้นการหาตัวทำละลายที่เป็นตัวทำละลายผสมนั้นสามารถหาได้ง่ายและยังแก้ปัญหาในเรื่องของผสมจุดเดือดคงที่จึงได้ทำการคำนวณกระบวนการแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายผสม

โดยตัวทำละลายผสมที่เลือกใช้ประกอบด้วย ก๊าซปิโตรเลียมเหลว(LPG) ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างโพรเพนและบิวเทนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งผสมกันในสัดส่วนต่างๆตั้งแต่ ร้อยละ 10 – 90 โดยมวลของโพรเพน ของผสมระหว่างพาราฟินส์ อะโรมาติกส์ และแนฟทีน ซึ่งเป็นตัวแทนของสารในกลุ่มต่างๆดังกล่าวที่ผสมรวมกันเป็นรีฟอร์เมต (Reformate) และผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นของเหลวที่ได้จากการแยกก๊าซธรรมชาตินั่นคือ คอนเดนเสต

5.8.1 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลว

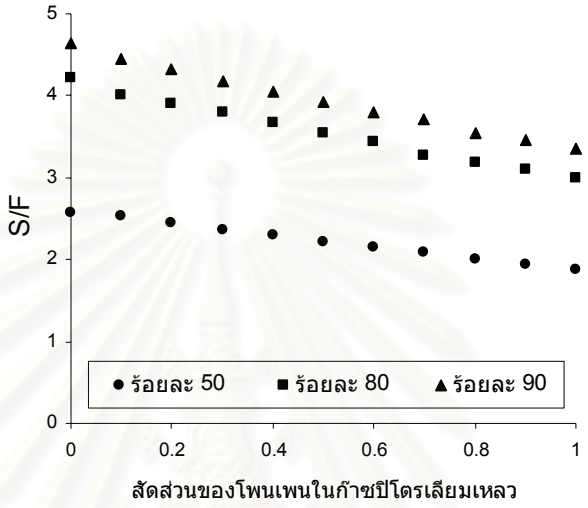
เนื่องจากก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ใช้ในกระบวนการสกัดเอทานอลนั้นมีค่าสัดส่วนระหว่างโพรเพนและบิวเทนต่างกัน ดังนั้นตัวแปรต้นที่จะทำการศึกษาคือ สัดส่วนของโพรเพนในก๊าซปิโตรเลียมเหลว ซึ่งการพิจารณาผลสามารถสรุปได้ดังนี้

5.8.1.1 ปริมาณของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ใช้ในการสกัด

จากการคำนวณการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในส่วนของโพรเพนและบิวเทนพบว่า สามารถสกัดเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99 โดยมวล ดังนั้นจึงทำการศึกษาก๊าซปิโตรเลียมเหลวซึ่งเป็นของผสมที่ประกอบด้วยโพรเพนและบิวเทน โดยปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.19

จากผลการคำนวณพบว่าสัดส่วนของปริมาณตัวทำลายที่ใช้ต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้นในกระบวนการสกัดเอทานอลนั้นมีค่าดังนี้ สำหรับกรณีของบิวเทนบริสุทธิ์นั้นปริมาณการใช้ตัวทำละลายมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของสารละลายเอทานอลเริ่มต้น และกรณีของผสมเมื่อสัดส่วนของโพรเพนในก๊าซปิโตรเลียมเหลวสูงขึ้นพบว่าทำให้สัดส่วนของปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ต่อสารละลายเอทา

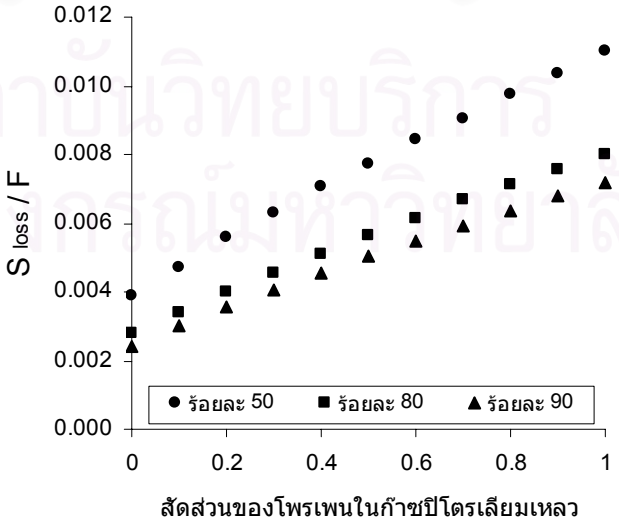
นอลเริ่มต้นลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากกรณีของการใช้โพรเพนและบิวเทนบริสุทธิ์ สัดส่วนของตัวทำละลายเมื่อใช้โพนเพนน้อยกว่ากรณีของบิวเทน ดังนั้นการที่ของผสมมีสัดส่วนของโพรเพนสูงขึ้นจึงทำให้ปริมาณการใช้ตัวทำละลายต่ำลง โดยสัดส่วนตัวทำละลายต่อสารตั้งต้นมีค่าอยู่ระหว่างกรณีการใช้โพนเพนและบิวเทน สำหรับการเพิ่มปริมาณการสกัดเอทานอลให้สูงขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของตัวทำละลายที่ต้องใช้ต่อสารตั้งต้นสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5.19 สัดส่วนของปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้น

5.8.1.2 ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัด

เนื่องจากการสกัดเอทานอลอาจมีตัวทำละลายบางส่วนที่ละลายเข้าไปในเฟสของน้ำ ซึ่งต้องนำมาพิจารณาเพื่อการชดเชยการสูญเสียตัวทำละลายออกจากกระบวนการ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.20

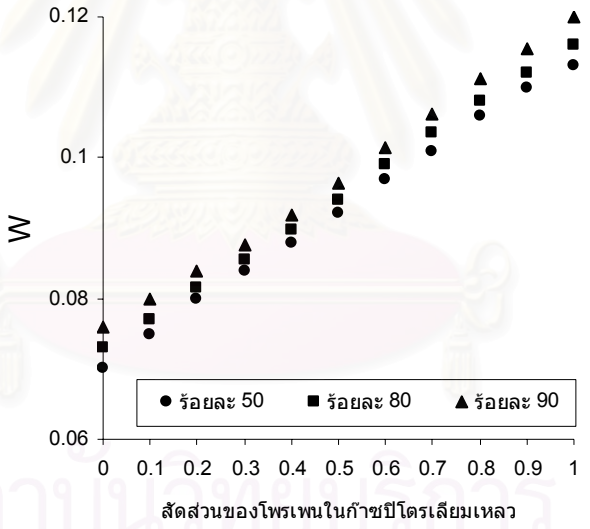


รูปที่ 5.20 ปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำ

จากการพิจารณาพบว่าสัดส่วนของตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำต่อปริมาณสารละลายเริ่มต้น มีค่าดังนี้คือ การใช้บิวเทนบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลายตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัดมีค่าประมาณ 0.002 และเมื่อสัดส่วนของโพรเพนในกาซปิโตรเลียมเหลวสูงขึ้นปริมาณการสูญเสียจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนเท่ากับ 0.011 สำหรับการใช้โพรเพนบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากโพรเพนนั้นสามารถละลายเข้ากับน้ำได้ดีกว่าบิวเทนเนื่องจากสภาพความมีขั้วสูงกว่าบิวเทน และเมื่อปริมาณการสกัดเอทานอลสูงขึ้นปริมาณตัวทำละลายที่ใช้มากขึ้น แต่ปริมาณตัวทำละลายที่หายไปกลับลดลงทั้งนี้เนื่องจากปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเอทานอลที่คงเหลือในน้ำ

5.8.1.3 ปริมาณน้ำที่ปนเข้ามาในก๊าซปิโตรเลียมเหลว

จากการสกัดเอทานอลนอกจากทราบปริมาณเอทานอลที่สกัดได้ สิ่งที่ต้องพิจารณาอีกคือปริมาณน้ำที่ปนมากับตัวทำละลาย เพื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการกลั่นแยกขั้นต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 5.21

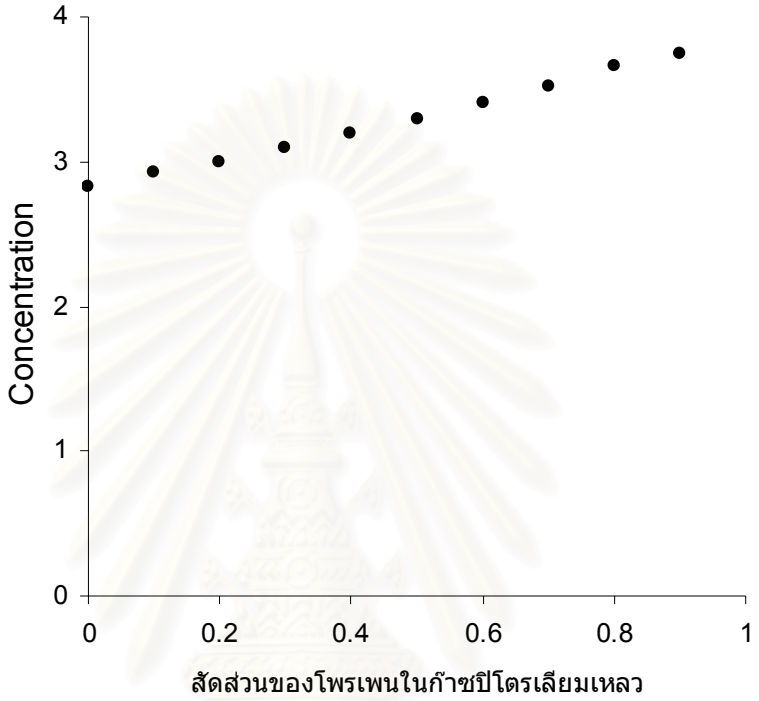


รูปที่ 5.21 ปริมาณน้ำที่ปนในสารสกัด(ร้อยละโดยมวล) สำหรับการสกัดด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลว

สัดส่วนของปริมาณที่ปนน้ำในสารสกัดมีค่าดังนี้คือ การใช้บิวเทนบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลายปริมาณน้ำที่ปนในสารสกัดมีค่าประมาณร้อยละ 0.07 โดยมวล และเมื่อสัดส่วนของโพรเพนในก๊าซปิโตรเลียมเหลวสูงขึ้นปริมาณน้ำที่ปนในสารสกัดจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนเท่ากับ ร้อยละ 0.12 โดยมวล สำหรับการใช้โพรเพนบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลาย และเมื่อปริมาณการใช้ตัวทำละลายสูงขึ้นเพราะต้องการสกัดเอทานอลให้ได้ปริมาณมากขึ้น ทำให้สัดส่วนของน้ำที่ปนกับตัวทำละลายสูงขึ้นไปด้วย

5.8.1.4 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลในสารสกัด

ผลการคำนวณความบริสุทธิ์พบว่า การสกัดเอทานอลด้วยก๊าซปิโตรเลียมที่มีสัดส่วนของโพรเพนเท่ากัน ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 80 และ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ได้ค่าใกล้เคียงกันมากจึงได้คิดเป็นค่าเฉลี่ย ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลในสารสกัด (ร้อยละโดยมวล) สำหรับการสกัดด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลว

ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลในสารสกัดมีค่าดังนี้ สำหรับการใช้บิวเทนบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลายความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลในสารสกัด มีค่าประมาณร้อยละ 2.5 โดยมวล และเมื่อสัดส่วนของโพรเพนในก๊าซปิโตรเลียมเหลวสูงขึ้นความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลในสารสกัด จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนเท่ากับ ร้อยละ 4 โดยมวล สำหรับการใช้โพรเพนบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลาย

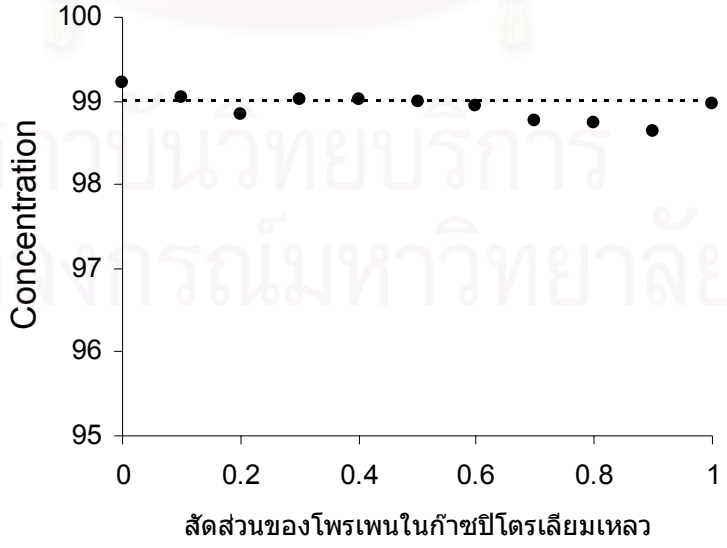
5.8.1.5 การกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย

เนื่องจากเอทานอลที่สกัดได้ด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลวนั้นมีความบริสุทธิ์ไม่สูงตามที่ต้องการดังนั้นจึงต้องอาศัยกระบวนการกลั่นแยกเอทานอลออกจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว โดยหอกลั่นที่ใช้ในการกลั่นแยกมีองค์ประกอบต่างกันเมื่อใช้สัดส่วนของโพรเพนและบิวเทนต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 แสดงองค์ประกอบของหอกลั่นกรณีการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

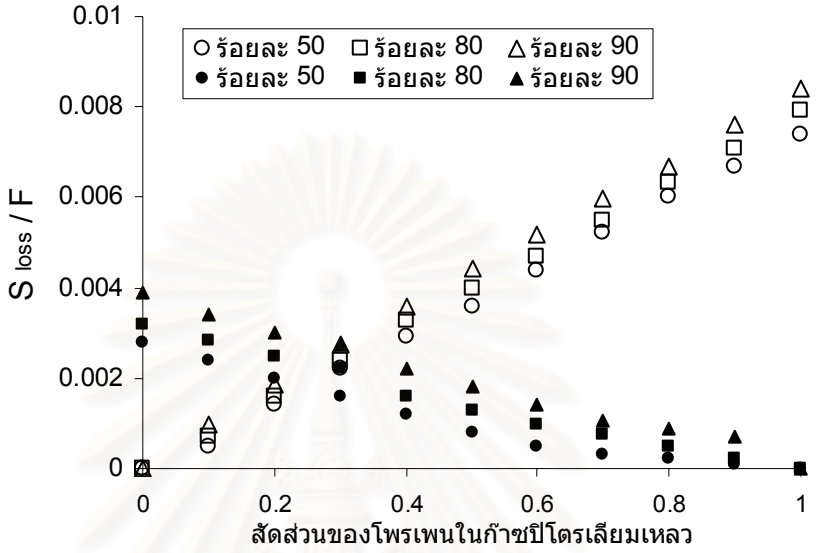
สัดส่วนของโพรเพน	ความเข้มข้นฉลี่ยของเอทานอล (ร้อยละ โดยมวล)		องค์ประกอบของหอกลั่น		
	ก่อนกลั่น	หลังกลั่น	จำนวนขั้นสมดุล เหนือ feed / ใต้ feed	ความดัน (บรรยากาศ)	สัดส่วน สารป้อนกลับ
0	2.82	99.21	7 / 10	3	0.36
0.1	2.92	99.04	7 / 10	4	0.37
0.2	3.00	98.85	7 / 10	5	0.39
0.3	3.10	99.02	7 / 10	6	0.40
0.4	3.20	99.01	7 / 10	7	0.41
0.5	3.30	98.98	7 / 10	8	0.45
0.6	3.41	98.94	8 / 10	9	0.48
0.7	3.52	98.76	8 / 10	10	0.51
0.8	3.65	98.75	8 / 10	10	0.52
0.9	3.75	98.64	8 / 10	11	0.55
1	3.86	98.97	8 / 10	11	0.58

หลังจากทราบองค์ประกอบของหอกลั่นสำหรับสัดส่วนของโพนเพนในตัวทำละลายต่างๆ แล้วพบว่าสภาวะของกระบวนการที่ใช้ต่างกัน โดยมีช่วงความดันอยู่ระหว่าง 3 – 11 บรรยากาศ สาเหตุที่ต้องใช้ความดันสูง เนื่องจากข้อกำหนดที่ได้ตั้งไว้ในบทที่ 4 ว่า อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นมีค่าไม่น้อยกว่า 25 องศาเซลเซียส ทำให้จำเป็นต้องเพิ่มความดันให้ไอมีอุณหภูมิสูงขึ้นเกินกว่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น โดยเมื่อสัดส่วนของโพรเพนสูงขึ้นความดันที่ต้องใช้ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้หลังการกลั่นนั้นมีค่าประมาณ ร้อยละ 99 โดยมวล สำหรับความบริสุทธิ์ของตัวทำละลายนั้นมีค่าเฉลี่ยโดยประมาณสูงกว่าร้อยละ 99 โดยมวล ดังแสดงในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 ความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลที่ได้หลังการกลั่น(ร้อยละโดยมวล)

ตัวทำละลายที่กลับเข้าสู่กระบวนการสกัดนั้นมีความบริสุทธิ์เฉลี่ยทุกกรณีสูงกว่าร้อยละ 99 โดยมวลตามที่กำหนดไว้ โดยตัวทำละลายนั้นเกิดการสูญเสียไปจากการกลั่นแยกเอทานอล ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.24



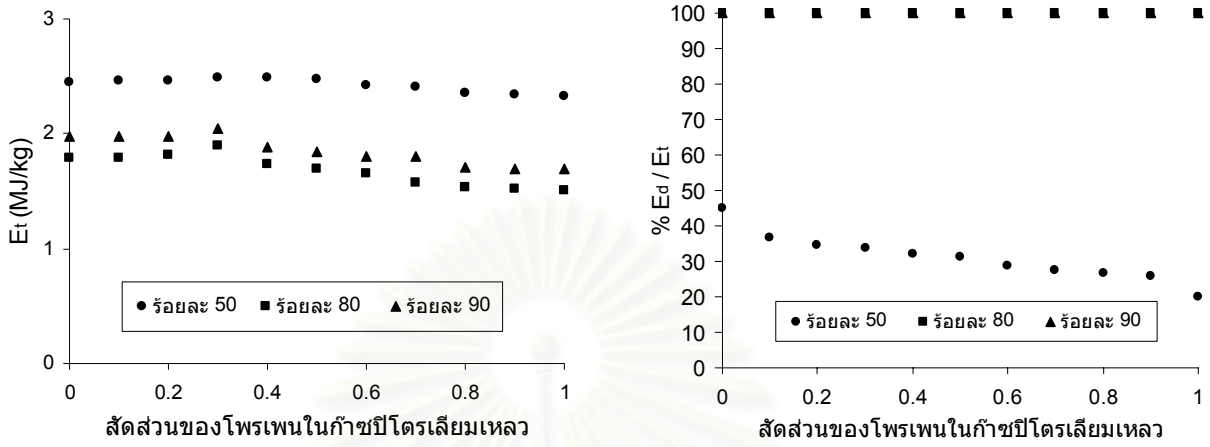
* หมายเหตุ รูป โปร่ง แสดงปริมาณของโพรเพนที่สูญเสียไปจากการกลั่นแยกเอทานอลต่อปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้น
รูปทึบ แสดงปริมาณของบิวเทนที่สูญเสียไปจากการกลั่นแยกเอทานอลต่อปริมาณสารละลายเอทานอลเริ่มต้น

รูปที่ 5.24 สัดส่วนปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียจากการกลั่นต่อปริมาณสารละลายเริ่มต้น

ปริมาณของโพรเพนและบิวเทนนั้นสูญเสียไปในปริมาณต่างกันแต่เมื่อเทียบกับปริมาณตัวทำละลายที่ใช้จะถือว่าแทบจะไม่เกิดการสูญเสียจึงอาจพิจารณาโดยไม่คิดการสูญเสียตัวทำละลายได้ในการผลิตจริง

สัดส่วนของโพรเพนและบิวเทนไม่มีผลต่อการเลือกใช้ชนิดของกระบวนการ โดยสำหรับการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น มีส่วนของการนำเอทานอลกลับไปสกัดใหม่ใช้กระบวนการ ชนิด ก.1 ส่วนการสกัดเอทานอลร้อยละ 80 และ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้นใช้กระบวนการชนิด ข.1

สำหรับปริมาณพลังงานนั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พลังงานที่ต้องให้กับกระบวนการ และพลังงานที่ต้องดึงออกจากกระบวนการ พลังงานรวมของทั้งกระบวนการ แสดงดังรูปที่ 5.25

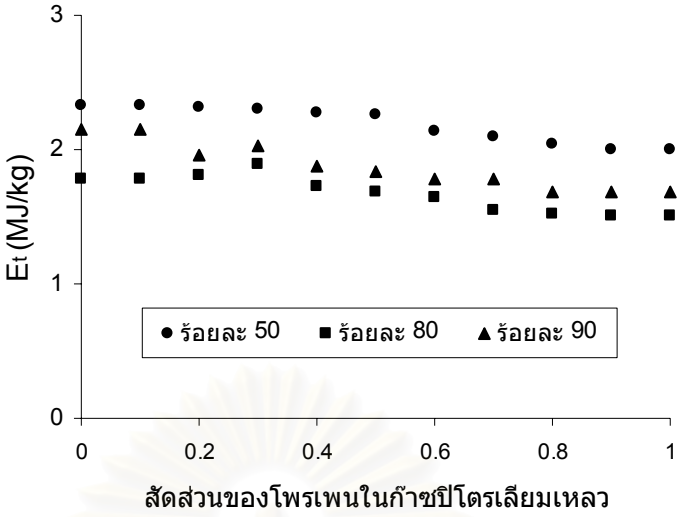


(ก.) (ข.)

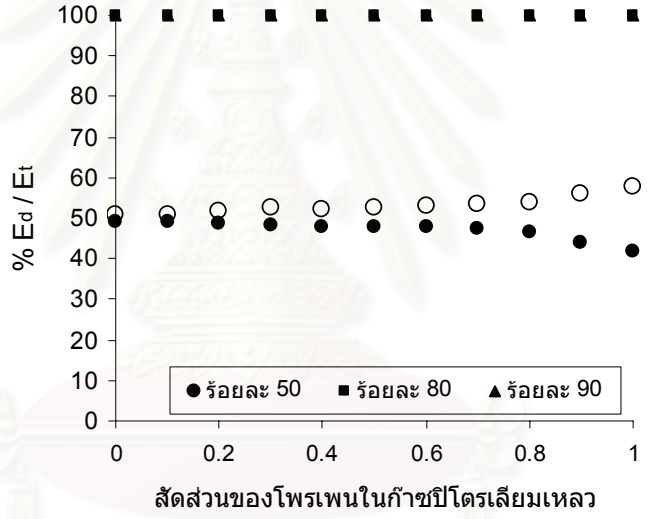
รูปที่ 5.25 พลังงานส่วนที่ต้องให้กับกระบวนการต่อมวลของสารละลายเริ่มต้น
ก. พลังงานรวมที่ต้องให้กับกระบวนการ สำหรับการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว
ข. พลังงานส่วนของหอกลั่นต่อพลังงานรวม สำหรับการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

พลังงานรวมที่ต้องให้กับกระบวนการนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 1500 – 2500 กิโลจูลต่อกิโลกรัมการสกัดเอทานอลร้อยละ 80 และ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น พลังงานที่ต้องให้กับกระบวนการคือพลังงานความร้อนที่ให้กับหอกลั่น และสำหรับการสกัดเอทานอลยังมีพลังงานในส่วนของการเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลในหอสตริปเปอร์รวมอยู่ด้วยอีกส่วนหนึ่ง สำหรับพลังงานในการเพิ่มความดันของระบบนั้นเมื่อคิดเป็นร้อยละของพลังงานทั้งกระบวนการไม่ถึงร้อยละ 1

เมื่อเทียบกับพลังงานในรูปของพลังงานความร้อน สำหรับพลังงานรวมที่ดึงออกจากหอกลั่นนั้นแบ่งเป็นพลังงานความร้อนที่ดึงออกจากหอกลั่นซึ่งเป็นพลังงานส่วนใหญ่สำหรับการสกัดเอทานอลร้อยละ 80 และ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น ส่วนการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้นต้องมีพลังงานความร้อนที่ต้องดึงออกจากหอควบแน่นเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 5.26



(ก.)



(ข.)

* หมายเหตุ รูปวงกลมโปร่งแสดงถึงพลังงานในส่วนที่ต้องดึงออกหลังเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลก่อนกลับสู่การสกัด เมื่อสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวล

รูปที่ 5.26 พลังงานส่วนที่ต้องดึงออกจากกระบวนการต่อมวลของสารละลายเริ่มต้น
ก. พลังงานรวมที่ดึงออกจากกระบวนการ สำหรับการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว
ข. พลังงานที่ดึงออกจากหอกลั่น สำหรับการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

พลังงานที่ดึงออกจากกระบวนการส่วนใหญ่อยู่ที่หอกลั่น ยกเว้น กรณีของการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้นซึ่งมีพลังงานในส่วนของหน่วยลดอุณหภูมิหลังเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลที่เหลือจากการสกัดให้มีความเข้มข้นเท่ากับสารละลายเริ่มต้น ก่อนนำกลับไปผสมกลับสารละลายเริ่มต้นเพื่อเข้าสู่การสกัดอีกครั้ง

5.8.2 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยรีฟอร์เมต

หลังจากจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยรีฟอร์เมตซึ่งมีองค์ประกอบของสารต่างๆ ในรีฟอร์เมตตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 สามารถสรุปผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 5.8 โดยได้ทำการเปรียบเทียบกลับกรณีของการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ โดยกำหนดให้พิจารณาตัวทำละลายที่จะนำมาเปรียบเทียบมีสัดส่วนของปริมาณการใช้ตัวทำละลายต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้นใกล้เคียงกับรีฟอร์เมต ซึ่งตัวทำละลายที่เลือกมาพิจารณาได้แก่ โทลูอีน ซึ่งเป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ในกลุ่มอะโรมาติกส์

ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยรีฟอร์เมต

ร้อยละการสกัดเอทานอลในสารละลายเอทานอลเริ่มต้น	ร้อยละ 50 โดยมวล		ร้อยละ 80 โดยมวล		ร้อยละ 90 โดยมวล	
	Reformate	Toluene	Reformate	Toluene	Reformate	Toluene
สัดส่วนของตัวทำละลายที่ใช้ต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (S/F)	3.75	3.85	6.00	6.20	6.70	6.83
สัดส่วนของเอทานอลที่สกัดได้ในสารสกัด (ร้อยละโดยมวล)	50.27	50.14	80.33	80.21	90.00	90.17
สัดส่วนของน้ำในสารสกัด (ร้อยละโดยมวล)	0.07	0.12	0.07	0.11	0.07	0.11
ตัวทำละลายที่สูญเสียต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (S_{loss}/F)	0.0015	0.0018	0.0010	0.0010	0.0008	0.0008
ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้หลังการสกัด (ร้อยละโดยมวล)	1.97	2.02	1.97	2.02	1.97	2.02
ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้หลังการกลั่น (ร้อยละโดยมวล)	99.06	56.97	99.06	56.97	99.07	56.97
สัดส่วนของเอทานอลที่ได้จากการกลั่นแยก (ร้อยละโดยมวล)	99.95	90.20	99.96	90.60	99.96	94.36
จำนวนขั้นสมดุลของหอที่ 1.	30	12	30	12	30	12
จำนวนขั้นสมดุลของหอที่ 2.	52	----	52	----	52	----
ความดันของหอที่ 1. (บรรยากาศ)	1	1	1	1	1	1
ความดันของหอที่ 2. (บรรยากาศ)	1	----	1	----	1	----
อัตราสารป้อนกลับหอที่ 1.	1.56	9.14	1.83	9.20	1.97	9.25
อัตราสารป้อนกลับหอที่ 2.	2.75	----	2.95	----	3.18	----
ชนิดกระบวนการที่ใช้	ชนิด ก.3	ชนิด ก.2	ชนิด ข.3	ชนิด ข.2	ชนิด ข.3	ชนิด ข.2
ตัวทำละลายที่สูญเสียในการกลั่นต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (S_{loss}/F)	0.00196	0.04371	0.00206	0.07167	0.00208	0.07487
พลังงานรวมที่ต้องให้กับกระบวนการ (kJ/kg)	9983.74	2824.06	16964.12	2936.09	18949.53	3122.25
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ให้หอกลั่นที่ 1. ต่อพลังงานรวม	15.55	59.41	18.99	100.00	18.99	100.00
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ให้หอกลั่นที่ 2. ต่อพลังงานรวม	72.42	----	81.01	----	81.01	----
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ให้หอสตริปเปอร์ ต่อพลังงานรวม	12.03	40.58	----	----	----	----
สัดส่วนของพลังงานสำหรับเพิ่มความดัน ต่อพลังงานรวม	0.000587	0.0544	0.000512	0.0544	0.000512	0.0544
พลังงานรวมที่ดึงออกจากกระบวนการ (kJ/kg)	9976.59	2804.19	16611.83	2918.54	18556.10	3073.13
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ดึงออกจากหอกลั่นที่ 1. ต่อพลังงานรวม	14.59	38.85	17.13	68.35	17.12	68.91
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ดึงออกจากหอกลั่นที่ 2. ต่อพลังงานรวม	71.37	----	79.37	----	79.38	----
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ดึงออกจากหอทำความเย็น ต่อพลังงานรวม	2.27	18.83	3.50	31.65	3.50	31.09
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ดึงออกจากหอควบแน่น ต่อพลังงานรวม	11.76	42.32	----	----	----	----

สำหรับผลการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายผสมชนิดรีฟอร์เมตจะรายงานผลการคำนวณและจำลองกระบวนการเปรียบเทียบกับกรณีของการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ได้แก่ โทลูอีน ซึ่งปริมาณการใช้ตัวทำละลายมีค่าใกล้เคียงกันโดยปริมาณการใช้โทลูอีนมีค่าสูงกว่ารีฟอร์เมตคิดเป็นค่าเฉลี่ยสำหรับทุกร้อยละการสกัดเท่ากับร้อยละ 3 โดยประมาณ ซึ่งผลการคำนวณมีดังนี้

- เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของน้ำในสารสกัดสำหรับการใช้รีฟอร์เมตและโทลูอีนเป็นตัวทำละลาย ณ สัดส่วนปริมาณเอทานอลที่ต้องการสกัดจากสารละลายเริ่มต้นเท่ากัน พบว่า การใช้รีฟอร์เมตเป็นตัวทำละลายปริมาณน้ำที่ปนมากับสารสกัดมีค่าต่ำกว่าโทลูอีน และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัดพบว่าการใช้รีฟอร์เมตและโทลูอีนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลในสารสกัดสำหรับการใช้โทลูอีนมีค่าเท่ากับ 2.02 ซึ่งมากกว่ารีฟอร์เมตที่มีค่าเท่ากับ 1.97 โดยแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

- เนื่องจากการใช้โทลูอีนนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายทำให้การกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายไม่สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ให้สูงกว่าความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายได้ โดยความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 56.97 โดยมวล ซึ่งแตกต่างจากการใช้รีฟอร์เมตเป็นตัวทำละลายเนื่องจากรีฟอร์เมตประกอบด้วยสารหลายองค์ประกอบทำให้ระบบมีองค์ประกอบเกินกว่า 3 องค์ประกอบ ซึ่งยังไม่มีการรายงานว่าพบของผสมจุดเดือดคงที่ของสารที่มากกว่า 3 องค์ประกอบ ดังนั้นการกลั่นแยกเอทานอลออกจากรีฟอร์เมตนั้นจึงไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่เช่นเดียวกับการใช้โทลูอีน ทำให้สามารถกลั่นแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์ของเอทานอลได้สูงถึง ร้อยละ 99.06 โดยมวล

- ชนิดของกระบวนการที่เลือกใช้สำหรับโทลูอีน คือ ชนิด ก.2 และ ข.2 เนื่องจากโทลูอีนมีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล สำหรับรีฟอร์เมตเลือกใช้ ชนิด ก.3 และ ข.3 เนื่องจากมีสารที่มีจุดเดือดทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าเอทานอล ทำให้ชนิดและอุปกรณ์ในกระบวนการแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 สำหรับการใช้รีฟอร์เมตการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายนั้นต้องใช้หอกลั่น 2 หอซึ่งมากกว่าโทลูอีนที่ใช้เพียงหอกลั่นเดียว และจำนวนขั้นสมดุลการสกัดสำหรับโทลูอีนมีค่าต่ำกว่าทั้งหอที่ 1. และ 2. ของรีฟอร์เมต โดยหลังการกลั่นแยกตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการกลั่นแยกในกรณีของโทลูอีนมีค่าสูงกว่ารีฟอร์เมตมากพอสมควรทั้งนี้เนื่องจากความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นแยกได้นั้นมีค่าต่ำทำให้มีตัวทำละลายปนไปกับผลิตภัณฑ์เอทานอลซึ่งแตกต่างจากรีฟอร์เมตที่มีค่าต่ำเพราะเอทานอลที่กลั่นแยกได้มีความบริสุทธิ์สูงทำให้รีฟอร์เมตปนไปกับเอทานอลหลังกลั่นได้น้อย พลังงานที่ใช้ในกระบวนการสำหรับกรณีของการใช้รีฟอร์เมตมีค่าสูงกว่าโทลูอีนประมาณ 3 – 6 เท่า และมากกว่าการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวประมาณ 10 เท่า โดยพลังงานส่วนใหญ่ในกระบวนการผลิตจะอยู่ที่หน่วยการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย

5.8.3 กระบวนการสกัดเอทานอลด้วยคอนเดนเสต

หลังจากจำลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยคอนเดนเสตซึ่งมีองค์ประกอบของสารต่างๆ ในคอนเดนเสตตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 สามารถสรุปผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 5.9 โดยได้ทำการเปรียบเทียบกลับกรณีของการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ โดยกำหนดให้พิจารณาตัวทำละลายที่จะนำมาเปรียบเทียบมีสัดส่วนของปริมาณการใช้ตัวทำละลายต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้นใกล้เคียงกับคอนเดนเสต ซึ่งตัวทำละลายที่เลือกมาพิจารณาได้แก่ ออกเทน ซึ่งเป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ในกลุ่มพาราฟินส์

ตารางที่ 5.9 ผลการคำนวณกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยคอนเดนเสต

ร้อยละการสกัดเอทานอลในสารละลายเอทานอลเริ่มต้น	ร้อยละ 50 โดยมวล		ร้อยละ 80 โดยมวล		ร้อยละ 90 โดยมวล	
	Condensate	Octane	Condensate	Octane	Condensate	Octane
สัดส่วนของตัวทำละลายที่ใช้ต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (S/F)	4.83	4.76	7.87	7.72	8.60	8.51
สัดส่วนของเอทานอลที่สกัดได้ในสารสกัด (ร้อยละโดยมวล)	50.19	50.07	80.47	80.11	90.14	90.23
สัดส่วนของน้ำในสารสกัด (ร้อยละโดยมวล)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
ตัวทำละลายที่สูญเสียต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (S_{loss}/F)	0.00105	0.00010	0.00070	0.00005	0.00062	0.00005
ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้หลังการสกัด (ร้อยละโดยมวล)	1.53	1.68	1.53	1.57	1.53	1.57
ความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้หลังการกลั่น (ร้อยละโดยมวล)	99.07	65.47	99.08	65.05	99.08	64.86
สัดส่วนของเอทานอลที่ได้จากการกลั่นแยก (ร้อยละโดยมวล)	99.94	90.04	99.93	90.57	99.94	90.45
จำนวนขั้นสมดุลของหอที่ 1.	34	20	34	20	34	20
จำนวนขั้นสมดุลของหอที่ 2.	77	----	77	----	77	----
ความดันของหอที่ 1. (บรรยากาศ)	8	1	8	1	8	1
ความดันของหอที่ 2. (บรรยากาศ)	8	----	8	----	8	----
อัตราสารป้อนกลับหอที่ 1.	3.44	0.31	3.72	0.31	4.21	0.31
อัตราสารป้อนกลับหอที่ 2.	8.25	----	8.73	----	8.98	----
ชนิดกระบวนการที่ใช้	ชนิด ก.3	ชนิด ก.2	ชนิด ข.3	ชนิด ข.2	ชนิด ข.3	ชนิด ข.2
ตัวทำละลายที่สูญเสียในการกลั่นต่อสารละลายเอทานอลเริ่มต้น (S_{loss}/F)	0.0014	0.0374	0.0017	0.0562	0.0019	0.0582
พลังงานรวมที่ต้องให้กับกระบวนการ (kJ/kg)	12936.84	2296.68	15102.31	1785.73	15899.78	1847.63
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ให้หอกลั่นที่ 1. ต่อพลังงานรวม	28.89	47.99	26.65	99.96	26.64	99.96
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ให้หอกลั่นที่ 2. ต่อพลังงานรวม	61.02	----	73.30	----	73.31	----
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ให้หอสตริปเปอร์ ต่อพลังงานรวม	10.05	52.00	----	----	----	----
สัดส่วนของพลังงานสำหรับเพิ่มความดัน ต่อพลังงานรวม	0.04	0.01	0.05	0.04	0.05	0.04
พลังงานรวมที่ดึงออกจากกระบวนการ (kJ/kg)	12008.85	2216.51	14890.94	1758.69	15412.45	1858.38
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ดึงออกจากหอกลั่นที่ 1. ต่อพลังงานรวม	14.62	3.45	19.54	6.60	19.55	6.14
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ดึงออกจากหอกลั่นที่ 2. ต่อพลังงานรวม	76.67	----	73.13	----	73.13	----
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ดึงออกจากหอทำความเย็น ต่อพลังงานรวม	7.62	48.47	7.33	93.40	7.32	93.86
สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ดึงออกจากหอควบแน่น ต่อพลังงานรวม	1.09	48.08	----	----	----	----

สำหรับผลการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายผสมชนิดคอนเดนเสตรายงานผลการคำนวณและจำลองกระบวนการเปรียบเทียบกับกรณีของการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ได้แก่ ออกเทน ซึ่งปริมาณการใช้ตัวทำละลายมีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณการใช้ออกเทนมีค่าต่ำกว่าคอนเดนเสต คิดเป็นค่าเฉลี่ยสำหรับทุกร้อยละการสกัดเท่ากับร้อยละ 1.3 โดยประมาณ ซึ่งผลการคำนวณมีดังนี้

- เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของน้ำในสารสกัดสำหรับการใช้คอนเดนเสตและออกเทนเป็นตัวทำละลาย ณ สัดส่วนปริมาณเอทานอลที่ต้องการสกัดจากสารละลายเริ่มต้นเท่ากัน พบว่า การใช้คอนเดนเสตเป็นตัวทำละลายปริมาณน้ำที่ปนมากับสารสกัดมีค่าเท่ากับ ออกเทน และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนของตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการสกัดพบว่าการใช้คอนเดนเสตมีค่าสูงกว่าการใช้ออกเทนเป็นตัวทำละลาย โดยความบริสุทธิ์เฉลี่ยของเอทานอลในสารสกัดสำหรับการใช้ออกเทนมีค่าเท่ากับ 1.61 ซึ่งมากกว่าคอนเดนเสตที่มีค่าเท่ากับ 1.53 โดยแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

- เนื่องจากการใช้ออกเทนนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องของการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายทำให้การกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายไม่สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ให้สูงกว่าความเข้มข้นของเอทานอลในของผสมจุดเดือดคงที่ระหว่างเอทานอลกับตัวทำละลายได้ โดยความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่ได้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 65.13 โดยมวล ซึ่งแตกต่างจากการใช้คอนเดนเสตเป็นตัวทำละลายเนื่องจากคอนเดนเสตประกอบด้วยสารหลายองค์ประกอบทำให้ระบบมีองค์ประกอบเกินกว่า 3 องค์ประกอบ ซึ่งยังไม่มีการรายงานว่าพบของผสมจุดเดือดคงที่ของสารที่มากกว่า 3 องค์ประกอบ ดังนั้นการกลั่นแยกเอทานอลออกจากคอนเดนเสตนั้นจึงไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของการเกิดของผสมจุดเดือดคงที่เช่นเดียวกับการใช้ออกเทน ทำให้สามารถกลั่นแยกเอทานอลให้มีความบริสุทธิ์ของเอทานอลได้สูงถึง ร้อยละ 99.08 โดยมวล

- ชนิดของกระบวนการที่เลือกใช้สำหรับออกเทน คือ ชนิด ก.2 และ ข.2 เนื่องจากออกเทนมีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล สำหรับคอนเดนเสตเลือกใช้ ชนิด ก.3 และ ข.3 เนื่องจากมีสารที่มีจุดเดือดทั้งสูงกว่าและต่ำกว่าเอทานอล ทำให้ชนิดและอุปกรณ์ในกระบวนการแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 สำหรับการใช้คอนเดนเสตการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายนั้นต้องใช้หอกลั่น 2 หอซึ่งมากกว่าออกเทนที่ใช้เพียงหอกลั่นเดียว และจำนวนขั้นสมดุลการสกัดสำหรับออกเทนมีค่าต่ำกว่าทั้งหอที่ 1. และ 2. ของคอนเดนเสต โดยหลังการกลั่นแยกตัวทำละลายที่สูญเสียไปจากการกลั่นแยกในกรณีของออกเทนมีค่าสูงกว่าคอนเดนเสตมากพอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นแยกได้นั้นมีค่าต่ำทำให้มีตัวทำละลายปนไปกับผลิตภัณฑ์เอทานอลซึ่งแตกต่างจากคอนเดนเสตที่มีค่าต่ำเพราะเอทานอลที่กลั่นแยกได้มีความบริสุทธิ์สูงทำให้คอนเดนเสตปนไปกับเอทานอลหลังกลั่นได้น้อย พลังงานที่ใช้ในกระบวนการสำหรับกรณีของการใช้คอนเดนเสตมีค่าสูงกว่าออกเทนประมาณ 5 – 8 เท่า และมากกว่าการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวประมาณ 10

เท่า โดยพลังงานส่วนใหญ่ในกระบวนการผลิตจะอยู่ที่หน่วยการกลั่นแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลาย

สำหรับพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายอินทรีย์นั้น ยกตัวอย่าง กรณีของกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลว ณ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล ซึ่งสามารถผลิตเอทานอลได้ความบริสุทธิ์สูงถึงประมาณร้อยละ 99 โดยมวล พลังงานที่ต้องใช้ทั้งหมดในกระบวนการมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณเท่ากับ 2 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของสารละลายเริ่มต้น เมื่อคิดพลังงานเป็นพลังงานทั้งหมดที่ต้องใช้ในกระบวนการต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้จะเท่ากับ 14.8 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ เมื่อเทียบกับพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในกระบวนการผลิตเอทานอลด้วยวิธีการแยกน้ำด้วยการดูดซับซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ซึ่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการมีค่าเท่ากับ 13.56 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ พบว่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกันคือไม่สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานได้ เนื่องจากในกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายนั้นแม้ในขั้นตอนของการสกัดเอทานอลจะใช้พลังงานน้อยมากแต่เมื่อจำเป็นต้องแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์ตามที่ต้องการยังคงมีพลังงานที่ต้องใช้สำหรับการกลั่นแยกซึ่งมีปริมาณการใช้พลังงานสูงเช่นเดียวกันกับกรณีกระบวนการผลิตเอทานอลด้วยวิธีการแยกน้ำด้วยการดูดซับเนื่องจากมีการกลั่นเข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการซึ่งต้องอาศัยพลังงานในการแยก และเมื่อคำนวณปริมาณพลังงานที่จำเป็นต้องใช้น้อยที่สุดทางอุณหพลศาสตร์สำหรับการแยกโดยไม่พิจารณาถึงวิธีการแยก (Ideal Work) ซึ่งก็คือผลต่างของเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99 โดยมวลกับสารละลายเอทานอลเริ่มต้นความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยมวล พบว่ามีค่าเท่ากับ 8.4 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมของเอทานอลที่ผลิตได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่ว่าจะผลิตเอทานอลด้วยวิธีการใดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการจะมากกว่าพลังงานที่จำเป็นต้องใช้น้อยที่สุดทางอุณหพลศาสตร์ตามที่กล่าวไปแล้วนั้นเสมอ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

1. การสกัดเอทานอลออกจากสารละลายเอทานอลเริ่มต้นด้วยตัวทำละลายบริสุทธิ์ เมื่อเปรียบเทียบถึงปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการสกัด ตัวทำละลายในกลุ่มของแอลกอฮอล์จะใช้ปริมาณต่ำที่สุด รองลงมาก็คือ อะโรมาติกส์ พาราฟินส์ และแนฟทีน ตามลำดับ เมื่อต้องการสกัดเอทานอลในปริมาณเท่ากัน

2. การสกัดเอทานอลออกจากสารละลายในน้ำพบว่าเมื่อใช้ตัวทำละลายในกลุ่มของแอลกอฮอล์ ปริมาณน้ำที่ติดมากับสารสกัดมีปริมาณสูงมากเมื่อเทียบกับตัวทำละลายในกลุ่มอื่น ทำให้การแยกเอทานอลออกจากตัวทำละลายต้องพบปัญหาของน้ำที่เกิดของผสมจุดเดือดคงที่กับเอทานอล แต่สำหรับตัวทำละลายกลุ่มอื่นน้ำที่ติดมากับสารสกัดมีปริมาณน้อยมาก

3. สำหรับตัวทำละลายในกลุ่มเดียวกันเมื่อจำนวนอะตอมของคาร์บอนสูงขึ้นพบว่าปริมาณตัวทำละลายที่ต้องใช้ในการสกัดเอทานอลก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ปริมาณของน้ำที่ติดมากับสารสกัดและปริมาณของตัวทำละลายที่สูญเสียไปกับน้ำจะมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาปริมาณของตัวทำละลายที่ต้องชดเชยเข้าสู่กระบวนการพบว่าเมื่อเอทานอลที่กลั่นแยกได้มีความบริสุทธิ์สูงทำให้ปริมาณตัวทำละลายที่ต้องชดเชยก็จะต่ำ

4. สำหรับตัวทำละลายบริสุทธิ์ที่สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของเอทานอลให้มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยมวล ได้แก่ โพรเพน และ บิวเทน

5. สำหรับตัวทำละลายผสมที่ใช้สำหรับการสกัดเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้ตัวทำละลาย ก๊าซปิโตรเลียมเหลวใช้ปริมาณต่ำที่สุด รองลงมาคือ รีฟอร์เมต และคอนเดนเสต โดยปริมาณของน้ำที่ติดมากับสารสกัดและปริมาณตัวทำละลายที่สูญเสียจากการสกัดจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกรณีของแอลกอฮอล์ ซึ่งการใช้ตัวทำละลายผสมทำให้การแยกเอทานอลสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99 โดยมวล และตัวทำละลายผสมสามารถหาได้ง่ายกว่าตัวทำละลายบริสุทธิ์

6. สำหรับการสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลพบว่าเมื่อพิจารณาให้มีหน่วยเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลกลับเข้าสู่กระบวนการ พลังงานและอุปกรณ์ที่ต้องใช้จะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการสกัดร้อยละ 80 และ 90 ซึ่งใช้พลังงานและจำนวนอุปกรณ์ต่ำกว่า แม้ว่าปริมาณตัวทำละลายที่ใช้จะมีค่าสูงกว่าก็ตามเพราะตัวทำละลายสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

7. สำหรับการสกัดเอทานอลร้อยละ 80 และ 90 โดยมวล พลังงานที่ใช้โดยส่วนใหญ่ของกระบวนการจะอยู่ที่ส่วนของหอกลั่นและพลังงานที่เหลือจะเป็นส่วนของหน่วยเพิ่มลดอุณหภูมิและความดัน แต่สำหรับเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวล จะมีพลังงานในส่วนของการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลเข้ามาซึ่งปริมาณพลังงานที่ใช้จะรองลงมาจากพลังงานที่ใช้ในหอกลั่น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยครั้งนี้เป็นการจำลองกระบวนการ เพื่อประเมินสมรรถนะกระบวนการสกัดเบื้องต้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาทดลองกระบวนการสกัดเอทานอลด้วยตัวทำละลายผสม เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง

2. กรณีของการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ที่ไม่สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ให้สูงเกินกว่าร้อยละ 99 โดยมวล อาจมีการประยุกต์ในการนำไปผสมกับน้ำมันเบนซีน และดีเซล เนื่องจากในน้ำมันเบนซีนและดีเซลนั้นมีส่วนประกอบของตัวทำละลายอินทรีย์พวกพาราฟินส์ อะโรมาติกส์ และแนฟทีนอยู่แล้วจึงควรมีการศึกษาต่อไป

3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Integration) อย่างคุ้มค่าที่สุดภายในกระบวนการสกัดเพื่อให้พลังงานไม่สูญเสียไปโดยไม่ก่อให้ประโยชน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. B. Maiorella, Ch. R. Wilke, H.W. Blanck. Alcohol Production and Recovery. New York: Advances in Biochemical Engineering, 1968.
2. A. H. Rose, J. S. Harrison. The Yeast. London: Academic Press, 1970.
3. R. P. Jones, N. Pamment, P. F. Greenfield. Process Biochem. 16 (1981): 42-49.
4. C. D. Bazua, C. R. Wilke. Biotechnology. 7 (1977): 105-118.
5. T. Seki, S. Myoga, S. Limtong, S. Vedono. Biotechnology. 5 (1983): 351-356.
6. E. Oura. Process Biochem. 12 (1977): 19-21.
7. A. J. Hacking, I.W.F. Taylor, C. M. Hanas. Biotechnology. 19 (1984): 361-363.
8. J. Swings, J. Deley. Bacteriol. 41 (1977): 1-46.
9. H.G. Harris,D.M. Himmelblau. Journal of Chemical Engineering. 9 (1964): 61.
10. R. J. Schmidt. UOP. United States Patent 4,374, 286, 1983.
11. Haldor F.A. Topsoe. DE-OS. New York: 1971.
12. Ch.K Fenf, Hua Hsueh, Tung pao. Chemical Abstract 90 (1979): Abstract No. 980.
13. De Bataafsche. Petroleum Maatschappij. 1955.
14. G.G. Goryacheva, B. S. Bouden, A. I. Gelbshtein. Chemical Industrial. 6 (1970): 1-15.
15. A. Suguir, E. Freund. Inst. Francais du Petrole. 1978.
16. J.P. Kokai. Agency for Industrial Sciences and Technology. 1984.
17. Robert H. Perry, Don W. Green. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1999.
18. E. Kvaalen, Philip C. Wankat. Alcohol Distillation. Washington D.C.: Department of Agriculture and Office of Alcohol Fuels, 1982.
19. M. Budich, G. Brunner. Supercritical fluid extraction of ethanol from aqueous solutions J. of Supercritical Fluids. 3 (2003): 45-55.
20. R. Katzen. Low Energy Distillation systems. Atlanta: Academic Press, 1985.
21. J. Gentry, S. Kumar. Extractive Distillation Applied. USA: 2003.
22. P.B. Kogan. Azeotropic and Extractive Distillation. USSR: Linengrad, 1961.
23. M.A. Scharf. Prism Seperators Remove Water From Ethanol. Europe: 1986.

24. G.T. Austin. Shreve's Chemical Process Industries. New York: McGraw-Hill, 1984.

25. Vogelbusch C. Alcohol Pervaporation. Vienna: 1984.

26. Vorobeva A.I. Journal of Chemical Engineering. 4 (1966): 1-40.

27. Sadovnikova. Journal of Chemical Engineering. 12 (1971): 129-137.

28. Varteressian. Industrial Engineering Chemical. 28 (1936): 11-28.

29. Mondain-Monval, Quiquerez. Journal of Chemical Engineering. 2 (1960): 1-7.

30. S. Nam, M. Hayakawa, T. Fujita. Journal of Chemical Engineering of Japan. 5 (1972): 12-32.

31. T. Moriyoshi, A. Uosaki, Y. Takahashi, K. Yamakawa. Journal of Chemical Thermodynamic. 37 (1991): 125-131.

32. Ronald W.Rousseau. Handbook of Seperation Process Technology. New York: John Wiley & Sons, 1987.

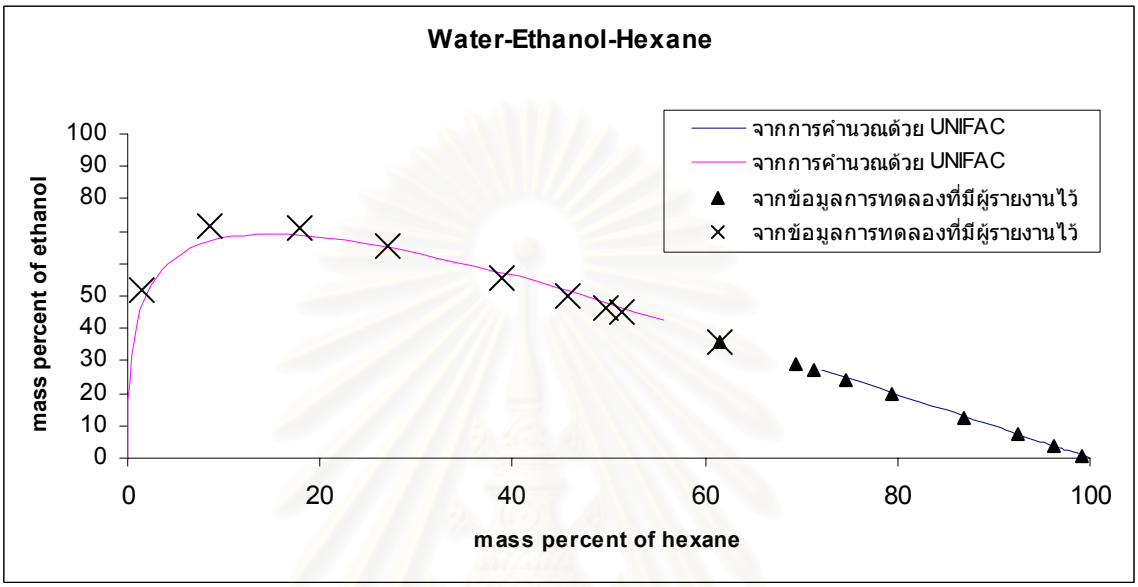
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

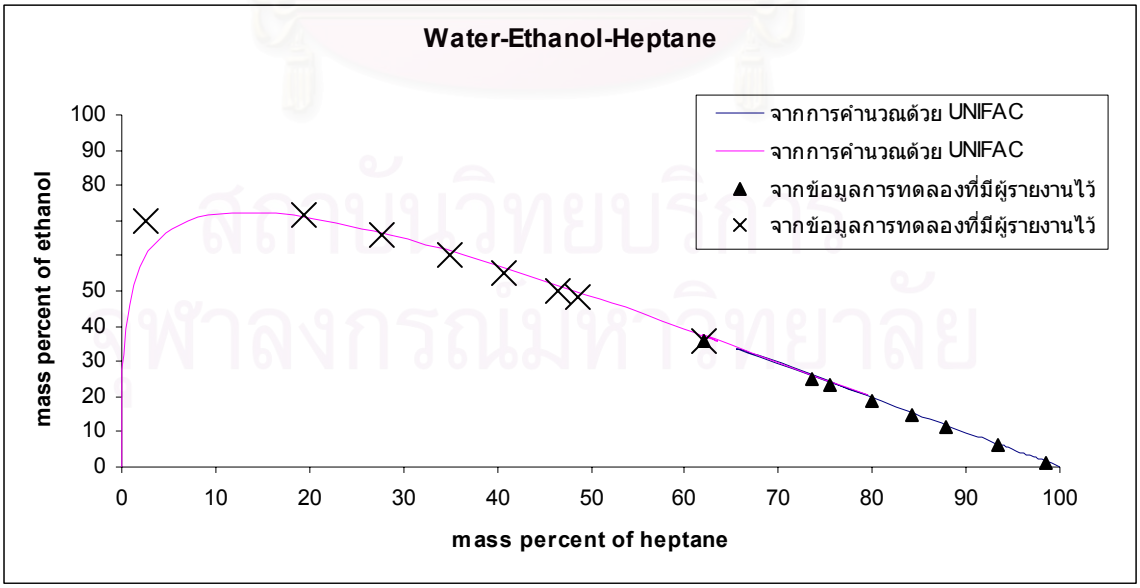
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

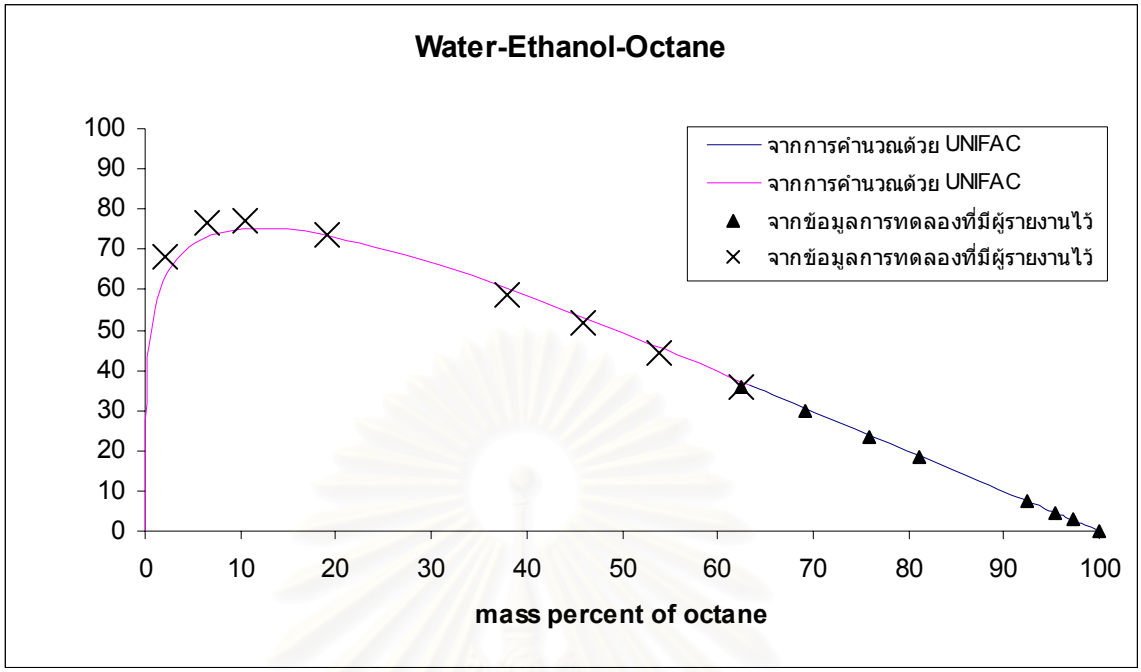
แสดงสมดุลของเหลว-ของเหลวที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์ของ UNIFACเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองที่ได้มีผู้รายงานไว้



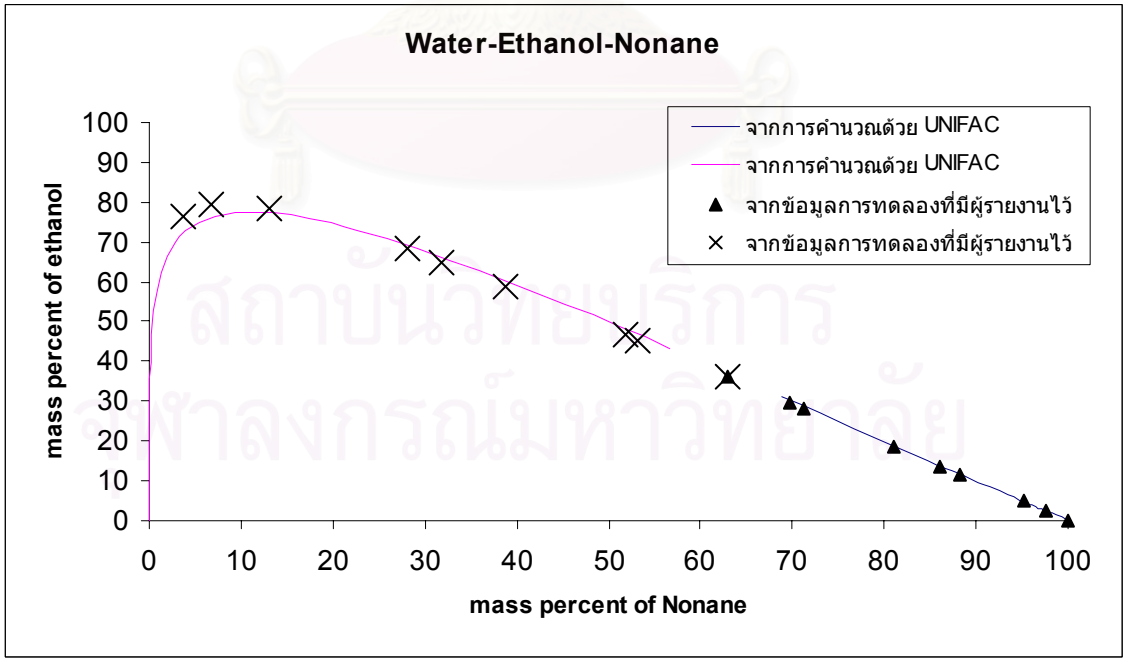
รูปที่ ก. 1 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ น้ำ,เอทานอล และเฮกเซน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ



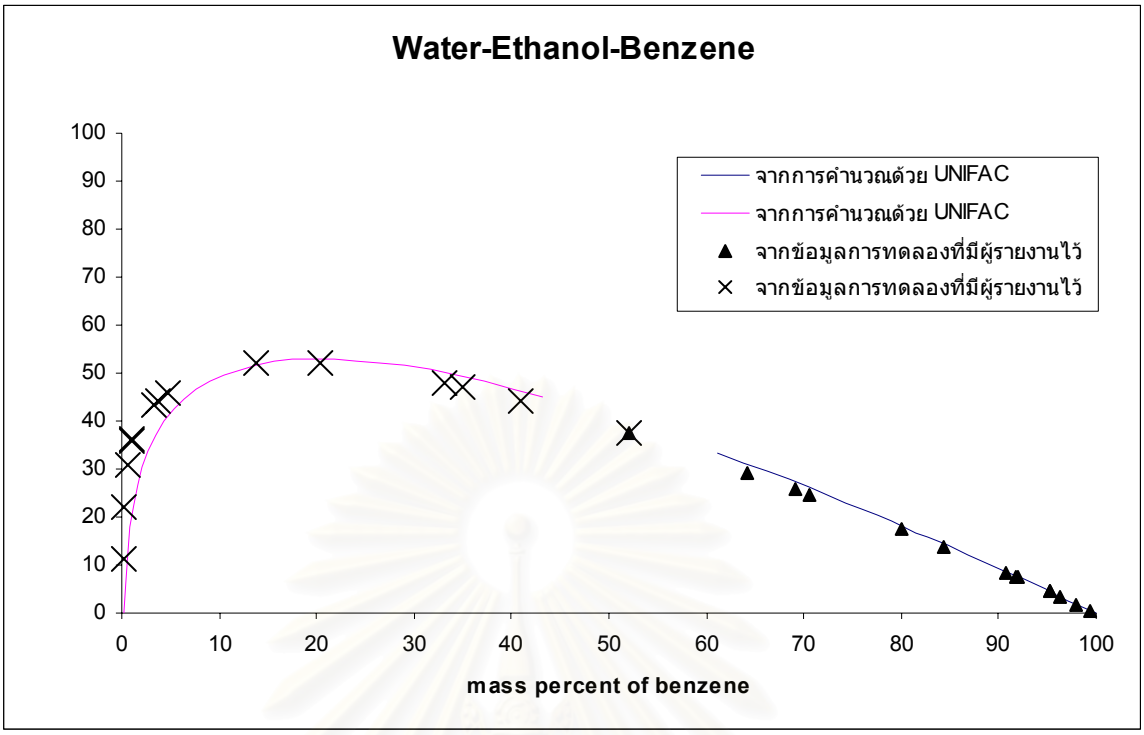
รูปที่ ก. 2 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ น้ำ,เอทานอล และเฮบเทน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ



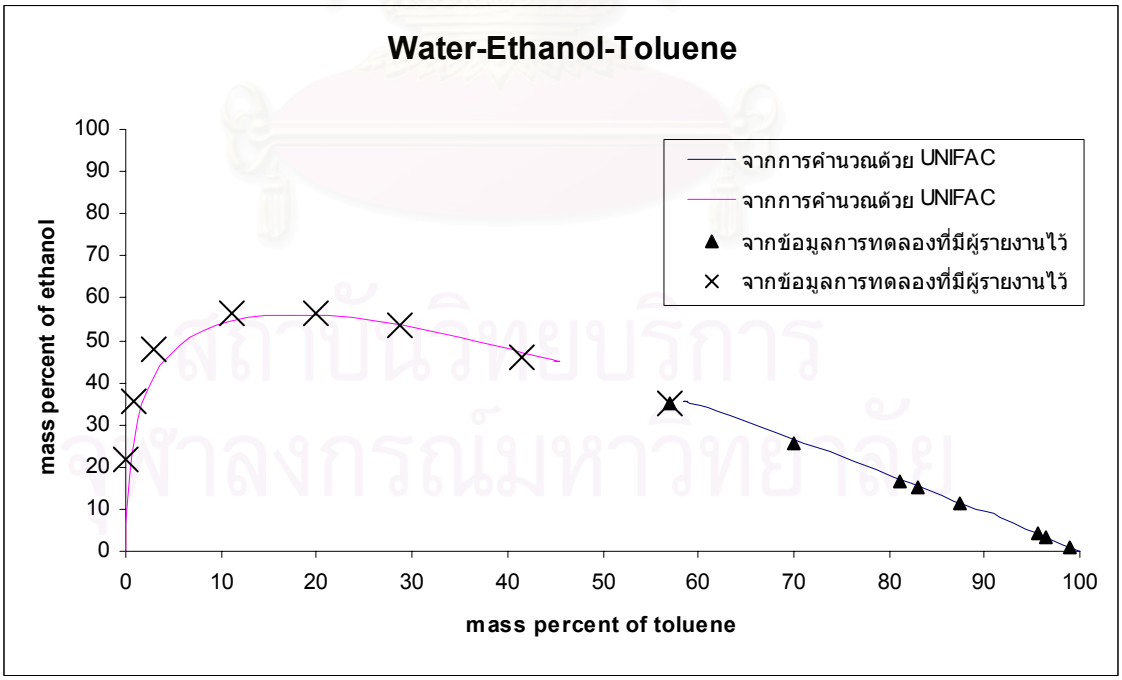
รูปที่ ก. 3 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ น้ำ,เอทานอล และออกเทน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ



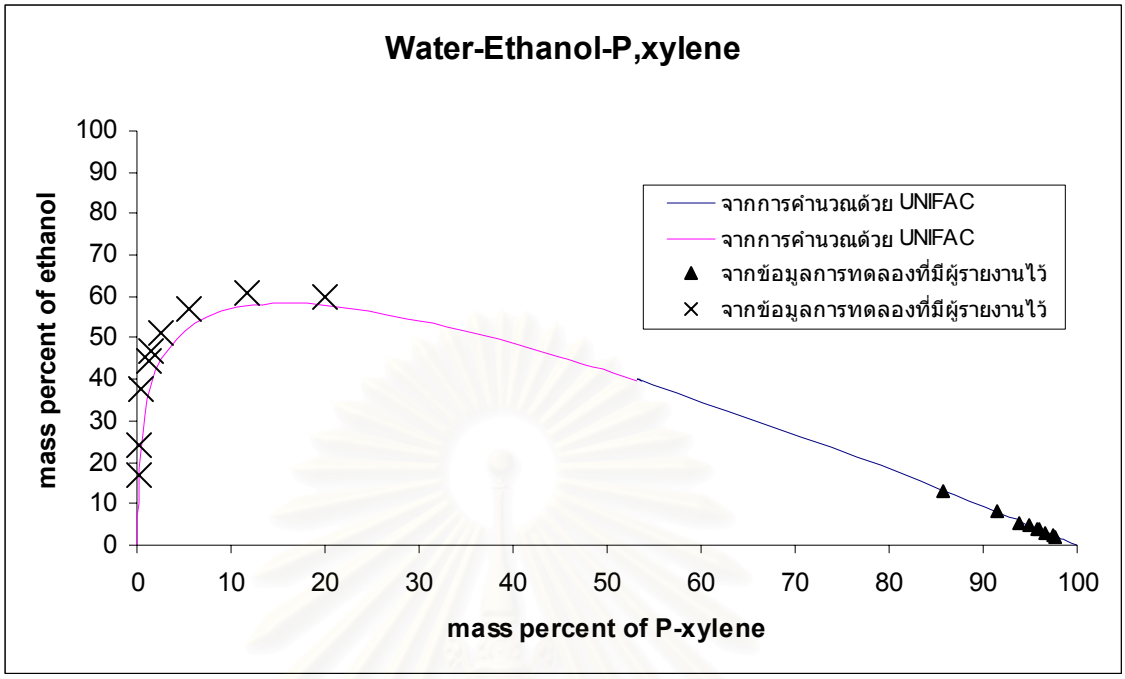
รูปที่ ก. 4 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ น้ำ,เอทานอล และโนเนน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ



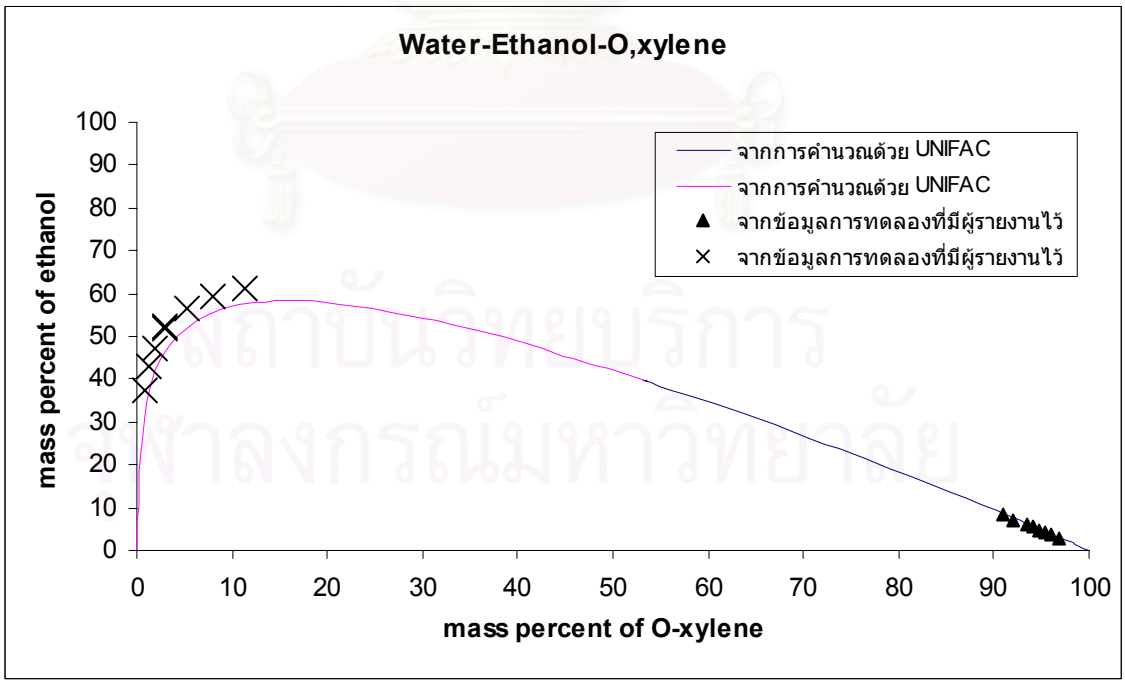
รูปที่ ก. 5 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ น้ำ,เอทานอล และเบนซีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ



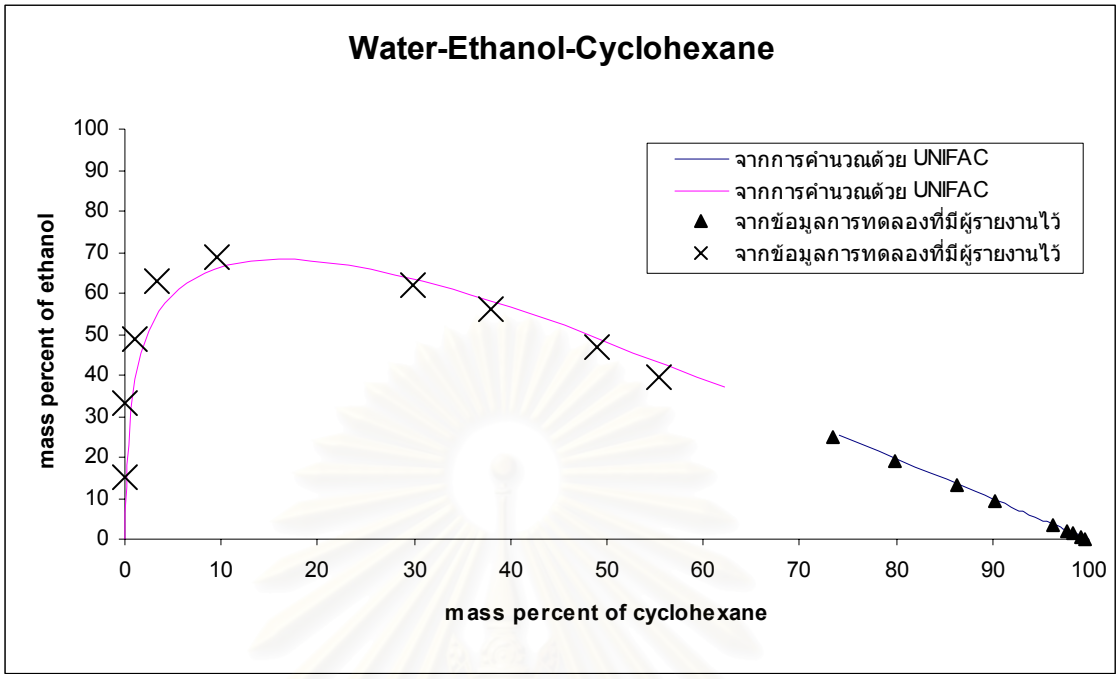
รูปที่ ก. 6 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ น้ำ,เอทานอล และโทลูอีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ



รูปที่ ก. 7 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ น้ำ,เอทานอล และพาราไซลีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ



รูปที่ ก. 8 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ น้ำ,เอทานอล และออโธไซลีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ



รูปที่ ก. 9 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลว ของระบบ น้ำ,เอทานอล และไซโคลเฮกเซน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 1 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และเฮกเซน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

จากการคำนวณด้วย UNIFAC					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-เฮกเซน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	เฮกเซน	น้ำ	เอทานอล	เฮกเซน
0.02	0.00	99.98	99.97	0.00	0.03
0.04	1.66	98.30	87.01	12.90	0.09
0.05	2.55	97.40	76.84	22.94	0.22
0.07	3.13	96.80	67.93	31.63	0.45
0.08	3.57	96.35	60.04	39.16	0.81
0.08	3.96	95.96	52.99	45.67	1.34
0.09	4.34	95.57	46.67	51.27	2.07
0.10	4.74	95.16	40.95	56.03	3.02
0.11	5.17	94.72	35.77	60.02	4.21
0.12	5.66	94.22	31.05	63.26	5.68
0.13	6.22	93.65	26.75	65.80	7.45
0.15	6.87	92.99	22.81	67.63	9.56
0.16	7.62	92.22	19.20	68.75	12.05
0.18	8.52	91.30	15.89	69.13	14.98
0.20	9.62	90.18	12.86	68.71	18.44
0.23	10.99	88.78	10.08	67.36	22.57
0.26	12.79	86.95	7.54	64.86	27.60
0.31	15.33	84.36	5.24	60.77	33.99
0.40	19.41	80.19	3.16	54.07	42.77
0.48	23.15	76.37	2.14	48.40	49.46
0.60	27.29	72.11	1.49	42.81	55.70

จากผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ [19]					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-เฮกเซน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	เฮกเซน	น้ำ	เอทานอล	เฮกเซน
0.10	0.70	99.20	46.70	51.80	1.50
0.20	3.60	96.20	20.00	71.40	8.60
0.30	7.20	92.50	11.40	70.70	17.90
0.60	12.40	87.00	7.70	65.30	27.00
1.00	19.60	79.40	5.40	55.80	38.80
1.30	24.10	74.60	4.30	49.90	45.80
1.60	27.00	71.40	3.80	46.60	49.60
1.80	28.80	69.40	3.60	45.00	51.40
2.50	36.00	61.50	2.50	36.00	61.50

ตารางที่ ก. 2 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และเฮปเทน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

จากการคำนวณด้วย UNIFAC					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-เฮปเทน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	เฮปเทน	น้ำ	เอทานอล	เฮปเทน
0.02	0.00	99.99	99.99	0.00	0.01
0.03	1.48	98.49	87.03	12.94	0.04
0.05	2.25	97.70	76.88	23.02	0.10
0.05	2.75	97.19	67.99	31.79	0.22
0.06	3.14	96.80	60.12	39.44	0.44
0.07	3.49	96.44	53.10	46.12	0.78
0.07	3.83	96.09	46.79	51.93	1.28
0.08	4.20	95.72	41.10	56.95	1.96
0.09	4.60	95.31	35.93	61.23	2.85
0.10	5.06	94.85	31.21	64.81	3.98
0.11	5.57	94.32	26.90	67.71	5.39
0.12	6.17	93.72	22.95	69.94	7.11
0.13	6.86	93.01	19.33	71.49	9.19
0.14	7.69	92.17	16.00	72.32	11.68
0.15	8.68	91.16	12.95	72.37	14.68
0.17	9.92	89.91	10.15	71.53	18.32
0.19	11.52	88.29	7.59	69.60	22.81
0.22	13.73	86.06	5.26	66.17	28.57
0.25	17.15	82.60	3.17	60.35	36.49
0.29	20.46	79.26	2.05	54.82	43.12
0.33	24.19	75.48	1.34	49.11	49.54
0.38	28.22	71.39	0.91	43.64	55.45
0.47	32.61	66.92	0.57	35.98	63.45
0.50	33.78	65.72	0.61	37.28	62.11
0.00	20.46	79.54	0.00	20.46	79.54

จากผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ [19]					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-เฮปเทน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	เฮปเทน	น้ำ	เอทานอล	เฮปเทน
0.00	1.40	98.60	27.70	69.70	2.60
0.30	6.40	93.30	9.00	71.60	19.40
0.50	11.60	87.90	6.30	65.90	27.80
0.70	15.00	84.30	4.90	60.10	35.00
1.00	19.00	80.00	4.00	55.30	40.70
1.20	23.30	75.50	3.40	50.20	46.40
1.40	25.00	73.60	3.20	48.20	48.60
2.00	36.00	62.00	2.00	36.00	62.00

ตารางที่ ก. 3 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และออกเทน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

จากการคำนวณด้วย UNIFAC					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-ออกเทน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	ออกเทน	น้ำ	เอทานอล	ออกเทน
0.01	0.00	99.99	100.00	0.00	0.00
0.03	1.35	98.62	87.04	12.95	0.01
0.04	2.04	97.92	76.90	23.05	0.04
0.05	2.49	97.46	68.02	31.86	0.11
0.05	2.84	97.11	60.18	39.58	0.24
0.06	3.15	96.79	53.18	46.36	0.46
0.06	3.47	96.47	46.90	52.31	0.79
0.07	3.81	96.12	41.22	57.51	1.27
0.07	4.18	95.74	36.07	62.00	1.93
0.08	4.60	95.32	31.37	65.84	2.79
0.09	5.08	94.83	27.06	69.03	3.90
0.10	5.63	94.27	23.12	71.59	5.29
0.10	6.28	93.62	19.49	73.51	7.01
0.11	7.03	92.85	16.15	74.74	9.11
0.12	7.94	91.93	13.08	75.24	11.68
0.14	9.06	90.80	10.26	74.90	14.84
0.15	10.49	89.36	7.68	73.53	18.78
0.16	12.41	87.43	5.33	70.80	23.87
0.17	15.27	84.56	3.22	65.94	30.84
0.18	18.34	81.48	1.94	60.52	37.54
0.19	21.75	78.06	1.16	54.79	44.06
0.19	25.45	74.36	0.70	49.14	50.16
0.20	29.47	70.33	0.44	43.79	55.77
0.24	33.89	65.88	0.32	39.62	60.06
0.26	36.48	63.26	0.26	36.48	63.26

จากผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ [19]					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-ออกเทน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	ออกเทน	น้ำ	เอทานอล	ออกเทน
0.00	0.00	100.00	29.60	68.40	2.00
0.00	2.80	97.20	17.20	76.40	6.40
0.10	4.60	95.30	12.50	77.00	10.50
0.20	7.40	92.40	7.20	73.80	19.00
0.50	18.40	81.10	3.20	58.80	38.00
0.80	23.40	75.80	2.50	51.50	46.00
1.10	29.80	69.10	2.00	44.20	53.80
1.50	36.00	62.50	1.50	36.00	62.50

ตารางที่ ก. 4 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และโนเนน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

จากการคำนวณด้วย UNIFAC					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-โนเนน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	โนเนน	น้ำ	เอทานอล	โนเนน
0.01	0.00	99.99	100.00	0.00	0.00
0.03	1.26	98.72	87.04	12.95	0.01
0.04	1.89	98.07	76.91	23.07	0.02
0.04	2.30	97.66	68.05	31.90	0.06
0.05	2.62	97.33	60.21	39.66	0.13
0.05	2.91	97.04	53.23	46.50	0.27
0.06	3.20	96.74	46.97	52.54	0.49
0.06	3.51	96.43	41.32	57.85	0.83
0.07	3.86	96.07	36.18	62.51	1.31
0.07	4.25	95.67	31.50	66.54	1.97
0.08	4.70	95.22	27.21	69.96	2.84
0.08	5.22	94.70	23.27	72.78	3.95
0.09	5.81	94.10	19.64	75.00	5.36
0.10	6.51	93.39	16.30	76.58	7.12
0.10	7.35	92.54	13.22	77.47	9.30
0.11	8.37	91.51	10.39	77.58	12.03
0.12	9.66	90.22	7.80	76.74	15.46
0.12	11.35	88.53	5.43	74.66	19.92
0.13	13.77	86.10	3.29	70.71	26.00
0.12	16.63	83.25	1.84	65.55	32.61
0.11	19.78	80.12	0.96	59.91	39.13
0.09	23.19	76.72	0.46	54.18	45.36
0.06	26.92	73.02	0.20	48.58	51.23
0.04	31.01	68.95	0.07	43.29	56.64

จากผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ [19]					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-โนเนน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	โนเนน	น้ำ	เอทานอล	โนเนน
0.00	0.00	100.00	20.00	76.40	3.60
0.00	2.40	97.60	13.60	79.60	6.80
0.10	4.80	95.10	8.30	78.60	13.10
0.20	11.60	88.20	3.80	68.20	28.00
0.30	13.60	86.10	3.20	65.00	31.80
0.50	18.40	81.10	2.40	58.80	38.80
0.70	28.00	71.30	1.60	46.60	51.80
0.80	29.50	69.70	1.50	45.40	53.10
1.00	36.00	63.00	1.00	36.00	63.00

ตารางที่ ก. 5 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และเบนซีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

จากการคำนวณด้วย UNIFAC					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-เบนซีน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	เบนซีน	น้ำ	เอทานอล	เบนซีน
0.07	0.00	99.93	99.83	0.00	0.17
0.16	2.62	97.22	86.86	12.62	0.53
0.27	4.88	94.85	76.56	22.29	1.15
0.41	6.94	92.65	67.48	30.40	2.12
0.56	8.81	90.63	59.39	37.09	3.51
0.72	10.56	88.72	52.15	42.49	5.36
0.90	12.27	86.83	45.63	46.68	7.68
1.11	14.03	84.86	39.75	49.76	10.49
1.37	15.92	82.71	34.42	51.79	13.78
1.68	18.01	80.31	29.60	52.85	17.55
2.08	20.36	77.56	25.23	52.98	21.78
2.61	23.03	74.37	21.28	52.25	26.47
3.29	26.07	70.64	17.70	50.68	31.62
4.21	29.52	66.27	14.47	48.32	37.21
5.47	33.43	61.11	11.57	45.16	43.27

จากผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ [21]					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-เบนซีน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	เบนซีน	น้ำ	เอทานอล	เบนซีน
0.05	0.60	99.35	88.67	11.20	0.13
0.15	1.85	98.00	77.72	22.00	0.28
0.20	3.50	96.30	68.57	30.90	0.53
0.30	4.45	95.25	62.98	36.00	1.02
0.30	4.50	95.20	62.50	36.40	1.10
0.60	7.40	92.00	53.15	43.50	3.35
0.65	7.55	91.80	52.20	44.10	3.70
0.80	8.45	90.75	49.30	45.90	4.80
1.75	13.85	84.40	34.10	52.20	13.70
2.55	17.45	80.00	27.40	52.15	20.45
4.65	24.75	70.60	18.80	48.00	33.20
5.10	25.85	69.05	17.90	47.20	34.90
6.60	29.30	64.10	15.05	44.00	40.95
10.60	37.40	52.00	10.60	37.40	52.00

ตารางที่ ก. 6 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และโทลูอีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

จากการคำนวณด้วย UNIFAC					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-โทลูอีน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	โทลูอีน	น้ำ	เอทานอล	โทลูอีน
0.05	0.00	99.95	99.93	0.00	0.07
0.10	1.65	98.25	86.93	12.81	0.26
0.15	3.01	96.84	76.68	22.70	0.62
0.22	4.23	95.55	67.64	31.10	1.25
0.29	5.38	94.33	59.59	38.17	2.25
0.37	6.55	93.08	52.35	43.99	3.66
0.46	7.83	91.71	45.81	48.63	5.56
0.59	9.32	90.09	39.88	52.13	7.99
0.77	11.12	88.11	34.48	54.53	10.99
1.02	13.37	85.61	29.57	55.84	14.58
1.38	16.16	82.46	25.11	56.11	18.79
1.90	19.57	78.53	21.05	55.34	23.61
2.62	23.57	73.81	17.38	53.57	29.05
3.61	28.09	68.30	14.08	50.81	35.11
4.92	33.00	62.08	11.12	47.10	41.77
5.35	34.41	60.23	10.44	46.03	43.53
5.80	35.77	58.43	9.74	44.84	45.42
5.65	35.34	59.01	9.94	45.20	44.85

จากผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ [22]					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-โทลูอีน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	โทลูอีน	น้ำ	เอทานอล	โทลูอีน
0.00	1.00	99.00	77.90	22.00	0.10
0.10	3.40	96.50	63.60	35.50	0.90
0.30	4.10	95.60	49.10	48.00	2.90
1.00	11.50	87.50	32.30	56.60	11.10
1.90	15.10	83.00	23.60	56.40	20.00
2.00	16.80	81.20	17.80	53.50	28.70
4.50	25.50	70.00	12.50	46.00	41.50
7.70	35.30	57.00	7.70	35.30	57.00

ตารางที่ ก. 7 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และพาราไซลีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

จากการคำนวณด้วย UNIFAC					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-พาราไซลีน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	พาราไซลีน	น้ำ	เอทานอล	พาราไซลีน
0.03	0.00	99.97	99.97	0.00	0.03
0.05	0.96	98.99	86.98	12.89	0.13
0.08	1.68	98.24	76.77	22.88	0.35
0.10	2.30	97.60	67.77	31.46	0.77
0.12	2.88	97.00	59.75	38.76	1.49
0.15	3.48	96.37	52.54	44.87	2.59
0.19	4.16	95.66	46.01	49.84	4.15
0.24	5.00	94.77	40.06	53.67	6.27
0.31	6.12	93.57	34.63	56.36	9.01
0.44	7.81	91.75	29.65	57.90	12.45
0.70	10.69	88.61	25.10	58.27	16.63
1.02	13.58	85.41	22.46	57.90	19.65
1.49	17.17	81.34	20.02	57.09	22.89
2.15	21.31	76.54	17.61	55.77	26.63
3.09	26.25	70.65	14.94	53.58	31.48
4.61	32.59	62.81	11.81	49.77	38.42
6.94	39.93	53.14	8.90	44.62	46.48
6.83	39.65	53.52	8.27	43.22	48.51
6.90	39.54	53.56	6.91	39.80	53.29

จากผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ [23]					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-พาราไซลีน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	พาราไซลีน	น้ำ	เอทานอล	พาราไซลีน
0.30	2.00	97.70	83.10	16.70	0.20
0.30	2.30	97.40	75.50	24.20	0.30
0.30	3.00	96.70	61.90	37.60	0.50
0.30	3.70	96.00	54.40	44.40	1.20
0.30	4.00	95.70	51.60	46.90	1.50
0.40	4.80	94.80	46.30	51.20	2.50
0.60	5.50	93.90	37.50	57.00	5.50
0.60	8.00	91.40	27.60	60.80	11.60
1.10	13.10	85.80	20.00	60.10	19.90

ตารางที่ ก. 8 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และออโธไซลีน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

จากการคำนวณด้วย UNIFAC					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-ออโธไซลีน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	ออโธไซลีน	น้ำ	เอทานอล	ออโธไซลีน
0.03	0.00	99.97	99.97	0.00	0.03
0.05	0.96	98.99	86.98	12.89	0.13
0.08	1.68	98.24	76.77	22.88	0.35
0.10	2.30	97.60	67.77	31.46	0.77
0.12	2.88	97.00	59.75	38.76	1.49
0.15	3.48	96.37	52.54	44.87	2.59
0.19	4.16	95.66	46.01	49.84	4.15
0.24	5.00	94.77	40.06	53.67	6.27
0.31	6.12	93.57	34.63	56.36	9.01
0.44	7.81	91.75	29.65	57.90	12.45
0.70	10.69	88.61	25.10	58.27	16.63
1.02	13.58	85.41	22.46	57.90	19.65
1.49	17.17	81.34	20.02	57.09	22.89
2.15	21.31	76.54	17.61	55.77	26.63
3.09	26.25	70.65	14.94	53.58	31.48
4.61	32.59	62.81	11.81	49.77	38.42
6.94	39.93	53.14	8.90	44.62	46.48
6.83	39.65	53.52	8.27	43.22	48.51
6.90	39.54	53.56	6.91	39.80	53.29

จากผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ [23]					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-ออโธไซลีน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	ออโธไซลีน	น้ำ	เอทานอล	ออโธไซลีน
0.30	2.80	96.90	62.00	37.20	0.80
0.30	3.70	96.00	56.00	42.80	1.20
0.30	4.40	95.30	51.00	47.20	1.80
0.40	5.50	94.10	44.90	52.20	2.90
0.40	4.80	94.80	45.30	51.70	3.00
0.40	6.20	93.40	38.20	56.60	5.20
0.70	7.20	92.10	32.90	59.20	7.90
0.70	8.30	91.00	27.50	61.10	11.40

ตารางที่ ก. 9 ผลการเปรียบเทียบสมดุลของเหลว-ของเหลวจากการคำนวณด้วย UNIFAC กับรายงานผลการทดลอง ของระบบ น้ำ,เอทานอล และไซโคลเฮกเซน ณ สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ

จากการคำนวณด้วย UNIFAC					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-ไซโคลเฮกเซน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	ไซโคลเฮกเซน	น้ำ	เอทานอล	ไซโคลเฮกเซน
0.01	0.00	99.99	99.95	0.00	0.05
0.03	1.39	98.59	86.99	12.87	0.15
0.04	2.12	97.85	76.81	22.87	0.32
0.05	2.59	97.37	67.88	31.50	0.62
0.05	2.94	97.01	59.97	38.96	1.07
0.06	3.25	96.69	52.91	45.38	1.70
0.06	3.54	96.39	46.58	50.88	2.54
0.07	3.85	96.08	40.86	55.54	3.60
0.08	4.19	95.73	35.68	59.41	4.91
0.08	4.57	95.35	30.96	62.56	6.48
0.09	5.00	94.91	26.66	65.00	8.33
0.10	5.49	94.41	22.74	66.76	10.50
0.11	6.06	93.83	19.14	67.84	13.02
0.12	6.74	93.14	15.85	68.22	15.94
0.13	7.55	92.32	12.83	67.84	19.32
0.15	8.57	91.29	10.07	66.62	23.30
0.16	9.88	89.96	7.55	64.38	28.06
0.19	11.69	88.13	5.26	60.76	33.97
0.22	14.50	85.28	3.20	54.96	41.84
0.26	17.72	82.02	1.95	48.81	49.24
0.31	21.48	78.22	1.20	42.56	56.23
0.38	25.47	74.15	0.80	37.04	62.16

จากผลการทดลองที่มีผู้รายงานไว้ [24]					
ระบบ น้ำ-เอทานอล-ไซโคลเฮกเซน					
Extract phase			Raffinate Phase		
ร้อยละโดยมวล			ร้อยละโดยมวล		
น้ำ	เอทานอล	ไซโคลเฮกเซน	น้ำ	เอทานอล	ไซโคลเฮกเซน
0.24	0.11	99.65	85.12	14.88	0.00
0.31	0.61	99.08	66.59	33.41	0.00
0.22	1.45	98.33	50.29	48.74	0.97
0.20	2.13	97.67	33.63	63.06	3.31
0.11	3.56	96.33	21.73	68.80	9.47
0.45	9.40	90.15	8.14	61.97	29.89
0.61	13.05	86.34	5.78	56.30	37.92
0.97	19.15	79.88	3.94	47.00	49.06
1.54	25.04	73.42	5.22	39.42	55.36

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข. 1 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-โพรเพน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	11	30	50.24	-	15.00	85.00
2	11	30	0.08	100.00	-	-
3	11	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	11	30	195.17	96.04	3.84	0.12
5	11	30	93.70	1.16	7.91	90.93
6	11	30	7.60	1.05	98.95	trace
7	11	30	187.57	99.90	trace	0.10
8	11	30	187.65	99.90	trace	0.10
9	11	30	43.94	trace	0.84	99.16
10	11	30	49.76	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	11	30	100.00	-	15.00	85.00
2	11	30	0.93	100.00	-	-
4	11	30	311.59	96.02	3.86	0.12
5	11	30	88.70	0.90	3.37	95.72
6	11	30	12.11	1.01	98.99	trace
7	11	30	299.48	99.90	trace	0.09
8	11	30	300.40	99.90	trace	0.09

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	11	30	100.00	-	15.00	85.00
2	11	30	0.86	100.00	-	-
4	11	30	349.23	96.01	3.87	0.12
5	11	30	87.10	0.82	1.70	97.48
6	11	30	13.64	1.01	98.98	trace
7	11	30	335.59	99.90	trace	0.09
8	11	30	336.45	99.90	trace	0.09

ตารางที่ ข. 2 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-บิวเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	3	30	46.39	-	15.00	85.00
2	3	30	0.05	100.00	-	-
3	3	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	3	30	268.16	97.11	2.81	0.08
5	3	30	92.85	0.43	7.97	91.60
6	3	30	7.00	0.71	99.29	trace
7	3	30	261.16	99.92	trace	0.08
8	3	30	261.21	99.92	trace	0.08
9	3	30	39.24	trace	trace	100.00
10	3	30	53.61	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	3	30	100.00	-	15.00	85.00
2	3	30	0.41	100.00	-	-
4	3	30	434.41	97.11	2.82	0.08
5	3	30	88.05	0.31	3.15	96.54
6	3	30	11.46	0.97	99.03	trace
7	3	30	422.96	99.92	trace	0.08
8	3	30	423.36	99.92	trace	0.08

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	3	30	100.00	-	15.00	85.00
2	3	30	0.35	100.00	-	-
4	3	30	478.57	97.10	2.83	0.08
5	3	30	86.72	0.28	1.70	98.02
6	3	30	12.94	0.68	99.32	trace
7	3	30	465.64	99.92	trace	0.08
8	3	30	465.98	99.92	trace	0.08

ตารางที่ ข. 3 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เพนเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	41.43	-	15.00	85.00
2	1	30	120.70	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	334.76	97.53	2.41	0.06
5	1	30	92.82	0.18	9.57	90.25
6	1	30	127.11	94.97	4.89	0.14
7	1	30	207.65	99.64	0.36	trace
8	1	30	328.35	99.77	0.23	trace
9	1	30	34.25	trace	trace	100.00
10	1	30	58.57	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	186.98	100.00	-	-
4	1	30	541.16	97.67	2.28	0.06
5	1	30	88.71	0.12	4.41	95.47
6	1	30	197.33	94.71	5.14	0.15
7	1	30	343.83	99.63	0.37	trace
8	1	30	530.81	99.77	0.23	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	212.02	100.00	-	-
4	1	30	596.09	97.66	2.28	0.06
5	1	30	87.50	0.11	3.14	96.75
6	1	30	223.77	94.70	5.15	0.15
7	1	30	372.32	99.63	0.37	trace
8	1	30	584.34	99.77	0.23	trace

ตารางที่ ข. 4 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เฮกเซน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	39.71	-	15.00	85.00
2	1	30	23.87	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	391.98	98.03	1.93	0.05
5	1	30	93.08	0.06	8.85	91.08
6	1	30	30.09	79.38	19.75	0.88
7	1	30	361.89	99.79	0.21	trace
8	1	30	385.76	99.80	0.20	trace
9	1	30	32.79	trace	trace	100.00
10	1	30	60.29	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	39.79	100.00	-	-
4	1	30	634.57	98.01	1.94	0.05
5	1	30	88.66	0.04	4.41	95.54
6	1	30	50.14	79.28	20.14	0.58
7	1	30	584.42	99.79	0.21	trace
8	1	30	624.22	99.80	0.20	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	49.80	100.00	-	-
4	1	30	689.15	98.01	1.95	0.05
5	1	30	87.64	0.04	3.34	96.62
6	1	30	62.79	79.25	20.23	0.51
7	1	30	626.36	99.79	0.21	trace
8	1	30	676.16	99.80	0.20	trace

ตารางที่ ข. 5 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เฮปเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	48.39	-	15.00	85.00
2	1	30	10.16	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	442.23	98.11	1.85	0.04
5	1	30	94.31	0.03	9.97	90.00
6	1	30	17.59	57.74	41.26	1.00
7	1	30	424.64	99.81	0.19	trace
8	1	30	434.80	99.81	0.19	trace
9	1	30	42.70	trace	trace	100.00
10	1	30	51.61	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	15.47	100.00	-	-
4	1	30	715.32	98.24	1.72	0.04
5	1	30	88.65	0.02	4.42	95.57
6	1	30	26.83	57.63	41.31	1.07
7	1	30	688.49	99.82	0.18	trace
8	1	30	703.96	99.83	0.17	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	16.71	100.00	-	-
4	1	30	787.88	98.23	1.73	0.04
5	1	30	87.46	0.01	3.16	96.82
6	1	30	28.88	57.81	41.10	1.09
7	1	30	759.00	99.82	0.18	trace
8	1	30	775.71	99.82	0.18	trace

ตารางที่ ข. 6 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ออกเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	50.21	-	15.00	85.00
2	1	30	3.75	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	484.79	98.28	1.68	0.04
5	1	30	94.35	0.01	10.02	89.97
6	1	30	11.37	33.01	65.47	1.52
7	1	30	473.42	99.83	0.17	trace
8	1	30	477.17	99.83	0.17	trace
9	1	30	44.56	trace	trace	100.00
10	1	30	49.79	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	5.63	100.00	-	-
4	1	30	784.92	98.40	1.57	0.04
5	1	30	88.65	0.01	4.42	95.57
6	1	30	16.91	33.29	65.05	1.66
7	1	30	768.01	99.84	0.16	trace
8	1	30	773.65	99.84	0.16	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	5.82	100.00	-	-
4	1	30	864.54	98.39	1.57	0.04
5	1	30	88.83	0.01	4.65	95.34
6	1	30	17.43	33.36	64.86	1.78
7	1	30	847.10	99.68	0.32	trace
8	1	30	852.92	99.68	0.32	trace

ตารางที่ ข. 7 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-โนเนน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	49.55	-	15.00	85.00
2	1	30	0.90	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	521.49	98.52	1.45	0.03
5	1	30	92.28	0.00	8.00	92.00
6	1	30	8.49	10.58	87.39	2.02
7	1	30	513.00	100.00	trace	trace
8	1	30	513.91	100.00	trace	trace
9	1	30	41.83	trace	trace	100.00
10	1	30	50.45	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	1.42	100.00	-	-
4	1	30	845.11	98.51	1.46	0.03
5	1	30	87.43	trace	3.09	96.91
6	1	30	13.39	10.58	87.37	2.05
7	1	30	831.72	100.00	trace	trace
8	1	30	833.14	100.00	trace	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	1.52	100.00	-	-
4	1	30	930.69	98.52	1.44	0.03
5	1	30	86.26	trace	1.81	98.19
6	1	30	14.79	10.24	87.72	2.04
7	1	30	915.90	100.00	trace	trace
8	1	30	917.42	100.00	trace	trace

ตารางที่ ข. 8 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เดคเคน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	50.72	-	15.00	85.00
2	1	30	0.14	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	553.83	98.60	1.36	0.03
5	1	30	92.28	trace	8.00	92.00
6	1	30	7.85	1.75	96.08	2.17
7	1	30	545.98	100.00	trace	trace
8	1	30	546.12	100.00	trace	trace
9	1	30	43.00	trace	trace	100.00
10	1	30	49.28	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.24	100.00	-	-
4	1	30	897.47	98.60	1.37	0.03
5	1	30	87.43	trace	3.09	96.91
6	1	30	12.47	1.94	95.84	2.22
7	1	30	885.00	100.00	trace	trace
8	1	30	885.24	100.00	trace	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.25	100.00	-	-
4	1	30	988.49	98.60	1.37	0.03
5	1	30	86.12	trace	1.66	98.34
6	1	30	12.92	1.93	95.72	2.34
7	1	30	975.58	100.00	trace	trace
8	1	30	975.83	100.00	trace	trace

ตารางที่ ข. 9 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เบนซีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	33.45	-	15.00	85.00
2	1	30	12.20	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	228.14	96.26	3.53	0.21
5	1	30	92.88	0.44	9.99	89.57
6	1	30	17.65	69.15	28.28	2.56
7	1	30	210.49	99.61	0.39	trace
8	1	30	222.69	99.63	0.37	trace
9	1	30	26.33	trace	trace	100.00
10	1	30	66.55	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	23.99	100.00	-	-
4	1	30	398.65	96.67	3.14	0.19
5	1	30	88.21	0.27	4.23	95.50
6	1	30	34.40	68.94	28.87	2.20
7	1	30	364.24	99.66	0.34	trace
8	1	30	388.23	99.68	0.32	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	26.31	100.00	-	-
4	1	30	439.28	96.64	3.17	0.19
5	1	30	86.82	0.23	2.82	96.94
6	1	30	37.80	68.97	28.78	2.25
7	1	30	401.48	99.65	0.35	trace
8	1	30	427.79	99.67	0.33	trace

ตารางที่ ข. 10 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-โทลูอีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	41.08	-	15.00	85.00
2	1	30	4.55	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	392.55	97.77	2.11	0.12
5	1	30	93.64	0.19	9.40	90.40
6	1	30	11.09	41.05	55.50	3.46
7	1	30	381.46	99.78	0.22	trace
8	1	30	386.01	99.78	0.22	trace
9	1	30	34.72	trace	trace	100.00
10	1	30	58.92	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	7.27	100.00	-	-
4	1	30	633.82	97.93	1.96	0.11
5	1	30	88.23	0.12	4.36	95.52
6	1	30	18.81	38.09	58.11	3.80
7	1	30	615.02	99.80	0.20	trace
8	1	30	622.29	99.80	0.20	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	7.57	100.00	-	-
4	1	30	698.34	97.90	1.99	0.11
5	1	30	86.81	0.10	2.90	97.00
6	1	30	19.35	38.60	57.29	4.11
7	1	30	678.99	99.80	0.20	trace
8	1	30	686.56	99.80	0.20	trace

ตารางที่ ข. 11 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เมตาไซลีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	50.82	-	15.00	85.00
2	1	30	0.61	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	676.31	98.82	1.12	0.06
5	1	30	92.07	0.08	8.04	91.88
6	1	30	8.64	7.06	88.24	4.70
7	1	30	667.67	100.00	trace	trace
8	1	30	668.28	100.00	trace	trace
9	1	30	42.89	trace	trace	100.00
10	1	30	49.18	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.93	100.00	-	-
4	1	30	1095.96	98.82	1.12	0.06
5	1	30	87.08	0.05	3.09	96.86
6	1	30	12.96	6.80	88.11	5.09
7	1	30	1083.00	100.00	trace	trace
8	1	30	1083.93	100.00	trace	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.84	100.00	-	-
4	1	30	1207.22	98.81	1.13	0.06
5	1	30	85.63	0.04	1.54	98.42
6	1	30	15.00	5.39	89.78	4.84
7	1	30	1192.22	100.00	trace	trace
8	1	30	1193.06	100.00	trace	trace

ตารางที่ ข. 12 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ออโธไซลีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	51.61	-	15.00	85.00
2	1	30	0.61	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	676.51	98.82	1.12	0.06
5	1	30	92.09	0.08	7.95	91.97
6	1	30	8.74	6.98	88.33	4.70
7	1	30	667.77	100.00	trace	trace
8	1	30	668.38	100.00	trace	trace
9	1	30	43.70	trace	trace	100.00
10	1	30	48.39	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	11	30	100.00	-	15.00	85.00
2	11	30	0.92	100.00	-	-
4	11	30	1095.92	98.82	1.12	0.06
5	11	30	87.11	0.05	3.13	96.83
6	11	30	12.99	6.79	88.17	5.04
7	11	30	1082.94	100.00	trace	trace
8	11	30	1083.86	100.00	trace	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.84	100.00	-	-
4	1	30	1207.28	98.80	1.14	0.06
5	1	30	85.57	0.04	1.48	98.48
6	1	30	15.27	5.29	89.92	4.79
7	1	30	1192.00	100.00	trace	trace
8	1	30	1192.84	100.00	trace	trace

ตารางที่ ข. 13 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-พาราไซลีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	51.35	-	15.00	85.00
2	1	30	0.62	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	676.51	98.82	1.12	0.06
5	1	30	92.09	0.08	7.95	91.97
6	1	30	8.70	7.07	88.17	4.76
7	1	30	667.81	100.00	trace	trace
8	1	30	668.43	100.00	trace	trace
9	1	30	43.44	trace	trace	100.00
10	1	30	48.65	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.93	100.00	-	-
4	1	30	1095.92	98.82	1.12	0.06
5	1	30	87.12	0.05	3.13	96.82
6	1	30	12.95	6.82	88.13	5.05
7	1	30	1082.96	100.00	trace	trace
8	1	30	1083.89	100.00	trace	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.84	100.00	-	-
4	1	30	1207.22	98.81	1.13	0.06
5	1	30	85.62	0.04	1.54	98.42
6	1	30	15.22	5.32	89.92	4.77
7	1	30	1192.00	100.00	trace	trace
8	1	30	1192.84	100.00	trace	trace

ตารางที่ ข. 14 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เอทธิลเบนซีน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	39.09	-	15.00	85.00
2	1	30	0.99	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	492.99	98.39	1.54	0.08
5	1	30	92.08	0.05	7.97	91.97
6	1	30	7.21	13.71	80.99	5.30
7	1	30	485.78	100.00	trace	trace
8	1	30	486.77	100.00	trace	trace
9	1	30	31.17	trace	trace	100.00
10	1	30	60.91	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	1.62	100.00	-	-
4	1	30	796.98	98.38	1.54	0.08
5	1	30	88.35	0.04	4.45	95.51
6	1	30	12.38	12.79	82.22	4.99
7	1	30	784.60	100.00	trace	trace
8	1	30	786.22	100.00	trace	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	1.71	100.00	-	-
4	1	30	877.87	98.37	1.55	0.08
5	1	30	87.10	0.03	3.16	96.81
6	1	30	14.61	11.54	83.79	4.67
7	1	30	863.25	100.00	trace	trace
8	1	30	864.97	100.00	trace	trace

ตารางที่ ข. 15 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ไซโคลเพนเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	45.34	-	15.00	85.00
2	1	30	56.32	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	357.14	97.76	2.19	0.05
5	1	30	97.35	0.38	12.48	87.14
6	1	30	63.30	88.98	10.77	0.26
7	1	30	293.84	99.73	0.27	trace
8	1	30	350.16	99.78	0.22	trace
9	1	30	42.69	trace	trace	100.00
10	1	30	54.66	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	50.94	100.00	-	-
4	1	30	654.76	98.08	1.88	0.04
5	1	30	88.87	0.22	4.43	95.35
6	1	30	55.51	91.17	8.35	0.47
7	1	30	599.24	99.78	0.22	trace
8	1	30	650.18	99.81	0.19	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	57.97	100.00	-	-
4	1	30	721.13	98.09	1.87	0.04
5	1	30	87.76	0.20	3.27	96.53
6	1	30	63.38	91.19	8.36	0.45
7	1	30	657.75	99.78	0.22	trace
8	1	30	715.72	99.81	0.19	trace

ตารางที่ ข. 16 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ไซโคลเฮกเซน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	48.27	-	15.00	85.00
2	1	30	18.07	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	469.92	98.35	1.61	0.03
5	1	30	75.93	0.09	6.68	93.23
6	1	30	25.48	70.88	28.46	0.66
7	1	30	444.44	99.82	0.18	trace
8	1	30	462.51	99.82	0.18	trace
9	1	30	24.20	trace	trace	100.00
10	1	30	51.73	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	27.22	100.00	-	-
4	1	30	760.43	98.35	1.62	0.03
5	1	30	88.74	0.08	4.43	95.50
6	1	30	38.43	70.68	28.65	0.67
7	1	30	722.00	99.83	0.17	trace
8	1	30	749.22	99.84	0.16	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	28.89	100.00	-	-
4	1	30	837.57	98.34	1.62	0.03
5	1	30	87.55	0.07	3.17	96.76
6	1	30	41.34	69.74	29.57	0.69
7	1	30	796.23	99.83	0.17	trace
8	1	30	825.12	99.84	0.16	trace

ตารางที่ ข. 17 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เมทธิลไซโคลเพนเทน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	50.17	-	15.00	85.00
2	1	30	27.49	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	482.84	98.27	1.70	0.03
5	1	30	93.98	0.12	9.60	90.28
6	1	30	35.19	78.10	21.42	0.48
7	1	30	447.65	99.82	0.18	trace
8	1	30	475.13	99.83	0.17	trace
9	1	30	44.15	trace	trace	100.00
10	1	30	49.83	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	38.78	100.00	-	-
4	1	30	762.86	98.35	1.61	0.03
5	1	30	88.74	0.08	4.43	95.50
6	1	30	49.86	77.64	21.85	0.52
7	1	30	713.00	99.83	0.17	trace
8	1	30	751.78	99.84	0.16	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	45.79	100.00	-	-
4	1	30	840.26	98.35	1.62	0.03
5	1	30	87.55	0.07	3.17	96.76
6	1	30	58.86	77.66	21.90	0.44
7	1	30	781.40	99.83	0.17	trace
8	1	30	827.18	99.84	0.16	trace

ตารางที่ ข. 18 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เมทธิลไซโคลเฮกเซน) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	48.76	-	15.00	85.00
2	1	30	9.72	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	525.23	98.42	1.55	0.03
5	1	30	94.38	0.05	10.07	89.88
6	1	30	17.19	56.53	42.51	0.95
7	1	30	508.04	99.84	0.16	trace
8	1	30	517.76	99.84	0.16	trace
9	1	30	43.14	trace	trace	100.00
10	1	30	51.24	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	14.52	100.00	-	-
4	1	30	849.64	98.53	1.44	0.03
5	1	30	88.77	0.03	4.51	95.47
6	1	30	25.64	56.56	42.46	0.98
7	1	30	824.00	99.85	0.15	trace
8	1	30	838.52	99.85	0.15	trace

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	15.81	100.00	-	-
4	1	30	935.81	98.53	1.44	0.03
5	1	30	87.61	0.02	3.27	96.70
6	1	30	27.81	56.78	42.23	1.00
7	1	30	908.00	99.85	0.15	trace
8	1	30	923.81	99.85	0.15	trace

ตารางที่ ข. 19 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เพนทานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	49.17	-	15.00	85.00
2	1	30	2.10	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	31.40	48.67	25.20	26.13
5	1	30	89.40	4.11	9.80	86.09
6	1	30	14.35	14.62	51.45	33.93
7	1	30	17.05	95.13	trace	4.87
8	1	30	19.15	95.23	trace	4.77
9	1	30	38.57	trace	trace	100.00
10	1	30	50.83	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	6.31	100.00	-	-
4	1	30	49.56	50.42	24.29	25.29
5	1	30	78.45	3.05	3.78	93.18
6	1	30	24.51	16.07	49.11	34.82
7	1	30	25.05	97.55	trace	2.45
8	1	30	31.36	97.76	trace	2.24

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. 20 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เฮกซานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	47.04	-	15.00	85.00
2	1	30	1.04	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	35.29	60.93	22.22	16.85
5	1	30	88.97	1.66	9.05	89.29
6	1	30	12.75	8.18	55.47	36.35
7	1	30	22.54	97.30	trace	2.70
8	1	30	23.57	97.32	trace	2.68
9	1	30	36.01	trace	trace	100.00
10	1	30	52.96	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	2.78	100.00	-	-
4	1	30	56.36	62.20	21.38	16.42
5	1	30	80.10	1.17	3.68	95.14
6	1	30	21.86	8.42	55.14	36.44
7	1	30	34.50	98.70	trace	1.30
8	1	30	37.28	98.73	trace	1.27

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. 21 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เฮปทานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	48.31	-	15.00	85.00
2	1	30	0.49	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	41.47	69.54	18.78	11.68
5	1	30	88.90	0.69	8.77	90.54
6	1	30	12.12	4.01	59.82	36.17
7	1	30	29.35	98.34	trace	1.66
8	1	30	29.84	98.35	trace	1.65
9	1	30	37.21	trace	trace	100.00
10	1	30	51.69	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	1.14	100.00	-	-
4	1	30	66.24	70.39	18.16	11.45
5	1	30	81.14	0.46	3.66	95.88
6	1	30	19.24	3.96	60.03	36.00
7	1	30	47.00	99.19	trace	0.81
8	1	30	48.13	99.20	trace	0.80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. 22 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ออคทานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	50.19	-	15.00	85.00
2	1	30	0.27	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	49.18	75.73	15.77	8.50
5	1	30	89.07	0.29	8.64	91.07
6	1	30	11.85	2.28	63.21	34.51
7	1	30	37.33	98.88	trace	1.12
8	1	30	37.60	98.89	trace	1.11
9	1	30	39.26	trace	trace	100.00
10	1	30	49.81	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.50	100.00	-	-
4	1	30	78.45	76.29	15.34	8.37
5	1	30	81.88	0.18	3.63	96.19
6	1	30	18.55	1.89	63.16	34.95
7	1	30	59.90	99.45	trace	0.55
8	1	30	60.40	99.46	trace	0.54

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.55	100.00	-	-
4	1	30	87.31	76.02	15.54	8.43
5	1	30	79.55	0.15	1.80	98.05
6	1	30	21.01	2.06	64.62	33.33
7	1	30	66.31	99.45	trace	0.55
8	1	30	66.86	99.45	trace	0.55

ตารางที่ ข. 23 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-โนนานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	43.55	-	15.00	85.00
2	1	30	0.18	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	57.54	80.03	13.50	6.47
5	1	30	87.09	0.13	9.01	90.86
6	1	30	10.12	1.78	64.75	33.47
7	1	30	47.42	99.04	0.84	0.12
8	1	30	47.60	99.05	0.84	0.12
9	1	30	30.64	trace	trace	100.00
10	1	30	56.45	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.22	100.00	-	-
4	1	30	92.36	80.59	13.05	6.36
5	1	30	83.87	0.07	4.23	95.70
6	1	30	16.36	0.95	64.74	34.31
7	1	30	76.00	97.72	0.79	1.49
8	1	30	76.22	97.72	0.79	1.49

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.50	100.00	-	-
4	1	30	102.53	80.42	13.19	6.39
5	1	30	80.30	0.06	1.84	98.10
6	1	30	20.21	2.24	66.91	30.85
7	1	30	82.32	99.60	trace	0.40
8	1	30	82.82	99.60	trace	0.40

ตารางที่ ข. 24 แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล ด้วยกรณีการใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-เดคานอล) ณ ร้อยละการสกัดเอทานอลใดๆ

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 50 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ก.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	51.25	-	15.00	85.00
2	1	30	0.26	100.00	-	-
3	1	30	100.00	trace	15.00	85.00
4	1	30	67.16	83.92	11.12	4.96
5	1	30	90.39	0.05	8.65	91.30
6	1	30	11.34	2.23	67.81	29.96
7	1	30	55.82	99.25	0.66	0.09
8	1	30	56.08	99.25	0.66	0.09
9	1	30	41.64	trace	trace	100.00
10	1	30	48.75	trace	15.00	85.00

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 80 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.12	100.00	-	-
4	1	30	107.40	83.77	11.25	4.98
5	1	30	84.20	0.03	5.05	94.91
6	1	30	16.39	0.56	67.57	31.87
7	1	30	91.01	98.25	1.46	0.29
8	1	30	91.13	98.25	1.46	0.29

- ณ การสกัดเอทานอลร้อยละ 90 โดยมวลของเอทานอลในสารละลายเริ่มต้น (ชนิด ข.2)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล		
				ตัวทำละลาย	เอทานอล	น้ำ
1	1	30	100.00	-	15.00	85.00
2	1	30	0.13	100.00	-	-
4	1	30	119.50	83.66	11.34	5.00
5	1	30	82.43	0.03	3.74	96.23
6	1	30	18.33	0.58	68.42	31.00
7	1	30	101.17	98.10	1.60	0.29
8	1	30	101.30	98.11	1.60	0.29

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค. 1 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 10 : 90

ตารางที่ 1. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวล (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ ˚C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	4	30	55.17	-	-	15.00	85.00
2	4	30	0.07	0.01	99.99	-	-
3	4	30	100.00	trace	trace	15.00	85.00
4	4	30	259.97	9.68	87.35	2.89	0.08
5	4	30	93.13	0.14	0.38	8.04	91.45
6	4	30	7.39	trace	0.94	99.04	0.02
7	4	30	252.58	9.96	89.87	0.08	0.08
8	4	30	252.65	10.00	89.92	trace	0.08
9	4	30	48.30	trace	trace	trace	100.00
10	4	30	44.83	trace	trace	15.00	85.00

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 80 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ ˚C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	4	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	4	30	0.38	25.18	74.82	-	-
4	4	30	412.05	9.68	87.31	2.93	0.08
5	4	30	88.29	0.11	0.28	3.34	96.28
6	4	30	12.17	trace	0.33	99.06	0.61
7	4	30	399.88	9.98	89.94	trace	0.08
8	4	30	400.26	9.99	89.92	trace	0.08

ตารางที่ 3. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ ˚C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	4	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	4	30	0.41	20.92	79.08	-	-
4	4	30	459.57	9.69	87.29	2.94	0.08
5	4	30	86.80	0.10	0.25	1.73	97.92
6	4	30	13.66	trace	0.82	98.88	0.30
7	4	30	445.92	9.98	89.93	trace	0.08
8	4	30	446.33	9.99	89.92	trace	0.08

ตารางที่ ค. 2 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 20 : 80

ตารางที่ 1. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวล (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	5	30	55.17	-	-	15.00	85.00
2	5	30	0.62	0.40	0.60	-	-
3	5	30	100.00	trace	trace	15.00	85.00
4	5	30	252.29	19.33	77.60	2.99	0.08
5	5	30	93.16	0.27	0.33	8.02	91.38
6	5	30	7.38	trace	0.10	98.85	1.05
7	5	30	244.91	19.91	79.94	0.10	0.05
8	5	30	245.53	19.98	79.93	trace	0.08
9	5	30	48.33	trace	trace	trace	100.00
10	5	30	44.83	trace	trace	15.00	85.00

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 80 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	5	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	5	30	0.44	42.74	57.26	-	-
4	5	30	402.96	0.19	0.78	0.03	trace
5	5	30	88.38	trace	trace	0.03	0.96
6	5	30	12.14	trace	0.32	99.04	0.63
7	5	30	390.82	19.96	79.95	trace	0.08
8	5	30	391.26	19.98	79.93	trace	0.08

ตารางที่ 3. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	5	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	5	30	0.45	38.11	61.89	-	-
4	5	30	445.53	19.35	77.53	3.03	0.08
5	5	30	86.85	0.19	0.22	1.73	97.86
6	5	30	13.66	0.01	0.65	98.86	0.48
7	5	30	431.87	19.97	79.95	trace	0.09
8	5	30	432.32	19.98	79.93	trace	0.09

ตารางที่ ค. 3 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 30 : 70

ตารางที่ 1. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวล (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	6	30	55.14	-	-	15.00	85.00
2	6	30	0.70	0.53	0.47	-	-
3	6	30	100.00	trace	trace	15.00	85.00
4	6	30	244.24	28.97	67.86	3.08	0.09
5	6	30	93.24	0.40	0.28	8.03	91.29
6	6	30	7.40	trace	0.06	99.02	0.91
7	6	30	236.84	29.88	69.98	0.08	0.06
8	6	30	237.53	29.97	69.94	trace	0.09
9	6	30	48.38	trace	trace	trace	100.00
10	6	30	44.86	trace	trace	15.00	85.00

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 80 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	6	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	6	30	0.50	55.37	44.63	-	-
4	6	30	391.95	29.02	67.82	3.08	0.09
5	6	30	88.39	0.31	0.20	3.33	96.16
6	6	30	12.18	0.01	0.34	99.09	0.57
7	6	30	379.77	29.95	69.96	trace	0.09
8	6	30	380.27	29.97	69.94	trace	0.09

ตารางที่ 3. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	6	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	6	30	0.53	47.63	52.37	-	-
4	6	30	431.47	29.01	67.78	3.13	0.09
5	6	30	86.91	0.29	0.18	1.73	97.79
6	6	30	13.70	0.01	0.84	98.57	0.57
7	6	30	417.77	29.95	69.96	trace	0.09
8	6	30	418.30	29.97	69.94	trace	0.09

ตารางที่ ค. 4 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 40 : 60

ตารางที่ 1. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวล (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	7	30	55.16	-	-	15.00	85.00
2	7	30	0.77	0.63	0.37	-	-
3	7	30	100.00	trace	trace	15.00	85.00
4	7	30	236.11	38.60	58.13	3.18	0.09
5	7	30	93.34	0.52	0.24	8.03	91.21
6	7	30	7.40	0.01	0.07	98.92	1.00
7	7	30	228.71	39.85	60.00	0.09	0.06
8	7	30	229.49	39.96	59.95	trace	0.09
9	7	30	48.49	trace	trace	trace	100.00
10	7	30	44.84	trace	trace	15.00	85.00

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 80 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	7	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	7	30	0.52	69.55	30.45	-	-
4	7	30	379.90	38.65	58.08	3.18	0.09
5	7	30	88.44	0.41	0.17	3.32	96.10
6	7	30	12.18	trace	0.05	99.07	0.88
7	7	30	367.72	39.93	59.97	trace	0.09
8	7	30	368.24	39.96	59.94	trace	0.09

ตารางที่ 3. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	7	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	7	30	0.53	62.07	37.93	-	-
4	7	30	418.13	38.64	58.04	3.23	0.09
5	7	30	86.96	0.37	0.15	1.73	97.74
6	7	30	13.65	0.01	0.48	98.90	0.61
7	7	30	404.48	39.94	59.96	trace	0.09
8	7	30	405.01	39.96	59.94	trace	0.09

ตารางที่ ค. 5 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 50 : 50

ตารางที่ 1. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวล (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ ˚C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	8	30	55.16	-	-	15.00	85.00
2	8	30	0.85	0.70	0.30	-	-
3	8	30	100.00	trace	trace	15.00	85.00
4	8	30	228.53	48.22	48.41	3.28	0.09
5	8	30	93.42	0.64	0.19	8.03	91.14
6	8	30	7.32	0.02	0.38	98.19	1.41
7	8	30	221.21	49.81	49.99	0.14	0.05
8	8	30	222.06	49.95	49.95	trace	0.10
9	8	30	48.58	trace	trace	trace	100.00
10	8	30	44.84	trace	trace	15.00	85.00

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 80 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ ˚C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	8	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	8	30	0.57	77.46	22.54	-	-
4	8	30	366.81	48.27	48.36	3.28	0.09
5	8	30	88.54	0.50	0.14	3.36	96.00
6	8	30	12.15	0.01	0.04	99.02	0.93
7	8	30	354.66	49.92	49.98	trace	0.10
8	8	30	355.23	49.95	49.95	trace	0.09

ตารางที่ 3. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ ˚C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	8	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	8	30	0.56	71.02	28.98	-	-
4	8	30	405.40	48.25	48.32	3.33	0.10
5	8	30	87.00	0.46	0.13	1.72	97.70
6	8	30	13.65	0.01	0.40	98.95	0.64
7	8	30	391.75	49.93	49.97	trace	0.10
8	8	30	392.31	49.95	49.95	trace	0.10

ตารางที่ ค. 6 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 60 : 40

ตารางที่ 1. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวล (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	9	30	55.18	-	-	15.00	85.00
2	9	30	0.90	0.78	0.22	-	-
3	9	30	100.00	trace	trace	15.00	85.00
4	9	30	221.98	57.82	38.70	3.39	0.10
5	9	30	93.47	0.75	0.15	8.01	91.09
6	9	30	7.25	0.03	0.34	97.59	2.03
7	9	30	214.73	59.86	40.04	trace	0.10
8	9	30	215.64	59.93	39.96	trace	0.10
9	9	30	48.65	trace	trace	trace	100.00
10	9	30	44.82	trace	trace	15.00	85.00

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 80 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	9	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	9	30	0.62	83.96	16.04	-	-
4	9	30	355.78	0.58	0.39	0.03	0.00
5	9	30	88.57	0.01	0.00	0.03	0.96
6	9	30	12.16	0.01	0.02	99.01	0.96
7	9	30	343.62	59.91	39.98	trace	0.10
8	9	30	344.24	59.94	39.96	trace	0.10

ตารางที่ 3. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	9	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	9	30	0.61	76.92	23.08	-	-
4	9	30	392.34	57.84	38.62	3.44	0.10
5	9	30	87.05	0.54	0.10	1.73	97.63
6	9	30	13.65	0.02	0.41	98.88	0.69
7	9	30	378.69	59.92	39.97	trace	0.10
8	9	30	379.30	59.94	39.96	trace	0.10

ตารางที่ ค. 7 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 70 : 30

ตารางที่ 1. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวล (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	10	30	55.18	-	-	15.00	85.00
2	10	30	0.97	0.83	0.17	-	-
3	10	30	100.00	trace	trace	15.00	85.00
4	10	30	214.91	67.40	29.00	3.50	0.10
5	10	30	93.54	0.86	0.11	8.01	91.02
6	10	30	7.40	0.01	0.04	97.75	2.20
7	10	30	207.51	69.80	30.03	0.14	0.03
8	10	30	208.48	69.92	29.97	trace	0.10
9	10	30	48.72	trace	trace	trace	100.00
10	10	30	44.82	trace	trace	15.00	85.00

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 80 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	10	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	10	30	0.67	88.89	11.11	-	-
4	10	30	339.70	67.41	28.95	3.54	0.11
5	10	30	88.65	0.67	0.08	3.38	95.87
6	10	30	12.13	0.01	0.03	98.96	1.01
7	10	30	327.57	69.91	29.98	trace	0.11
8	10	30	328.24	69.92	29.97	trace	0.11

ตารางที่ 3. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	10	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	10	30	0.64	83.50	16.50	-	-
4	10	30	384.80	67.44	28.95	3.51	0.10
5	10	30	87.09	0.61	0.07	1.73	97.58
6	10	30	13.65	0.02	0.32	98.94	0.72
7	10	30	371.16	69.91	29.98	trace	0.10
8	10	30	371.80	69.92	29.97	trace	0.10

ตารางที่ ค. 8 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 80 : 20

ตารางที่ 1. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวล (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	10	30	55.17	-	-	15.00	85.00
2	10	30	1.04	0.88	0.12	-	-
3	10	30	100.00	trace	trace	15.00	85.00
4	10	30	206.34	76.94	19.31	3.64	0.11
5	10	30	93.61	0.97	0.07	8.01	90.94
6	10	30	7.40	0.20	0.50	96.43	2.87
7	10	30	198.94	79.79	20.01	0.19	0.01
8	10	30	199.98	79.91	19.98	trace	0.11
9	10	30	48.78	trace	trace	trace	100.00
10	10	30	44.83	trace	trace	15.00	85.00

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 80 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	10	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	10	30	0.72	93.17	6.83	-	-
4	10	30	329.69	76.96	19.28	3.65	0.11
5	10	30	88.67	0.75	0.05	3.35	95.84
6	10	30	12.17	0.01	0.02	98.86	1.11
7	10	30	317.52	79.90	19.98	trace	0.11
8	10	30	318.24	79.91	19.98	trace	0.11

ตารางที่ 3. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	10	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	10	30	0.76	82.90	17.10	-	-
4	10	30	367.76	76.95	19.27	3.67	0.11
5	10	30	87.14	0.69	0.05	1.74	97.53
6	10	30	13.73	0.24	0.66	98.36	0.73
7	10	30	354.04	79.91	19.98	trace	0.11
8	10	30	354.80	79.91	19.98	trace	0.11

ตารางที่ ค. 9 แสดงองค์ประกอบของสารในกระแสต่างๆ ของกระบวนการแยกเอทานอล กรณีการใช้ตัวทำละลายผสม ในระบบ (เอทานอล-น้ำ-ก๊าซปิโตรเลียมเหลว) อัตราส่วนโพรเพนต่อบิวเทน 90 : 10

ตารางที่ 1. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 50 โดยมวล (ชนิด ก.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	11	30	55.17	-	-	15.00	85.00
2	11	30	1.09	0.93	0.07	-	-
3	11	30	100.00	trace	trace	15.00	85.00
4	11	30	199.78	86.48	9.65	3.76	0.12
5	11	30	93.66	1.08	0.04	8.01	90.88
6	11	30	7.40	0.19	0.21	96.65	2.95
7	11	30	192.38	89.79	10.01	0.19	0.01
8	11	30	193.47	89.90	9.99	trace	0.11
9	11	30	48.83	trace	trace	trace	100.00
10	11	30	44.83	trace	trace	15.00	85.00

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 80 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	11	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	11	30	0.81	93.60	6.40	-	-
4	11	30	321.61	86.52	9.63	3.73	0.11
5	11	30	88.73	0.83	0.03	3.39	95.76
6	11	30	12.19	0.21	0.24	98.39	1.16
7	11	30	309.42	89.91	9.98	trace	0.11
8	11	30	310.23	89.90	9.99	trace	0.11

ตารางที่ 3. แสดงองค์ประกอบและอัตราการไหลของสาร ที่ ร้อยละการสกัดเอทานอล 90 โดยมวล (ชนิด ข.1)

Stream NO.	ความดัน atm	อุณหภูมิ °C	อัตราการไหล (kg/h)	ร้อยละโดยมวล			
				โพรเพน	บิวเทน	เอทานอล	น้ำ
1	11	30	100.00	-	-	15.00	85.00
2	11	30	0.75	92.46	7.54	-	-
4	11	30	360.23	86.51	9.63	3.75	0.11
5	11	30	87.16	0.76	0.02	1.74	97.48
6	11	30	13.67	0.23	0.27	98.74	0.76
7	11	30	346.55	89.91	9.98	trace	0.11
8	11	30	347.30	89.90	9.99	trace	0.11

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สุธี อธิปัญญาพันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดลำปาง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2546 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย