



การประยุกต์ใช้เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สสำหรับการแยกบิวทานอลจากสารละลายแอซีโตน
บิวทานอล เอทานอล

Application of Gas Stripping Technique for Butanol Separation
from Acetone Butanol Ethanol Solution

นัสวานา โต๊ะหลัง
Naswana Tohlang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Applied Chemistry

Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้เทคนิคการเผาไล่ด้วยแก๊สสำหรับการแยกบิวทานอล
 จากสารละลายเอซีโตน บิวทานอล เอทานอล
 ผู้เขียน นางสาวนัสนา โต๊ะหลัง
 สาขาวิชา เคมีประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนา จรียาบุรณ์)

.....
 (ดร.สมรักษ์ พันธุ์ผล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตนา จรียาบุรณ์)

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประวิทย์ คงจันทร์)

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประวิทย์ คงจันทร์)

.....
 (ดร.ทัศนีย์ ศรีมาชัย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ดี ฟารุ่งแสง)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....รัตน.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตนา จริยาบุรณ์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....ประวิทย์.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประวิทย์ คงจันทร์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....นันทนา.....
(นางสาวนันทนา โตะหลัง)
นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....นางสาว.....

(นางสาวนันทนา โต๊ะหลัง)

(นักศึกษา)

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สสำหรับการแยกบิวทานอล จากสารละลายแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล
ผู้เขียน	นางสาวนัสวานา โตะหลัง
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

ไบโอบิวทานอลเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพทางเลือกที่น่าสนใจ บิวทานอลสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล (Acetone Butanol Ethanol : ABE) แต่มีหนึ่งปัญหาหลักคือความเข้มข้นของบิวทานอลที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก ABE ทำให้เกิดการยับยั้งการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียในการผลิตบิวทานอล ส่งผลให้บิวทานอลมีผลผลิตต่ำ การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างกระบวนการแยกบิวทานอลออกจากสารละลายผสมที่ประกอบด้วยบิวทานอล แอสีโตน เอทานอล กรดอะซิติก กรดบิวทิริกและกลูโคส ที่มีความเข้มข้น ABE แตกต่างกัน (5, 20 และ 30 g/L), อัตราการไหลของแก๊ส (1, 2 และ 3 L/min) และชนิดของแก๊สที่ใช้ในการเป่าไล่ (nitrogen gas และ H₂/CO₂ gas mixture at 20-60%H₂) ด้วยเทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊ส พบว่าการเป่าไล่ด้วยแก๊สผสมที่ความเข้มข้น 20% H₂ ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเป่าไล่เท่ากับ 49.49% ในขณะที่การเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจน (100% N₂) มีประสิทธิภาพการควบแน่นสูงสุดคือ 25.96% แอสีโตนมีประสิทธิภาพสูงสุดในการแยกออกจากถังหมักตามด้วยกรดอะซิติก บิวทานอล เอทานอลและกรดบิวทิริก ซึ่งอัตราการแยกบิวทานอลออกจากถังหมักเมื่อใช้ 100% N₂, 20% H₂, 40% H₂ และ 60% H₂ เท่ากับ 1.87, 1.19, 1.34 and 1.09 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ และความเข้มข้นบิวทานอลสูงสุดที่ควบแน่นได้ในชุดคอนเดนเซอร์ 150.92 กรัมต่อลิตร ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่ากระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของบิวทานอลในระบบ ผลิตบิวทานอลที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้ความต้องการในการใช้พลังงานในการทำบริสุทธิ์บิวทานอลในขั้นต่อไปลดลง

Thesis Title	Application of Gas Stripping Technique for Butanol Separation from Acetone Butanol Ethanol Solution
Author	Miss Naswana Tohlang
Major Program	Applied Chemistry
Academic Year	2017

ABSTRACT

Biobutanol has been proposed as an alternative fuel. Butanol can be produced from Acetone Butanol Ethanol (ABE) fermentation. One obstacle for ABE fermentation is the toxicity of butanol at high concentration during ABE fermentation which could potentially inhibit the metabolic pathways of butanol producing bacteria that causes low butanol productivity. This study aimed to create an integrated gas stripping process for butanol recovery from the mixed solution containing butanol, acetone, ethanol, acetic acid, butyric acid and glucose. The different ABE concentration (5, 20 and 30 g/L), stripping gas flow rate (1, 2 and 3 L/min) and stripping gas type (nitrogen gas, H₂/CO₂ gas mixture at 20-60% H₂) on the gas stripping process were studied. The highest gas stripping efficiency achieved when 20% H₂/CO₂ was used as stripping gas at the flow rate of 3 L/min with an average gas stripping efficiency of 49.49%. While, the highest stripped ABE condensation efficiency of 25.96% was observed when 100% N₂ was used as stripping gas. Acetone has the highest stripping selectivity followed by acetic acid, butanol, ethanol and butyric acid. The butanol removing rate from stripper of 1.87, 1.19, 1.34 and 1.09 g/L•h was found when 100% N₂, 20% H₂, 40% H₂ and 60% H₂, respectively was used. The recovered butanol in condensate has higher concentration of 150.92 g/L. The result indicated that, in the system the integrated stripping process is effective to reduced butanol and produced higher butanol concentration that can be further purified with less energy requirement.

Keywords: Butanol, ABE fermentation, Toxicity of Butanol, Gas stripping

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความร่วมมือ การช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ และกำลังใจจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. รัตนา จริยาบุรณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผศ.ดร. ประวิทย์ คงจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ดูแล ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ดี ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุน การ ค้น ค ว้ า วิ จ ย จาก บั ณ ฑิต วิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2558 ที่ได้อุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่แผนกวิชาเคมี หน่วยวิจัยการแปรรูปชีวมวลเพื่อพลังงานและ เคมีภัณฑ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา

นัสนาวา โตะหลัง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญรูป	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 บิวทานอล	4
2.1.1.1 สมบัติทั่วไปของบิวทานอล	4
2.1.1.2 ประโยชน์จากบิวทานอล	5
2.1.1.3 การใช้บิวทานอลเป็นเชื้อเพลิง	5
2.1.1.4 ข้อได้เปรียบระหว่างบิวทานอลกับเอทานอล	6
2.1.1.5 การสังเคราะห์บิวทานอลด้วยวิธีทางเคมี	7
2.1.2 กระบวนการผลิตตัวทำละลาย ABE ด้วยกระบวนการหมัก	8
2.1.2.1 ประวัติและที่มาของกระบวนการผลิตตัวทำละลาย ABE	8
2.1.2.2 การผลิตบิวทานอลจากกระบวนการหมัก	8
2.1.2.3 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการหมัก	9
2.1.3 แนวทางสำหรับลดความเข้มข้น ABE ในกระบวนการหมัก	11
2.1.3.1 กระบวนการเพอแวปอเรชัน (Pervaporation)	11
2.1.3.2 การสกัดตัวทำละลาย (Solvent Extraction)	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.3.3 การดูดซับ (Adsorption)	12
2.1.3.4 การเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Gas stripping)	12
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจน	15
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเป่าไล่ด้วยแก๊สผสม (CO ₂ +H ₂)	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1.สารเคมี วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ	20
3.1.1 สารเคมี	20
3.1.2 อุปกรณ์	20
3.1.3 เครื่องมือ	21
3.2 วิธีการทดลอง	21
3.2.1 การศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยก ABE จากสารละลายผสม ด้วยวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Gas stripping)	21
3.2.1.1 การเตรียมสารละลายผสม ABE	21
3.2.1.2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ของกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส	21
3.2.1.3 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส	23
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	26
4.1 ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของแอสซีโตน บิวทานอล เอทานอล ในถังปฏิกรณ์ที่ใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที	26
4.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สเป่าไล่	34
4.3 ผลของชนิดแก๊สเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการวิจัย	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	59
ภาคผนวก ก	65
ประวัติผู้เขียน	75

Prince of Songkla University
Pattani Campus

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของบิวทานอล แก๊สโซลีน และเอทานอล	7
2.2	Henry's Law Constants	14
2.3	สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจน	16
2.4	สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สผสม (CO ₂ +H ₂)	18
3.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	20
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.3	ชุดการทดลองการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ทำการทดลอง	24
4.1	ปริมาตรตัวทำละลายในคอนเดนเซท 1 จากการเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที	29
4.2	Mass distribution during the stripping process	33
4.3	ปริมาตรสารอินทรีย์ในคอนเดนเซท 1 จากการเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้น ABE 20 กรัมต่อลิตร	37
4.4	Mass distribution during the stripping process	41
4.5	ปริมาตรตัวทำละลายในคอนเดนเซท 1 จากการเป่าไล่ด้วยแก๊สผสม (CO ₂ +20%H ₂) ที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	45
4.6	ความเข้มข้นสารอินทรีย์ใน Impinger จากการเป่าไล่ด้วยแก๊สแก๊สผสม (CO ₂ +20%H ₂) ที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	49
4.7	ปริมาตรตัวทำละลายในคอนเดนเซท 1 จากการเป่าไล่ด้วยแก๊สผสม (CO ₂ +20%H ₂) ที่มีความเข้มข้น 20%, 40% และ 60% ของแก๊สไฮโดรเจน อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที	53
4.8	Mass distribution during the stripping process	56

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของ Bio-Butanol	4
3.1	ไดอะแกรมกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Gas stripping process)	22
3.2	ชุดกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส	22
4.1	ปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์จากการเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที	27
4.2	ค่าร้อยละในการแยกสารอินทรีย์โดยใช้แก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที	28
4.3	ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในคอนเดนเซท 1 จากการเป่าไล่ด้วย แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที	31
4.4	ประสิทธิภาพการควบแน่นของสารอินทรีย์โดยใช้แก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที	32
4.5	ค่าร้อยละในการแยกสารอินทรีย์โดยใช้แก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	34
4.6	ปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์จากการเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	36
4.7	ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในคอนเดนเซท 1 จากการเป่าไล่ด้วย แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	39
4.8	ประสิทธิภาพการควบแน่นของสารอินทรีย์โดยใช้แก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	40
4.9	ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์จากการใช้แก๊สผสม (CO ₂ +H ₂) ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	43
4.10	ค่าร้อยละในการแยกสารอินทรีย์โดยใช้แก๊สผสม (CO ₂ +H ₂) ที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	44
4.11	ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในคอนเดนเซท 1 จากการเป่าไล่ด้วย แก๊สผสม (CO ₂ +H ₂) ที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.12	ประสิทธิภาพการควบแน่นของสารอินทรีย์โดยใช้แก๊สผสม (CO_2+H_2) ที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที	48
4.13	ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ความเข้มข้น ABE 20 กรัมต่อลิตร โดยเปรียบเทียบชนิดแก๊สที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ในการเป่าไล่	51
4.14	ค่าร้อยละในการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทริก โดยเปรียบเทียบชนิดแก๊สที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ในการเป่าไล่	52
4.15	ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในชุดคอนเดนเซท 1 ที่ความเข้มข้นของ ABE 20กรัมต่อลิตร โดยเปรียบเทียบชนิดแก๊สที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ในการเป่าไล่	54
4.16	ประสิทธิภาพการควบแน่นของแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทริก โดยเปรียบเทียบการใช้แก๊สต่างชนิด ($100\%\text{N}_2$, $20\%\text{H}_2$, $40\%\text{H}_2$ และ $60\%\text{H}_2$) ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในโลกปัจจุบันที่มีพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญต่อภาคเศรษฐกิจ เมื่อราคาน้ำมันสูงขึ้นรวมถึงแหล่งที่มาหลักของพลังงานเชื้อเพลิงกำลังจะหมดลง พลังงานทางเลือกจึงเป็นทางออกในการแก้ปัญหา นักวิจัยจึงได้พัฒนาเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) เช่น ไบโอเอทานอล (Bioethanol) และไบโอบิวทานอล (Biobutanol) ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ได้โดยตรงหรือนำไปผสมกับน้ำมันเบนซิน โดยได้รับความสนใจและเสนอให้เป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถเป็นพลังงานทดแทนและพลังงานยั่งยืน เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางด้านเคมีและด้านกายภาพระหว่างบิวทานอลและเอทานอล ปรากฏว่าบิวทานอลมีประสิทธิภาพเหนือกว่าเอทานอล โดยบิวทานอลมีค่าออกเทนใกล้เคียงน้ำมันเบนซินมากกว่า ทำให้สามารถผสมกับน้ำมันเบนซินได้ดีกว่า ส่งผลดีต่อเครื่องยนต์มากกว่า มีความดันไอและความสามารถในการกักต่อน้อยกว่า จึงช่วยลดต้นทุนทางด้าน การการขนส่ง (Anbarasan *et al.*, 2012; Durre, 2008) ไบโอบิวทานอลสามารถผลิตได้จากแหล่งพลังงานหมุนเวียน สารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตคือ พืชที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย บีทรูท เป็นต้น ซึ่งจัดอยู่ในวัตถุดิบชีวมวลรุ่นที่ 1 สำหรับวัตถุดิบชีวมวลรุ่นที่ 2 เป็นวัตถุดิบที่ไม่สามารถรับประทานได้ เป็นกลุ่มของเซลลูโลสหรือลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ วัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม พืช มูลสัตว์รวมถึงขยะมูลฝอย เป็นต้น (Kumar *et al.*, 2009) สำหรับวัตถุดิบทั้ง 2 กลุ่มนี้มาจากพืชที่เป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ อีกทั้งยังต้องใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกเป็นจำนวนมาก ชีวมวลสาหร่ายจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้เปรียบในการนำมาเป็นสารตั้งต้น เพราะเป็นพืชที่เจริญเติบโตง่ายบนพื้นที่ที่ส่งผลกระทบน้อยต่อมนุษย์ (Nigam and Singh, 2011)

บิวทานอลสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักแอสีโตน บิวทานอล และเอทานอล (Acetone Butanol Ethanol : ABE) ซึ่งเกิดผลิตภัณฑ์ร่วมคือ แอสีโตนและเอทานอล โดยเชื้อแบคทีเรียตระกูล *Clostridium* เจริญเติบโตได้ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน ได้แก่ *Clostridium acetobutylicum* หรือ *Clostridium beijerinckii* จึงเรียกว่าการหมัก (Durre P *et al.*, 2007; Ezeji *et al.*, 2007) ซึ่งกระบวนการหมักแอสีโตน บิวทานอล และเอทานอล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตกรด (Acidogenesis) และขั้นตอนเปลี่ยนไปเป็นตัวทำละลาย (Solventogenesis) ซึ่งในระหว่างกระบวนการ Acidogenesis แบคทีเรียจะเปลี่ยน

จากคาร์โบไฮเดรตไปเป็นกรด ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ กรดอะซิติก และกรดบิวทริก จากนั้นแบคทีเรียได้เปลี่ยนจากกรดไปเป็นตัวทำละลายในขั้นตอน Solventogenesis ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์คือ แอซีโตน บิวทานอล และเอทานอลตามทฤษฎีในอัตราส่วน 3 : 6 : 1 (Ezeji *et al.*, 2004; Ezeji *et al.*, 2005; Ezeji *et al.*, 2007) นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการหมัก ABE คือแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Xue *et al.*, 2013)

ความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในลักษณะเป็นการยับยั้งจากผลิตภัณฑ์ (product inhibitor) เป็นปัญหาหนึ่งที่พบในกระบวนการหมักโดยเฉพาะบิวทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่า 12 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การหมักต้องยุติลง เนื่องจากบิวทานอลมีความเข้มข้นสูงเกิน สาเหตุมาจากบิวทานอลจะถูกดูดซับที่เยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ในส่วนที่เป็นกรดไขมันและฟอสโฟลิปิด ส่งผลทำให้ความสามารถในการคัดเลือกผ่านสารของเยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียไป นอกจากนี้ยังทำให้สารอาหารตั้งต้นที่ยังใช้ไม่หมดต้องเข้าสู่กระบวนการบำบัด เกิดความสิ้นเปลืองและส่งผลให้อัตราการเกิดผลิตภัณฑ์ต่ำ (Andrade and Vasconcelos, 2003) จากปัญหาตรงนี้ได้ศึกษาและค้นคว้าหาวิธีในการแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมัก โดยใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น การเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Gas stripping) การดูดซับ (adsorption) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) และเพอร์แวกเพอร์เรชัน (pervaporation) (Abdehagh *et al.*, 2014) สำหรับทุกกระบวนการที่กล่าวมาสามารถลดความเป็นพิษของบิวทานอลและเพิ่มประสิทธิภาพของการหมัก ABE ได้ แต่สำหรับกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และมีข้อได้เปรียบมากกว่ากระบวนการอื่น ๆ เช่น เป็นวิธีที่ง่าย วิธีนี้สามารถต่อเข้ากับกระบวนการหมักได้อย่างง่าย ใช้ต้นทุนต่ำในการดำเนินระบบ ไม่ก่อให้เกิดคราบ และการหลุดตันจากชีวมวล ไม่เป็นอันตรายต่อเชื้อแบคทีเรียเนื่องจากกระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊สเป็นเทคนิคที่แยกเฉพาะสารระเหยออกจากน้ำหมักและไม่นำสารอาหารออกมาจากน้ำหมัก ที่สำคัญสามารถใช้แก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักและนำแก๊สกลับไปใช้ในระบบได้อีกครั้ง (Lu *et al.*, 2013; Lu *et al.*, 2014; De vrije *et al.*, 2013) ซึ่งการเป่าไล่ด้วยแก๊สเป็นเทคนิคที่ช่วยให้การแยกสารระเหยออกจากน้ำหมัก นิยมใช้ในการแยกสารละลายที่ระเหยออกได้ง่าย เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยและตัวทำละลาย คุณสมบัติการระเหยของผลิตภัณฑ์ ABE ง่ายต่อเทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ซึ่งแก๊สจะถูกพ่นเข้าไปในถังหมัก ตัวทำละลายจะละลายในแก๊สและถูกพาออกมาจากน้ำหมัก โดยกระบวนการควบแน่นไหลผ่านคอนเดนเซอร์และสามารถหมุนเวียนแก๊สกลับไปใช้ในกระบวนการต่อได้ การเป่าไล่ด้วยแก๊สเป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับการแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมักในระหว่างกระบวนการหมัก

แก๊สที่ได้จากกระบวนการหมัก ABE มีความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนระหว่าง 36% และ 60% (Intanoo *et al.*, 2016) สามารถนำมาใช้เป็นแก๊สตัวพาสารออกจากถังหมัก และเข้าสู่กระบวนการควบแน่นเพื่อแยกตัวทำละลายออกจากกระแสแก๊ส โดยมีการควบคุมอุณหภูมิในช่วง

-5 ถึง -10 องศาเซลเซียส สามารถควบแน่นตัวทำละลาย ABE ที่มีความเข้มข้น 106.7 กรัมต่อลิตร (Chen *et al.*, 2014) สามารถควบแน่น ABE ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 116 – 204 กรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแยกตัวทำละลายให้มีความบริสุทธิ์

ประสิทธิภาพการเป่าไล่ด้วยแก๊สขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของ stripping gas ความเข้มข้นของตัวทำละลาย ABE อุณหภูมิของระบบการควบแน่นและพื้นที่ผิว ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อกระบวนการแยก ABE โดยเฉพาะ บิวทานอลออกจากน้ำหมักในระหว่างกระบวนการหมัก

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษาผลของปัจจัยของความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวทำละลาย ABE อัตราการไหลและชนิดของ stripping gas ต่อประสิทธิภาพการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล (ABE) ออกจากสารละลายผสมโดยวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ดังนี้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 สร้างระบบการเป่าไล่ด้วยแก๊สในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบด้วย stripper/fementer ขนาด 3.5 ลิตร และระบบหล่อเย็นเพื่อให้เกิดการควบแน่นของ ABE

1.3.2 ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพต่อการแยก แอสีโตน บิวทานอล และเอทานอล (ABE) ออกจากสารผสม ดังนี้

- ความเข้มข้นของ ABE เริ่มต้น 5 20 และ 30 กรัมต่อลิตร
- อัตราการไหลของ stripping gas 1.0 2.0 และ 3.0 ลิตรต่ออนาที
- ความเข้มข้นของ stripping gas 100% N₂ แก๊สผสม (H₂ + CO₂) ที่ความเข้มข้น เข้มข้น 20% H₂ 40% H₂ และ 60% H₂

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสถานะดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับเพิ่มผลผลิตการหมัก ABE โดยวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊ส

1.4.2 สามารถนำกระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊สประยุกต์ใช้กับกระบวนการหมัก ABE

บทที่ 2

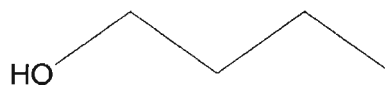
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 บิวทานอล

2.1.1.1 สมบัติทั่วไปของบิวทานอล

บิวทานอล (IUPAC Nomenclature, 1-butanol: CAS no. 71-36-3) เป็นที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อ บิวทิลแอลกอฮอล์ (Butyl alcohol) มีองค์ประกอบของคาร์บอน 4 คาร์บอนอะลิฟาติกแอลกอฮอล์ (4-carbon Aliphatic Alcohol) สายตรง มีสูตรโครงสร้างโมเลกุล C_4H_9OH แสดงในรูปที่ 2.1 น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 74.12 กรัมต่อโมล บิวทานอลเป็นสารที่ไม่มีสี ไร้ไฟ เป็นของเหลวที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Slightly Hydrophobic Liquid) และละลายน้ำได้เล็กน้อย มีกลิ่นคล้ายคลึงกับกล้วยและมีกลิ่นแอลกอฮอล์ที่รุนแรง จะมีอาการระคายเคืองต่อตาและผิวหนังเมื่อสัมผัสโดยตรง ไอระเหยของบิวทานอลก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อบุโพรงจมูกได้เช่นกัน บิวทานอลมีคุณสมบัติที่สามารถรวมกับสารตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี แต่สามารถแยกออกจากสารเคมีตัวอื่น ๆ ที่จัดอยู่ในกลุ่มแอลกอฮอล์ คือ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และยังสามารถแยกออกจากน้ำได้ (Lee *et al.*, 2008; Durre, 2008) โดยบิวทานอลสามารถละลายในน้ำเมื่อมีความเข้มข้น 7.9 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (Xue *et al.*, 2013)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ Bio-Butanol

(Wikimedia Commons)

บิวทานอลสามารถผลิตได้จากกระบวนการ 3 วิธี คือ 1.จากกระบวนการทางเคมีที่มาจากน้ำมันหรือไฮโดรคาร์บอน 2.กระบวนการขั้นสูง โดยมีสารตั้งต้นจากหลากหลายชนิด 3.กระบวนการหมัก (Fermentation) ที่ได้จากชีวมวลสำหรับวิธีที่นิยมในปัจจุบันคือ การหมัก (Fermentation) โดยใช้แบคทีเรียและยีสต์ที่เหมาะสม เชื้อแบคทีเรียที่มักจะเป็นเชื้อแบคทีเรียในตระกูล Clostridium

2.1.1.2 ประโยชน์จากบิวทานอล

นอกจากนำบิวทานอลมาเป็นเชื้อเพลิงเหลวใช้กับเครื่องยนต์แล้วบิวทานอลยังมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมทางเคมีมากมาย บิวทานอลส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบเอสเทอร์ (Ester Derivative) เช่น บิวทิล อะคริเลต (Butyl Acrylate) ซึ่งใช้เป็นสารตัวกลางในปฏิกิริยาเคมี เป็นสารเคลือบผิว และเป็นสารผสมในสี นอกจากนี้บิวทานอลยังเป็นสารที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการเป็นตัวทำละลายสำหรับการเคลือบไม้ และวัสดุต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ (Acid Curable Lacquers และ Baking Finish) นอกจากนี้การใช้ประโยชน์จากบิวทานอลและสารประกอบอื่น ๆ คือ เป็นทินเนอร์สำหรับผสมสี (Paint Thinner) เป็นตัวทำละลายในสี (Solvent for Dyes) เช่น หมึกปริ้น และเป็นสารสกัดในกระบวนการผลิตยาและสารธรรมชาติ เช่น ยาปฏิชีวนะ (Antibiotic) ฮอร์โมน (Hormones) และวิตามิน (Vitamins) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้ประโยชน์จากบิวทานอลในด้านอื่น ๆ เช่น กระจกนิรภัย (Safety Glass) ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด (Detergenrs) อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เช่น สารตกแต่งตา (Eye make-up) ยาทาเล็บ สารในผลิตภัณฑ์น้ำยาโกนหนวด ผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสุขภาพอนามัยและยังเป็นสารสำหรับการสกัด และอุตสาหกรรมอาหารและกลิ่น

2.1.1.3 การใช้บิวทานอลเป็นเชื้อเพลิงเหลว

ไบโอบิวทานอล เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพขั้นสูงที่มีแนวโน้มว่าจะสามารถบรรเทาปัญหาของแหล่งน้ำมันที่กำลังจะลดลง ลดปัญหาภาวะโลกร้อนและมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากมีปริมาณพลังงานสะสมสูง ระเหยได้ยาก และสามารถผสมเข้ากับน้ำมันเบนซินได้ดี นอกเหนือจากนั้นยังใช้สำหรับการสังเคราะห์สารเคมีในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบ เช่น บิวทิลอะคริเลต เป็นสารตัวกลางในปฏิกิริยาเคมี เป็นสารผสมในสีและเป็นสารเคลือบผิว หรือแม้กระทั่งเป็นตัวทำละลายสำหรับสารเคลือบไม้ และวัสดุต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ยังมีการใช้ประโยชน์จากบิวทานอลในด้านอื่น ๆ คือ เป็นทินเนอร์สำหรับผสมเป็นตัวทำละลายในสี เป็นสารสกัดในกระบวนการผลิตยาและสารสกัดจากธรรมชาติ อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นสารสำหรับการสกัด อุตสาหกรรมอาหารและกลิ่น เป็นต้น (Lee *at al.*, 2008; Durre, 2008)

บิวทานอลได้ถูกเสนอให้เป็นพลังงานทดแทนที่ยั่งยืน สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์ได้ในอนาคต ถึงแม้ว่า ณ ตอนนี้อยู่ด้วยเหตุผลหลายประการเอทานอลยังคงเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่นิยมในปัจจุบันมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามบิวทานอลจัดเป็นสารที่มีข้อดีกว่าเอทานอลหลายประการเมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางระดับพลังงานหลายประการที่ดีกว่าเอทานอล กล่าวคือ บิวทานอลมีค่าเลขออกเทนใกล้เคียงน้ำมันเบนซินจึงทำให้ผสมเข้ากันได้ดีกว่าเอทานอล จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ที่มีค่าพลังงานและจุด

เดือดสูงกว่าเอทานอล มีความดันไอและความสามารถในการกักต่อน้อยกว่าเอทานอล จึงสามารถขนส่งทางท่อได้ทำให้ลดต้นทุนในเรื่องของการขนส่ง และพบว่าการใช้ไบโอบิวทานอลมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และการปลดปล่อยสารพิษ NO_x ลดลงมาก ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมของโลกอย่างยิ่ง และที่สำคัญสามารถผลิตไบโอบิวทานอลจากชีวมวลประเภทเดียวกันกับการผลิตไบโอเอทานอล

2.1.1.4 ข้อได้เปรียบระหว่างบิวทานอลกับเอทานอล

- 1) การระเหย (Volatility) ต่ำกว่า จึงเป็นพิษน้อยกว่า (มีค่า Reid Vapor Pressure (RVP) ต่ำกว่า 7.5 เมื่อเปรียบเทียบกับเอทานอล)
- 2) การใช้บิวทานอลปลอดภัยกว่าเอทานอล เนื่องจากมีค่าการติดไฟ (Flash Point) สูงกว่า (350°C และ 140°C ตามลำดับ) และมีค่าแรงดันเป็นไอต่ำกว่า
- 3) บิวทานอลมีค่าพลังงานสูงกว่าเอทานอล โดยบิวทานอลมีค่า 110,000 BTU ต่อแกลลอน ในขณะที่เอทานอลมีค่า 84,000 BTU ต่อแกลลอน
- 4) บิวทานอลไม่ดูดซับความชื้น (จึงมีค่า Hygroscopicity ต่ำกว่าเอทานอล)
- 5) บิวทานอลมีค่าการกักต่อน้อยกว่าเอทานอล
- 6) บิวทานอลมีค่าออกเทนใกล้เคียงกับน้ำมัน
- 7) สามารถผสมรวมกับทั้งแก๊สโซลีนและดีเซลได้สมบูรณ์

ดังนั้น จึงทำให้การใช้บิวทานอลเป็นเชื้อเพลิงที่มีความปลอดภัย รวมทั้งอุปกรณ์ การเก็บและการเติมบิวทานอลยังสามารถใช้อุปกรณ์ที่ใช้ในสถานีเติมน้ำมันและรถยนต์ได้ โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนใด ๆ เลย (Durre, 2007) ในขณะที่การผสมเอทานอลอยู่ในระบบต้องจำกัดให้อยู่ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ จึงเหมาะสม อีกทั้งบิวทานอลยังไม่กระทบต่อระบบการเก็บและการเติมเชื้อเพลิงเหลวเหล่านี้ การที่ค่าแรงดันการเป็นไอ (Vapor pressure) ของบิวทานอลที่มีค่าเท่ากับ 4 มิลลิเมตรปรอทที่ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเอทานอล 11 เท่า โดยเอทานอลมีค่าเป็น 45 มิลลิเมตรปรอทที่ 20 องศาเซลเซียส จึงทำให้บิวทานอลสามารถเติมได้โดยตรงกับแก๊สโซลีน ไม่มีการสูญเสียจากการระเหยจึงไม่มีผลกระทบข้างเคียง และจากคุณสมบัติของบิวทานอลทำให้สะดวกต่อการผสมกับแก๊สโซลีน โดยไม่มีการแยกชั้นในที่มีน้ำอยู่ด้วยก็ตาม แต่มีค่าออกเทนใกล้เคียงกับแก๊สโซลีนสามารถเติมสารเพิ่มค่าออกเทนได้เมื่อเปรียบเทียบการผสมเชื้อเพลิงชีวภาพอื่น ๆ กับแก๊สโซลีนแสดงในตารางที่ 1 ด้วยเหตุผลดังกล่าวบริษัทน้ำมันหลาย ๆ บริษัทจึงสนใจและลงทุนในโครงการการผลิตบิวทานอลจากชีวมวล หากดูแล้วบริษัทที่มีความสนใจในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ คือ BP และ Dupont ซึ่งมีความร่วมมือกับหลายองค์กรทางการวิจัยและการศึกษาในการพัฒนาและผลิตไบโอบิวทานอลในระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของบิวทานอล แก๊สโซลีน และเอทานอล (Lee, 2008 และ Davis, 2008)

คุณสมบัติ	บิวทานอล	แก๊สโซลีน	เอทานอล
ความหนาแน่นพลังงาน	29.2	32	19.6
อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันและอากาศ	11.2	14.6	9
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	0.43	0.36	0.92
ปริมาณพลังงาน	110,000	115,000	84,000
ความสามารถในการละลาย 100 กรัม	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ละลาย
ค่าออกเทนโดยวิธีวิจัย	96	91-99	129
ค่าออกเทนโดยวิธีมอเตอร์	78	81.89	102

2.1.1.5 การสังเคราะห์บิวทานอลด้วยวิธีทางเคมี

บิวทานอลที่ถูกผลิตขึ้นในระดับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะผลิตจากกระบวนการทางเคมี 3 กระบวนการ ได้แก่ Oxo process, Reppe process และ Crotonaldehyde hydrogenation ในการสังเคราะห์บิวทานอลด้วยวิธี Oxo process (Hydroformylation) ต้องมีการเติม Carbon monoxide และ Hydrogen เพื่อเข้าไปแทนที่หมู่ Hydrocarbonyl อย่างต่อเนื่อง โดยมีโลหะจำพวก Co, Rh หรือ Ru เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง Aldehyde ที่เกิดขึ้นในระยะแรกจะถูกเปลี่ยนให้กลายเป็น บิวทานอลในกระบวนการ Hydrogenation ต่อไป ทั้งนี้ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ และชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา โดยบิวทานอลที่ได้จากปฏิกิริยานี้จะได้ Isomer ที่แตกต่างกันหลายชนิด ส่วนการสังเคราะห์บิวทานอลผ่านกระบวนการ Reppe จะอาศัยการเกิดปฏิกิริยาร่วมกันของ Propylene, Carbon monoxide ในขณะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดการผสมของ n-butaldehyde และ Isobutaldehyde ต่อมาจะถูกกลดรูปให้เป็น บิวทานอล การสังเคราะห์บิวทานอลด้วยวิธี Reppe นี้ จะทำให้ได้บิวทานอลโดยตรง ไม่ผ่านตัวกลางภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิและความดันต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการผลิตบิวทานอลวิธีนี้ไม่สามารถผลิตได้ในเชิงการค้า เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือและเทคโนโลยีที่ทันสมัยซึ่งมีราคาแพง จนกระทั่งสิบปีที่ผ่านมาได้มีการผลิตบิวทานอลจาก Acetaldehyde ผ่านกระบวนการ Crotonaldehyde hydrogenation ที่ประกอบไปด้วยขั้นตอน Aldol condensation, Dehydration และ hydrogenation ถึงแม้ว่ายังมีการใช้วิธีนี้ในการผลิตบิวทานอลไม่มากนัก แต่ในอนาคตอันใกล้การผลิตบิวทานอลจากกระบวนการ Crotonaldehyde hydrogenation อาจจะเป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีความสำคัญเนื่องจาก Crotonaldehyde สามารถผลิตได้จากเอทานอล โดยกระบวนการ Dehydrogenation ทั้งนี้เอทานอลสามารถผลิตได้จากสารชีวมวล โดยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งการผลิตบิวทานอลจากการ

สังเคราะห์ทางเคมีด้วยวิธีอื่น ๆ ต้องอาศัยวัตถุดิบหรือสารตั้งต้นที่มาจากอนุพันธ์ของสารปิโตรเลียม ซึ่งนับวันยิ่งหายากและลดน้อยลง (Lee et al., 2008S)

2.1.2 กระบวนการผลิตตัวทำละลายเอซีโตน บิวทานอล เอทานอลด้วยกระบวนการหมัก

2.1.2.1 ประวัติและที่มาของกระบวนการผลิตตัวทำละลาย ABE

การผลิตบิวทานอลโดยเชื้อจุลินทรีย์ได้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1861 โดยหลุยส์ พาสเตอร์ (Jones and Wood, 1986) ต่อมา Schardinger ได้ค้นพบเอซีโตนจากกระบวนการเดียวกันกับหลุยส์ พาสเตอร์ ในปี ค.ศ. 1905 กระบวนการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ได้แก่ เอซีโตน บิวทานอล และเอทานอล โดยกระบวนการหมักได้ถูกพัฒนาขึ้น เนื่องจากมาจากปัญหาการขาดแคลนยางธรรมชาติ โดยบิวทานอลเป็นสารตั้งต้นของการผลิตบีตาไดอีน ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักของการผลิตยางสังเคราะห์ ส่วนเอซีโตนนั้นมีความสำคัญในการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตวัฏระเบิดในสงครามโลกครั้งที่ 1 ภายหลังสงครามยุติความต้องการเอซีโตน จึงลดน้อยลง แต่กลับมีความต้องการเอซีโตนมากขึ้นในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์และอุตสาหกรรมสีทา (Jones and Wood, 1986) ความสำคัญของกระบวนการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ดังกล่าว โดยกระบวนการหมักเริ่มลดลง ภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 แต่กลับมาเริ่มได้รับความสนใจมากขึ้นในปี ค.ศ. 1973 และปี ค.ศ. 1979 เป็นต้นมา เนื่องจากราคาน้ำมันดิบของโลกเริ่มมีราคาสูงขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตาม กระบวนการหมักดังกล่าวก็ยังมีต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูงอยู่เหมือนกัน เมื่อเทียบกับกระบวนการสังเคราะห์จากปิโตรเลียม (Jones and Wood, 1986)

2.1.2.2 การผลิตบิวทานอลจากกระบวนการหมัก

ไบโอบิวทานอลสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมัก เอซีโตน บิวทานอล เอทานอล (Acetone butanol ethanol fermentation) หรือเรียกว่า การหมัก ABE ซึ่งมีแบคทีเรียหลายสกุลที่สามารถนำมาใช้ในการหมัก ABE ได้ โดยแบคทีเรียสกุล *Clostridium* เป็นสกุลที่นิยมใช้กันมากที่สุด เป็นแบคทีเรียดัดสีแกรมบวก มีรูปร่างเป็นท่อน สามารถสร้างสปอร์และเจริญได้ดีในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) สามารถคัดแยกได้จากหลายแหล่ง ปัจจุบันแบคทีเรียในสกุลนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความสามารถในการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ โดยเฉพาะสายพันธุ์ *C. acetobutylicum* sp. และ *C. beijerinckii* sp. ซึ่งแบคทีเรียดังกล่าวนี้สามารถเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตหลายชนิดให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย เช่น เอซีโตน บิวทานอล และเอทานอล ด้วยกระบวนการ ABE fermentation และยังสามารถใช้แหล่งคาร์บอนได้หลายชนิด เช่น กลูโคส (Glucose) ซูโครส (Sucrose) แลคโทส (Lactose) ไชโลส (Xylose) ไชเลน (Xylane) แป้งและกลีเซอรอล (Andrade and Vasconcelos, 2003; Mitchell, 1998) ซึ่งแหล่งคาร์บอนเหล่านี้มีอยู่หรือสามารถผลิตได้จากชีวมวลที่มีอยู่หลากหลายโดยในสภาวะที่เหมาะสม แบคทีเรียในกลุ่มนี้จะผลิตผลิตภัณฑ์

หลักคือ บิวทานอล และแอสีโตน แต่ถ้าสภาวะที่ไม่เหมาะสมแบคทีเรียกลุ่มนี้จะผลิตแอสีโตนและเอทานอล เป็นหลัก

กลไกการหมัก ABE ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การผลิตกรดบิวทิริกและกรดอะซิติกในขั้นตอน acidogenesis ตามด้วยการผลิตตัวทำละลาย ABE ในขั้นตอน solventogenesis โดยแบคทีเรียจะผลิตตัวทำละลาย ABE ผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึมเป็นไพรูเวท จากนั้นทำปฏิกิริยาต่อเนื่องเปลี่ยนเป็น Acetyl-CoA Acetoacetyl-CoA และ Butyryl-CoA ตามลำดับ ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ ตัวทำละลายแอสีโตน บิวทานอล และเอทานอล ในอัตราส่วน 3:6:1 โดยประมาณ และยังผลิตกรดบิวทิริก กรดอะซิติก แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (อังคณา และคณะ, 2553) วิถีเมแทบอลิซึม (Metabolic pathways) ของการสลายกลูโคสโดย *Clostridium* (Ezejl *et al.*, 2007b) ซึ่งในระยะแรกมีการผลิตกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดบิวทิริก และกรดอะซิติก เกิดขึ้นในช่วง 7-18 ชั่วโมงแรก เป็นเหตุให้ค่า pH ในน้ำหมักลดลง หลังจากนั้นระยะที่สองช่วงของการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ ปกติจะเกิดขึ้นภายหลังจากการเริ่มหมักไปแล้ว 18 ชั่วโมง จนถึง 36 หรือ 60 ชั่วโมง ในช่วงนี้ ค่า pH ของน้ำหมักจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และมีการนำกรดอินทรีย์บางส่วนไปใช้ในช่วงแรกเพื่อผลิตตัวทำละลาย

2.1.2.3 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการหมัก

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการหมักบิวทานอล ได้แก่

- 1) ซับสเตรต (Substrate) วัตถุดิบที่นำมาใช้เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการผลิตเมแทบอลิซึมที่ต้องการ
- 2) เชื้อจุลินทรีย์ (Microorganism) ในช่วงการหมัก มีสิ่งสำคัญประการหนึ่งคือการเตรียมหัวเชื้อสำหรับการหมัก เป็นการเตรียมจุลินทรีย์ให้แข็งแรงและมีปริมาณมากพอต่อการหมักและปราศจากการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการ
- 3) ความเป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ จากกระบวนการหมัก แอสีโตน บิวทานอล และเอทานอล (ABE) ด้วยเชื้อแบคทีเรีย แต่สำหรับผลผลิตที่ได้จากกระบวนการหมักเป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์เองในลักษณะที่เป็นตัวยับยั้งผลิตภัณฑ์ (Product inhibitor) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บิวทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่า 12 กรัมต่อลิตรในน้ำหมัก (Andrade and Vasconles, 2003) ทำให้เกิดปัญหาซึ่งได้ผลิตภัณฑ์บิวทานอลที่มีความเข้มข้นต่ำในการหมักแต่ละครั้ง นอกจากนั้นการที่บิวทานอลมีความเข้มข้นสูงส่งผลทำให้การหมักยุติเร็ว สารอาหารยังใช้ไม่หมด จากปัญหาดังกล่าว ทำให้ต้องมีการแยกบิวทานอลออกระหว่างกระบวนการหมัก เพื่อให้ปริมาณความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์บิวทานอลในน้ำหมักอยู่ระดับต่ำกว่าช่วงที่จะทำให้เกิดความเป็นพิษได้

4) ผลของธาตุอาหาร เกลือแร่ และวิตามินต่อการหมัก ได้แก่ คาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุอาหารสำคัญที่ได้จากซัสเตรต นอกจากนี้ยังมีธาตุอาหารตัวอื่น ๆ ได้แก่ ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และวิตามิน

5) อุณหภูมิ ถือว่ามีความสำคัญมากต่อการหมักเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งอัตราการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการหมักโดยใช้น้ำตาลเป็นวัตถุดิบนั้น จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 30 องศาเซลเซียส และ 33 องศาเซลเซียส แต่จะลดลงที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (Jones and Woods, 1986) ผลที่คล้ายกันนี้สอดคล้องกับการหมักโดยใช้อาหารสังเคราะห์ (Synthetic medium) โดย Mcneil และ Kristiansen (1985) เมื่อทำการทดลอง Mcneil และ Kristiansen พบว่าผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเจริญและการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ในถังหมักแบบกะของ *C. acetobutylicum* คือผลผลิตตัวทำละลายอินทรีย์รวม (Total solvent yield) มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเพราะการลดลงของการผลิตแอสีโตน และพบว่าบิวทานอลจะไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิในรูปของผลผลิตตัวทำละลายอินทรีย์รวมและอัตราการผลิต

6) ตัวยับยั้ง Ezeji et al. (2007a) ศึกษาผลของสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างการไฮโดรไลซิสของวัสดุลิกโนเซลลูโลส (จากข้าว และข้าวโพด) ด้วยกรดซัลฟิวริก ได้แก่ Hydroxymethyl Furfural (HMF), Acetic, Ferulic, Furfural, Glucuronic, Syringaldehyde, Phenolic compounds and *p*-coumaric acids ต่อการทำงานของ *C. beijerinckii* BA101 ในกระบวนการหมัก ABE ผลการทดลองพบว่า Furfural และ HMF ที่ความเข้มข้น 3 กรัมต่อลิตร ไม่ยับยั้งการทำงานของ *C. beijerinckii* BA101 ในขณะที่สารตัวอื่นแสดงการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก นอกจากนี้ยังพบว่าเกลือ Sodium Sulfate (13.3 กรัมต่อลิตร) และ Sodium Acetate (8.9 กรัมต่อลิตร) ก็ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียเช่นเดียวกัน โดยตัวหลักในการยับยั้งแบคทีเรียในกระบวนการหมักคือ บิวทานอลที่เกิดขึ้น โดยจะแสดงความเป็นพิษที่ความเข้มข้นสูงกว่า 12 กรัมต่อลิตร (Andrade and Vasconcelos, 2003)

7) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และผลิตภัณฑ์กรดในขั้นสุดท้ายในน้ำหมัก ค่า pH จะเป็นตัวกำหนดการย่อยของน้ำตาล มีรายงานหลายฉบับรายงานว่า ถ้ารักษาค่า pH ของน้ำหมักไว้ที่ค่าสูง ๆ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ของการหมักเป็นกรดอินทรีย์ ในทางตรงกันข้ามถ้ารักษาค่า pH ไว้ที่ค่าต่ำ ๆ ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ อย่างไรก็ตามช่วงของ pH ที่จะทำให้มีการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์จะอยู่ในช่วงกว้างมาก ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของจุลินทรีย์และสภาวะที่เหมาะสมของการหมักด้วย ช่วงของการหมักที่มีการสร้างตัวทำละลายอินทรีย์มักอยู่ในช่วง pH 3.8 ถึง 5.5 (Lee et al., 2008b) อย่างไรก็ตามแบคทีเรียที่ใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรมอย่าง

C. acetobutylicum P262 สามารถผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดีในช่วง pH 6.5 (Jones and Woods, 1986)

กรดอินทรีย์อย่างอ่อน (Weak organic acid) เช่น กรดบิวทริก และกรดอะซิติกถูกสร้างเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย (End-product) ของปฏิกิริยา โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นพิษต่อเซลล์และสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) ในรูปที่ไม่แตกตัว ที่ความเข้มข้นของกรดสูง ๆ ค่า pH ที่ผิวของเยื่อหุ้มเซลล์จะลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุในการยับยั้งปฏิกิริยาเมแทบอลิซึมทั้งหมดของเซลล์ ภายในตัวเซลล์ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าจะมีการสะสมของกรดและการลดลงของค่า pH จึงทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลงจนกระทั่งหยุดชะงักในที่สุด ถึงแม้ว่าการใช้วัตถุดิบและเมแทบอลิซึมของเซลล์ยังดำเนินไป ดังนั้นจึงมีข้อเสนอว่า จุดที่เปลี่ยนเป็นระยะ Solventogenesis คือกลไก Detoxification ของเซลล์เพื่อกำจัดผลที่เกิดขึ้น เนื่องจากการยับยั้งเมื่อเกิดกรดในขั้นตอนสุดท้ายถึงระดับช่วงที่มีพิษ โดยทั่ว ๆ ไป การเริ่มต้นของระยะ Solventogenesis จะเกิดขึ้นพร้อมกันขณะที่ pH ของสารอาหารมีค่าต่ำและมีกรดในรูปที่ไม่แตกตัวอยู่ในช่วงวิกฤต (Lee *et al.*, 2008b) ดังนั้นความเข้มข้นของ Butylate จะต่ำเมื่อค่า pH ต่ำ (Jones and Woods, 1986) ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายว่าผลของ pH เป็นผลจากความเข้มข้นของกรดบิวทริกที่ไม่แตกตัวและสิ่งนี้เป็นปัจจัยควบคุมการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์

2.1.3 แนวทางการลดความเข้มข้นของ ABE ในกระบวนการหมัก

2.1.3.1 กระบวนการเพอแวปอเรชัน (Pervaporation)

กระบวนการแยกสารละลายผ่านเยื่อเลือกผ่านแบบแน่น โดยสารที่ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (เพอมีเอท) จะอยู่ในสภาพของไอ โดยมีการควบคุมความดันด้านขาออกให้ต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวของสารดังกล่าวตามกลไกการละลาย/แพร่ การแยกเกิดขึ้นได้เนื่องจากองค์ประกอบต่าง ๆ ในสารละลายมีความสามารถในการละลาย/แพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านไม่เท่ากัน เยื่อเลือกผ่านที่สามารถใช้ในการแยกบิวทานอล ได้แก่ Silicone-silicalite membranes, Polytetrafluoroethylene (PTFE), Polyvinylidenedifluoride (PVDF) Polydimethylsiloxane (PDMS), Poly 1-trimethylsilyl-1-propyne (PTMSP) and Polyamide-imide (PAI) เป็นต้น โดยการแยกบิวทานอลใช้กระบวนการเพอแวปอเรชันจะมีประสิทธิภาพสูง แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตเยื่อเลือกผ่านมีความยุ่งยากทำให้เยื่อเลือกผ่านยังคงมีราคาแพง การจำแนกกระบวนการเพอแวปอเรชัน (Pervaporation)

- 1) การแยกน้ำ (Dehydration) แยกน้ำออกจากของเหลวอินทรีย์ ด้วยเยื่อแผ่นชอบน้ำ เช่น การแยกน้ำออกจากสารละลายแอลกอฮอล์เพื่อผลิตแอลกอฮอล์บริสุทธิ์
- 2) การแยกสารอินทรีย์ออกจากสารละลายของสารอินทรีย์-น้ำ ด้วยเยื่อแผ่นไม่ชอบน้ำ

3) การแยกของผสมอินทรีย์ ด้วยเยื่อแผ่นไม่ชอบน้ำซึ่งเลือกผ่านสารอินทรีย์

2.1.3.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

หลักการของการสกัด คือ การใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมละลายกับสารละลายที่ต้องการสกัด ออกมาจากสารผสม การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีหนึ่งที่มีประโยชน์มากในการแยกสารและทำให้สารบริสุทธิ์ตัวทำละลายที่ใช้ต้องไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ เช่น 2-ethyl-1-hexanol, room temperature ionic liquids (RTILs), 4-n-butylphenol, n-decanol และ soybean-derived biodiesel เป็นต้น (Abdehagh *et al.*, 2014) การสกัดแบ่งคร่าว ๆ ได้ 3 วิธีดังนี้

1) Solid/Liquid Extraction เป็นการใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมละลายสารที่ต้องการ ออกมาจากสารผสมซึ่งเป็นของแข็ง การสกัดแบบนี้มีหลักการที่ไม่แตกต่างจากการหาตัวทำละลาย เพื่อตกผลึกสาร

2) Liquid/Liquid Extraction เป็นการใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อละลายสารที่ต้องการ ออกมาจากสารผสมซึ่งเป็นของเหลว

3) Acid/Base Extraction เป็นการใช้ปฏิกิริยากรด-เบส เพื่อแยกสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็น กรดแก่ กรดอ่อน กลาง และเบสออกจากกัน

2.1.3.3 การดูดซับ (Adsorption)

เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่นของเหลวกับของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็งหรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุล หรือ คอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) สารดูดซับที่สามารถใช้แยกบิวทานอล ได้แก่ Polyvinylpyridine (PVP) resin, Polyvinylpyridine (PVP) resin เป็นต้น

2.1.3.4 การเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Gas stripping)

การเป่าไล่ด้วยแก๊สใช้หลักการการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer) ที่เป็นแก๊ส (หรือไอ) ซึ่งมีความสามารถในการละลายออกจากสารละลายไปยังกระแสอากาศ โดยทำให้กระบวนการนี้ เกิดขึ้นในเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่จัดให้มีการสัมผัสกันระหว่างกระแสอากาศและตัวทำละลายดังกล่าว โดยใช้แรงผลักดันให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารแรงผลักดันที่ใช้ในการผลักดัน สารละลายที่ต้องการออกมาจากกระแสอากาศแก๊สกำจัด ได้แก่ ความแตกต่างของความดันย่อย (Partial pressure) ของแก๊สชนิดนั้น ๆ ในกระแสอากาศที่ถูกปล่อยออกมากับความดันไอ (Vapor pressure) ของแก๊สชนิดดังกล่าวที่ผิวหน้าของสารละลายที่สัมผัสกับแก๊สนั้น การเป่าไล่ด้วย

แก๊สขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของแก๊ส เช่น การแพร่กระจาย อัตราการไหล ความเข้มข้น ความหนาแน่นและสภาวะของตัวทำละลาย เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

การเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Gas stripping) เป็นการถ่ายโอนมวลสารจากเฟสของเหลวไปยังเฟสแก๊ส โดยใช้ทฤษฎีของ two films theory ซึ่งเกี่ยวกับการถ่ายโอนมวลสารที่มีอยู่ในสถานะของเหลวและแก๊สบริเวณระหว่างผิวของ 2 ส่วน คือ ส่วนของของเหลวและแก๊ส ทฤษฎีนี้เป็นการสมมติว่าส่วนของแก๊สและของเหลวมีการผสมอย่างสมบูรณ์ ทำให้ผิวของส่วนที่เป็นแก๊สและของเหลวสัมผัสกันและมีการถ่ายโอนมวลสารของสารที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลว โดยการแพร่กระจายของโมเลกุลทะลุผ่านเยื่อที่กั้นระหว่างแก๊สกับของเหลวจนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุล เมื่อการแพร่กระจายของโมเลกุลของสารเข้าสู่จุดสมดุลแล้วความเข้มข้นของมวลสารในสถานะของเหลวจะเปลี่ยนจากความเข้มข้นที่อยู่ในสถานะของเหลวไปเป็นความเข้มข้นที่อยู่ในสถานะแก๊ส ที่จุดสมดุลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลทั้งหมดจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแต่ละตัวตามสมการที่ (1) และ (2)

$$\frac{1}{K_{OG}} = \frac{1}{K_g} + \frac{H}{K_i} \quad (1)$$

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{K_i} + \frac{1}{H K_g} \quad (2)$$

- เมื่อ K_{OG} = ค่าสัมประสิทธิ์พื้นฐานของการถ่ายโอนมวลทั้งหมดในสภาวะแก๊ส
 K_{OL} = ค่าสัมประสิทธิ์พื้นฐานของการถ่ายโอนมวลทั้งหมดในสภาวะของเหลว
 K_g = ค่าการถ่ายโอนมวลในสภาวะแก๊สที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ
 K_i = ค่าการถ่ายโอนมวลในสภาวะของเหลวที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ
 H = เป็นค่าคงที่ของ Henry's Law

H เป็นค่าคงที่ของ Henry's Law จากสมการ ถ้า H มีค่าน้อยมาก หมายถึงแก๊สสามารถละลายได้ดี ในของเหลว ดังนั้น K_{OG} มีค่าใกล้เคียงกับ K_g แก๊สละลายในของเหลวได้ง่าย และจะถูกควบคุมด้วยเยื่อแก๊ส ในทางตรงกันข้ามถ้า H มีค่ามากจะมีผลทำให้ K_{OL} มีค่าใกล้เคียงกับ K_i นั่นคือแก๊สละลายยากในของเหลวจะถูกควบคุมด้วยเยื่อของของเหลว โดยค่าคงที่ของ Henry's Law สามารถดูได้จากตารางที่ 2.2

เนื่องจากในระหว่างกระบวนการหมักเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะใช้แก๊สผสมที่ผลิตได้เป็น Stripping gas หรือใช้แก๊สผสมในการเป่าไล่ นั่นเองโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม อีกทั้งป้อนแก๊สเข้าในระบบหมักด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสม

ทำให้เกิดการกวน เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลระหว่างซัสเตรตกับเอนไซม์ได้ดีขึ้น อาจจะหมักโดยใช้ซัสเตรตที่เป็นของแข็งได้ อย่างไรก็ตามระบบสำหรับการเก็บตัวทำละลาย ABE ออกจากกระแสแก๊สเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ต้องมีการออกแบบเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนความร้อน เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสถานะอย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.2 Henry's Law Constants (sander *et al.*, 1999)

สารละลาย	Henry's Law Constants	Reference
Acetone	28 (M/atm)	Burnett (1963)
Ethanol	220 (M/atm)	Burnett (1963)
Butanol	140 (M/atm)	Burnett (1963)
Butyric acid	1900 (M/atm)	Butler and Ramchandani (1935)
Acetic acid	3400 (M/atm)	Butler and Ramchandani (1935)
H ₂	1300 (L*atm/mol)	Sander (2015)
CO ₂	29 (L*atm/mol)	Sander (2015)
N ₂	1600 (L*atm/mol)	Sander (2015)

นอกจากนี้ยังใช้ทฤษฎีของราอูล ซึ่งได้กล่าวถึงสารที่ผสมกันไว้ว่า ตามกฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal gas) ในภาวะหนึ่ง ๆ ความดันย่อยของสารองค์ประกอบ R (P_R) แปรผันโดยตรงกับสัดส่วนโมลของของเหลวองค์ประกอบ R (X_R เป็นค่าสัดส่วนโมลของเหลว) และสารผสมแก๊สที่กำลังพิจารณา (P_R^1) ในขณะที่สารผสมอยู่ในสถานะของเหลวและแก๊สแสดงเป็นเส้นกราฟของความชัน ระหว่างความดันกับสัดส่วนโมลของสารองค์ประกอบ R บริสุทธิ์นั้น ๆ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ตามที่แสดงในสมการที่ 3

$$P_R = X_R P_R^1 \quad (3)$$

สำหรับวิธีหรือเทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊ส การดูดซับ การสกัดด้วยตัวทำละลาย และเพอแวปเพอเรชัน ไม่ได้เป็นแค่วิธีในการลดความเป็นพิษของบิวทานอลเพียงอย่างเดียว แต่ยังเป็น การเพิ่มอัตราการผลิตของ ABE ในเวลาเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊ส เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ช่วยในการแยกสารระเหยออกจากน้ำหมักโดยไม่ต้องใช้เมมเบรน นิยมใช้ในการแยกสารละลายที่ระเหยออกได้ง่าย ซึ่งการเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Stripping gas) แก๊สจะถูกพ่นลงในถังหมัก ตัวทำละลายจะละลายในแก๊สและถูกพาออกจากถังหมักไหลผ่านคอนเดนเซอร์ ตัวทำละลายก็จะถูกแยกออกมาโดยการควบแน่น และสามารถนำแก๊สกลับมาใช้หมุนเวียนในระบบได้อีกครั้ง กระบวนการ

เป่าไล่ด้วยแก๊สมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการแยกอื่น ๆ เช่น เป็นวิธีการที่ง่าย การดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ใช้ต้นทุนต่ำ ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อเชื้อ ไม่เกิดคราบและการอุดตัน (Lu *et al.*, 2013)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจน

Chen *et al.*, (2014) ศึกษาการกักคืนของบิวทานอลจากกระบวนการหมักแอสีโตน บิวทานอลและเอทานอล (ABE) โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊ส พบว่าผลการทดลองจากการใช้เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สให้ผลผลิต ABE และบิวทานอลมากกว่า ถึง 106.27 กรัมต่อลิตร และ 66.09 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ที่ อัตราการไล่ 1 ลิตรต่อนาทีในการเป่าไล่ ควบคุมอุณหภูมิการควบแน่นของระบบไว้ที่ -5 ถึง -10 องศาเซลเซียส จากการควบแน่นสามารถเก็บบิวทานอลที่มีความเข้มข้นสูง 150.6 กรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ de Vrije *et al.*, (2013) ศึกษาการแยกบิวทานอลและเอทานอล ในระหว่างการหมัก ABE โดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ซึ่งระบบควบแน่นมีการรักษาอุณหภูมิไว้ที่ -5 ถึง -7 องศาเซลเซียส สามารถลดความเข้มข้นของบิวทานอลลงได้อยู่ระดับ 8-10 กรัมต่อลิตร พบว่าชุดการทดลองที่ใช้เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สมีอัตราการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์ อัตราการใช้ซับสเตรท และอัตราการผลิตตัวทำละลายสูงกว่าชุดที่ไม่ใช้วิธีการเป่าไล่ด้วย แก๊สประมาณ 2 เท่า โดยมีอัตราการผลิตตัวทำละลายเท่ากับ 0.29 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

Ezeji *et al.*, (2005) ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราการไหลของแก๊ส (2.58-5.06 ลิตรต่อนาที) ขนาดฟองแก๊ส (0.5-5.0 มิลลิเมตร) และความเข้มข้นของ ABE ในน้ำหมัก ที่มีผลต่อการเป่าไล่ด้วยแก๊สในกระบวนการหมัก ABE จากผลการทดลองโดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็น แก๊สในการเป่าไล่ พบว่าอัตราการเป่าไล่บิวทานอลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของบิวทานอล และอัตราการไหลของแก๊ส ในขณะที่ขนาดของฟองแก๊สที่มีความแตกต่างกันไม่มีผลทำให้อัตราการ แยกบิวทานอลเกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากปัจจัยดังกล่าวจากการศึกษาของงานวิจัยของ Xue *et al.*, (2013) ศึกษากระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส 2 ขั้นตอน เพื่อกักคืนบิวทานอลกลับคืนมาจาก กระบวนการหมัก ซึ่งวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊สในขั้นตอนแรกสามารถผลิต ABE และบิวทานอลได้ 227.0 และ 175.6 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในกระบวนการทดลองมีการแยกชั้นระหว่าง ชั้นสารอินทรีย์และชั้นน้ำ ซึ่งในชั้นสารอินทรีย์มีความเข้มข้นของ ABE และบิวทานอลเท่ากับ 660.7 และ 612.3 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในส่วนของชั้นน้ำประกอบด้วยความเข้มข้นของ ABE และบิวทานอลเท่ากับ 153.2 และ 101.3 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และสามารถดักจับตัวทำละลายใน ชั้นตอนที่ 2 โดยมีความเข้มข้นของ ABE และบิวทานอลเท่ากับ 532.3 และ 420.3 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากกระบวนการดังกล่าวทำให้การผลิตบิวทานอลมีประสิทธิภาพสูงและสามารถแยก

บิวทานอลให้มีความบริสุทธิ์จากกระบวนการการใช้พลังงานที่น้อยลง โดยงานวิจัยของ Xue Chuang *et al.*, (2014) ศึกษาการใช้พลังงานในการกู้คืนบิวทานอลกลับคืนมาจากกระบวนการหมัก ABE อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถแยกชั้นน้ำออกได้และยังช่วยเจือจางความเข้มข้นของตัวทำละลายในคอนเดนเซทได้

Lu *et al.*, (2014) ศึกษาวิธีการแยกบิวทานอลโดยการบูรณาการระหว่างวิธีการสกัดตัวทำละลายและเทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊ส โดยเสนอวิธีการแยกบิวทานอลด้วยวิธีการสกัดระหว่างการหมักและตามด้วยการแยกบิวทานอลออกจากตัวทำละลายกลุ่มแอลกอฮอล์ตัวอื่นๆ ด้วยเทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สในเวลาเดียวกัน ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ -196 องศาเซลเซียส เริ่มเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที พบว่ามีอัตราการผลิตบิวทานอลเท่ากับ 0.28 ± 0.01 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของบิวทานอลและ ABE เท่ากับ 93-113 และ 166-204 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการหมัก ABE และแยกตัวทำละลายให้บริสุทธิ์ได้อีกวิธีหนึ่ง โดยการรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่ต่ำมากๆ จะสามารถควบแน่นตัวทำละลายได้มากขึ้น และสามารถลดความเข้มข้นของบิวทานอลในถังปฏิกรณ์ลงได้ให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าการเป็นพิษต่อตัวมันเองภายในระบบ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สไนโตรเจน

Reference	Type of gas	Flow rate (l/min)	Temperature of condensation (C°)	Final of Butanol concentration (g/l)
Chen <i>et al.</i> , (2014)	N ₂	1	-5 - -10	8
De Vrije <i>et al.</i> , (2013)	N ₂	1	-5 - -7	10
Ezeji <i>et al.</i> , (2005)	N ₂	2.58-5.06	3	10
Lu <i>et al.</i> , (2014)	N ₂	0.5	-198	3
Xue <i>et al.</i> , (2013)	N ₂	1.5	-2	3.7
Xue <i>et al.</i> , (2014)	N ₂	1.6	-2	8

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเป่าไล่ด้วยแก๊สผสม (CO_2+H_2)

Cai *et al.*, (2016) ศึกษาแนวทางการเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของบิวทานอลและลดค่าใช้จ่ายการติดตั้งอุปกรณ์ของกระบวนการแยกตัวทำละลายด้วยเทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ผลปรากฏว่ากระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊สสามารถกู้คืนความร้อนกลับมาได้ เพิ่มความประหยัดพลังงานความร้อนในระบบกลั่นและสามารถลดพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตบิวทานอลได้ถึง 23.07 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งคิดเป็น 29% ของกระบวนการกลั่น จากกรายงานวิจัยของ Ezeji *et al.*, (2004) ศึกษาการผลิตแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล (ABE) จากการหมักแบบ Fed-batch ร่วมกับกระบวนการการแยกผลผลิตเพื่อลดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบด้วยวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊ส โดยใช้แก๊สผสมที่เกิดจากการหมักซึ่งประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 6 ลิตรต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ใช้วิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊สควบคู่กับการหมักสามารถผลิต ABE ได้สูงถึง 232 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการผลิต 1.16 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง เมื่อเทียบกับชุดการทดลองแบบแบทช์ที่ไม่มีการใช้วิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊สให้ผลผลิต ABE เท่ากับ 17.6 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการผลิต 0.29 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง สามารถลดความเป็นพิษของบิวทานอลในถังปฏิกรณ์โดยบิวทานอลมีความเข้มข้นอยู่ในระดับ 8-10 กรัมต่อลิตร แสดงในตารางที่ 2.4

Cai *et al.*, (2015) ศึกษากระบวนการผลิตแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล (ABE) โดยใช้กากข้าวฟ่างหวานเป็นซับสเตรทรวมกับวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊สโดยใช้แก๊สผสม (CO_2+H_2) ที่อัตราการไหล 1.15 ลิตรต่อนาที ในการเป่าไล่ โดยให้ผลผลิต ABE เท่ากับ 155.7-255.6 กรัมต่อลิตร ตัวทำละลายสามารถควบแน่นได้ถึง 0.38 ± 0.06 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง มีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ -5 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lu *et al.*, (2013) มีการใช้แก๊สผสมที่อัตราการไหล 1.25 ลิตรต่อนาที สามารถรักษาความเข้มข้นของบิวทานอลในถังปฏิกรณ์อยู่ในระดับ 7-8 กรัมต่อลิตร และจากงานวิจัยของ Lu *et al.*, (2012) ได้รายงานเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการควบแน่นเมื่ออุณหภูมิยิ่งต่ำมากจะสามารถควบแน่นตัวทำละลายได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน จากผลการทดลองการเป่าไล่ด้วยแก๊สเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการติดตั้งระบบและมีประสิทธิภาพต่อการแยกบิวทานอลออกจากสารละลายผสม

ตารางที่ 2.4 สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สผสม (CO₂+H₂)

Reference	Type of gas	Flow rate (l/min)	Temperature of condensation (C°)	Final of Butanol concentration (g/l)
Cai <i>et al.</i> , (2015)	(CO ₂ +H ₂)	1.15	-5	8
Cai <i>et al.</i> , (2016)	(CO ₂ +H ₂)	2	-5	10
cai <i>et al.</i> , (2016)	(CO ₂ +H ₂)	2	-2	10
Ezeji <i>et al.</i> , (2004)	(CO ₂ +H ₂)	6	-2	3
Lu <i>et al.</i> , (2012)	(CO ₂ +H ₂)	1.25	-1	3.7
Lu <i>et al.</i> , (2013)	(CO ₂ +H ₂)	1.25	-1	8

จากการรายงานวิจัยของ Qureshi *et al.*, (2008) ศึกษาการหมักแอสिटอน บิวทานอล เอทานอล (ABE) จากฟางข้าวสาลีด้วยแบคทีเรีย *Clostridium beijerinckii* P260 เปรียบเทียบด้วย กระบวนการที่แตกต่างกัน 5 กระบวนการดังนี้ (1) ฟางข้าวสาลีที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย กรดเจือจาง (2) การไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ Carboxymethyl cellulase และ xylanase ตามด้วยการหมักโดยไม่กำจัดกากออก (3) การไฮโดรไลซ์ควบคู่กับการหมักโดยไม่มีการกวน (4) การไฮโดรไลซ์ควบคู่กับการหมักที่มีการเติมน้ำตาล (5) การไฮโดรไลซ์ร่วมกับการหมักที่มีการกวนควบคู่กับวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊ส (gas stripping) จากผลการทดลองพบว่าแต่ละกระบวนการสามารถผลิต ABE ได้เท่ากับ 9.36, 13.12, 11.93, 17.92 และ 21.42 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการผลิตได้เท่ากับ 0.19, 0.14, 0.27, 0.19, และ 0.31 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งชุดการทดลองที่มีการควบคู่การหมักและการเป่าไล่ด้วยแก๊สให้อัตราการผลิต ABE สูงสุด ซึ่งวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊สเป็นการลดความเข้มข้นของ ABE ในกระบวนการหมัก จึงทำให้ลดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียจากความเข้มข้นของ ABE ที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการหมักได้เช่นเดียวกัน

Ollivier *et al.*, (2011) จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการเป่าไล่ด้วยแก๊สเพื่อแยกบิวทานอลออกจากเฟสของเหลว รายงานว่าแก๊สที่ใช้ในการเป่าไล่สามารถใช้แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน อากาศหรือแก๊สผสม ซึ่งแก๊สที่นิยมใช้มากที่สุดคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความ

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Parten (2009) ได้ศึกษาวิธีการควบคุมความเข้มข้นของบิวทานอลในน้ำหมักระหว่างกระบวนการหมักเพื่อผลิตบิวทานอล โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สไนโตรเจนเพื่อแยกบิวทานอลออกจากน้ำหมัก ทำได้โดยการป้อนแก๊สเข้าไปในถังหมักเพื่อดูดซึมตัวทำละลาย จากนั้นใช้ของเหลวที่มีความดันไอต่ำกว่าบิวทานอลและสามารถละลายบิวทานอลได้ดูดซึมและแยกบิวทานอลออกจากเฟสแก๊ส ซึ่งสารละลายดูดซึมหดงกล่าวได้แก่ octanol, nonanol หรือ decanol จากงานวิจัยของ Butler (2010) ค้นพบว่าตัวทำละลายที่ผ่านกระบวนการควบแน่นจะมีการแยกชั้นระหว่างชั้นสารอินทรีย์และชั้นน้ำ เนื่องจากบิวทานอลสามารถละลายน้ำได้เพียงร้อยละ 7.7 สารผสมจึงเกิดการแยกชั้น ซึ่งส่วนบนประกอบด้วยบิวทานอลร้อยละ 80 สามารถแยกออกได้เลย ส่วนในชั้นน้ำมีบิวทานอลประกอบอยู่ร้อยละ 7.7 ซึ่งสามารถแยกบิวทานอลออกด้วยการกลั่นแบบธรรมดาอีกครั้งเพื่อให้บิวทานอลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1. สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.1.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อสารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต	ประเทศผู้ผลิต
Acetone	Analytical reagent grade	Fisher scientific	U.K.
Butanol	Analytical reagent grade	Ajax Fine Chemicals	Australia
Sodium Hydroxide	Analytical reagent grade	LOBAL Chemie	India
D-Glucose	Analytical reagent grade	LOBAL Chemie	India
Ethanol	American Chemical grade	VWR CHEMICALS	France
Acetic acid	American Chemical grade	J.T. Baker Chemicals	U.K.
Butyric acid	American Chemical grade	PanReac AppliChem	Spain
Nitrogen gas	Commercial grade	ปัตตานีออกซิเจน จำกัด	Thailand
Carbondioxide gas	Commercial grade	ปัตตานีออกซิเจน จำกัด	Thailand
Hydrogen gas	Commercial grade	ปัตตานีออกซิเจน จำกัด	Thailand

3.1.2 อุปกรณ์

- 3.1.2.1 ถังปฏิกรณ์ (Stripper) ขนาด 3.5 ลิตร จำนวน 1 ถัง
- 3.1.2.2 เครื่องทำน้ำเย็นสำหรับผลิตน้ำหล่อเย็นเพื่อการควบคุม
- 3.1.2.3 ภาชนะสำหรับเก็บสารควบคุมขนาด 30 x 30 มิลลิลิตร
- 3.1.2.4 คอนเดนเซอร์ขนาด 30 x 30 มิลลิลิตร
- 3.1.2.5 Erlenmeyer flask ขนาด 125 และ 250 มิลลิลิตร
- 3.1.2.6 Cylinder ขนาด 10 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 3.1.2.7 Volumetric flask ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- 3.1.2.8 สายยางซิลิโคน
- 3.1.2.9 Beaker ขนาด 50 100 200 และ 500 มิลลิลิตร

3.1.2.10 Vials ขนาด 2 มิลลิลิตร สำหรับเก็บตัวอย่าง

3.1.2.11 Syringe filters ขนาด 4 มิลลิเมตร สำหรับกรองตัวอย่าง

3.1.3 เครื่องมือ

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อเครื่องมือ	ยี่ห้อ	รุ่น	ประเทศผู้ผลิต
เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph, GC)	Hellett Packard	HP 6890 Series	U.S.A.
เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)	HANNA	HI5221	Thailand
อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)	Thermo scientific	HAAKE S 13	Thailand
เครื่องมือวัดของไหล (Rotameter)	AALBORG	SME 1-010409	U.S.A.
เครื่องชั่งละเอียดทศนิยมสี่ตำแหน่ง (Analytical balance)	OHAUIS	PIONEER	U.S.A.

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยก ABE จากสารละลายผสม ด้วยวิธีการเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Gas stripping process)

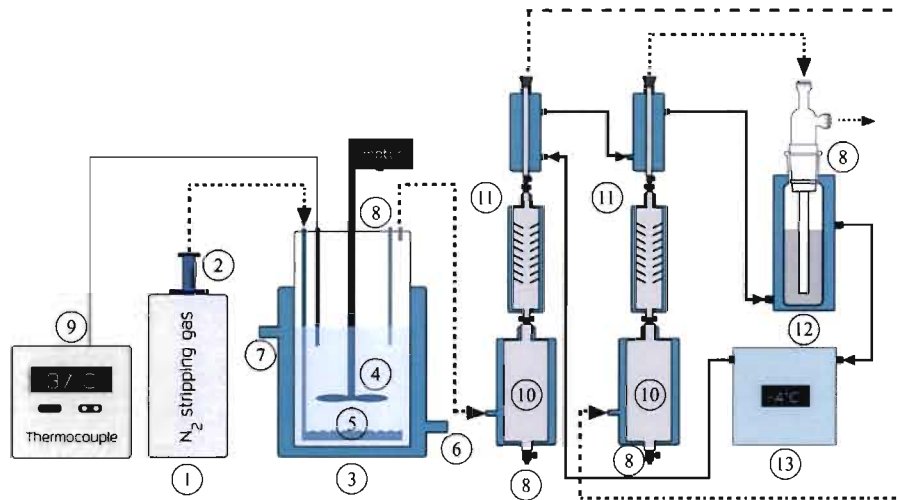
ขั้นตอนการวิจัยเป็นการสร้างระบบการเป่าไล่ด้วยแก๊สเพื่อใช้ในการทดลองหาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของตัวทำละลาย ABE, ชนิดและความเข้มข้นของ stripping gas และอัตราการไหลของ stripping gas

3.2.1.1 การเตรียมสารละลาย ABE

เตรียมสารละลายใส่ในขวด Duran ขนาด 2 ลิตร ประกอบด้วย แอซีโตน, บิวทานอล, เอทานอล, กรดอะซิติก, กรดบิวทริก และน้ำตาลกลูโคส ที่ความเข้มข้น 5.24, 13.37, 1.38, 3, 6 และ 30 กรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปรับ pH เป็น 5.2 ด้วย 10% (W/W) NaOH เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย ABE ดังตารางที่ 3.3

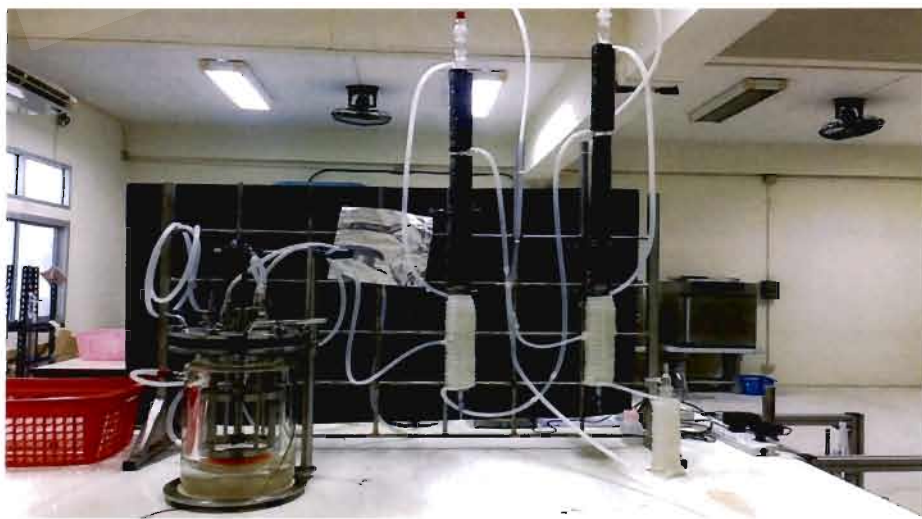
3.2.1.2 ติดตั้งชุดอุปกรณ์ของกระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ

3.2



รูปที่ 3.1 ไตอะแกรมกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Gas stripping process)

- | | |
|---|--|
| 1. Nitrogen gas (Stripping gas) | 2. Rotameter |
| 3. Stripper/Fermenter Strier | 4. Strier |
| 5. Gas distributor | 6. Water input |
| 7. Water output | 8. Sampling point |
| 9. Thermocouple | 10. Condensate receptors (R_1 and R_2) |
| 11. Condenser (30x300 mm) | 12. Impinger (R_3) |
| 13. Water/ethylene glycol recirculation bath (-4°C) | |



รูปที่ 3.2 ชุดกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Gas stripping process)

3.2.1.3 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊ส

(1) เทสารละลายผสม ABE ปริมาตร 2 ลิตร ลงใน stripper ขนาด 3.5 ลิตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 เซนติเมตร)

(2) ให้ความร้อนแก่สารละลายโดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้อยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำหมุนเวียนจากอ่างน้ำร้อนผ่านแจ๊คเกตของ stripper

(3) เปิดน้ำหล่อเย็นเข้าคอนเดนเซอร์ ควบคุมอุณหภูมิการควบแน่นไว้ที่ -4 องศาเซลเซียส โดยมีสารตัวกลางหล่อเย็นประกอบด้วยสารละลายเอทิลีนไกลคอลในน้ำที่ความเข้มข้นร้อยละ 10

(4) ป้อน Stripping gas เข้าระบบที่อัตราการไหล 1.0, 2.0 หรือ 3.0 ลิตรต่อนาที ในแต่ละชุดการทดลอง โดยใช้แก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สผสม ($\text{CO}_2 + \text{H}_2$) ในการเป่าไล่และเริ่มการทดลองเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง

(5) เก็บตัวอย่างของเหลวใน Stripper และในคอนเดนเซอร์ทุก ๆ 60 นาที เพื่อวัดความเข้มข้นของ ABE Acetic acid และ butyric acid ด้วย GC-FID

(6) วัดปริมาตรของเหลวในคอนเดนเซอร์

(7) เก็บตัวอย่างของเหลวในคอนเดนเซอร์

(8) แปรค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ตามตารางที่ 3.3

(9) คำนวณประสิทธิภาพของการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ประสิทธิภาพของการควบแน่นตั้งสมการ (4) และ (5) และการหาค่าคงที่ทางจลนศาสตร์

ตารางที่ 3.3 ชุดการทดลองการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ทำการทดลอง

Rep	ABE concentration		Flow rate (L/min)	Type of stripping gas	
	(mol/L)	(g/L)		% N ₂	%H ₂ balance with CO ₂
1	0.08	5	3.0	100	-
2	0.30	20	3.0	100	-
3	0.45	30	3.0	100	-
4	0.30	20	1.0	100	-
5	0.30	20	2.0	100	-
6	0.30	20	3.0	100	-
7	0.30	20	1.0	-	20
8	0.30	20	2.0	-	20
9	0.30	20	3.0	-	20
10	0.30	20	3.0	100	-
11	0.30	20	3.0	-	20
12	0.30	20	3.0	-	40
13	0.30	20	3.0	-	60

ประสิทธิภาพของการเป่าไล่ด้วยแก๊ส (Stripping gas efficiency) คำนวณได้จากสมการ (4)

$$\% \text{ Removal} = \frac{m_i - m_s}{m_i} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ m_i คือ มวลของตัวทำละลาย i เริ่มต้น
 m_s คือ มวลของตัวทำละลาย i ใน Stripper

ประสิทธิภาพของการควบแน่น (Condensation efficiency) หาได้จากสมการ (5)

$$\text{Efficiency of condensation} = \frac{m_{R1} + m_{R2}}{m_i - m_s} \quad (5)$$

เมื่อ m_i คือ มวลของตัวทำละลาย i เริ่มต้น
 m_s คือ มวลของตัวทำละลาย i ใน Stripper
 m_{R1} คือ มวลของตัวทำละลาย i ใน Receptor 1
 m_{R2} คือ มวลของตัวทำละลาย i ใน Receptor 2

Prince of Songkhla University
 Pattani Campus

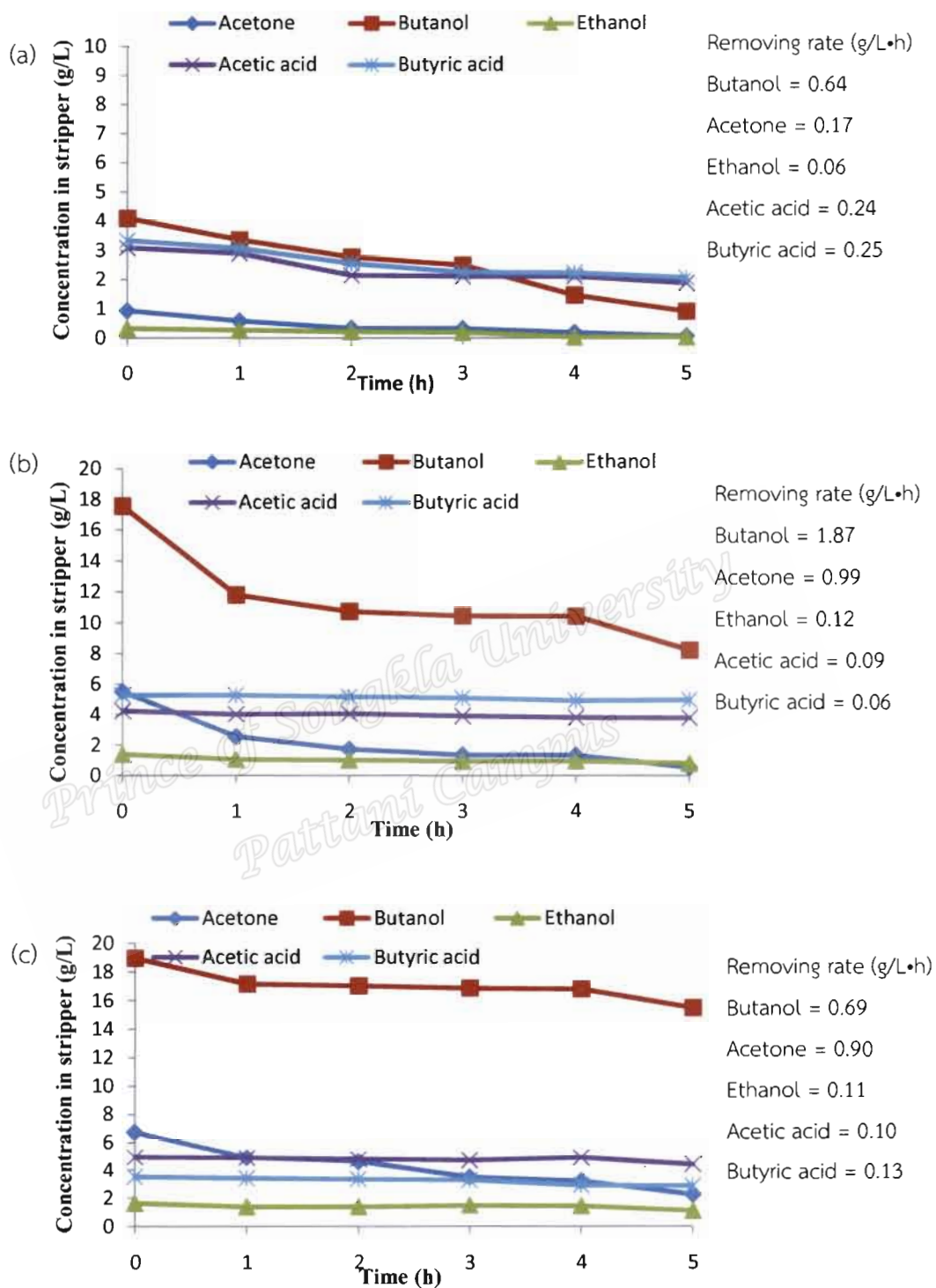
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากงานวิจัยการประยุกต์ใช้การเป่าไล่ด้วยแก๊สสำหรับการแยกตัวทำละลายแอสีโตน บิวทานอลและเอทานอลออกจากสารละลาย ABE ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกตัวทำละลาย ได้แก่ ความเข้มข้นของ ABE อัตราการไหลของ Stripping gas และชนิดของ stripping gas มีผลดังนี้

4.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวทำละลาย ABE ในถังปฏิกรณ์ที่ใช้แก๊สไนโตรเจน ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที

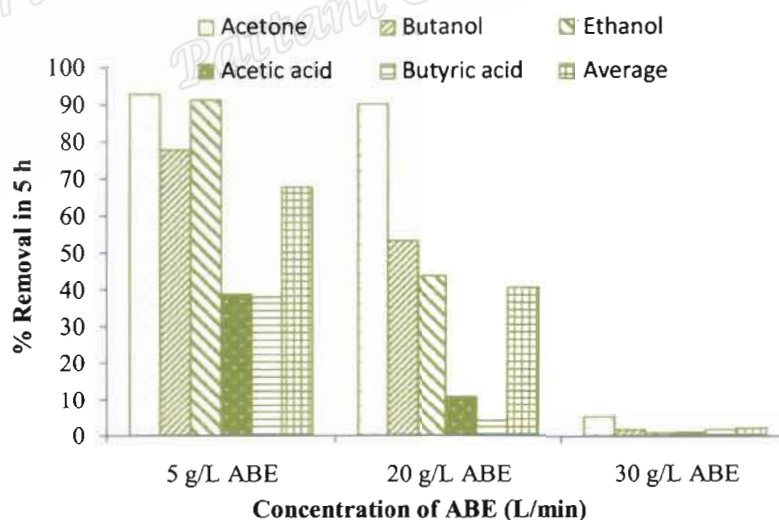
จากรูปที่ 4.1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ต่อเวลาที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของ ABE ที่แตกต่างกันคือ 5, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าทั้งสามความเข้มข้นมีเส้นแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อระยะเวลาในการเป่าไล่ด้วยแก๊สเพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มข้นของสารในถังปฏิกรณ์จะลดลงเรื่อย ๆ จากรูปสังเกตได้ว่าการลดลงของบิวทานอลมีความชันสูงสุด เนื่องจากในถังหมักมีปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นสูง ทำให้ บิวทานอลสามารถถ่ายโอนไปยังเฟสแก๊สได้มากกว่าสารอินทรีย์ตัวอื่น ๆ ในถังปฏิกรณ์มีปริมาณค่า Removing rate ที่ความเข้มข้น ABE เท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร ของแอสีโตน บิวทานอลและเอทานอลเท่ากับ 1.89, 0.99 และ 0.12 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ค่า Removing rate ของตัวทำละลายอินทรีย์จะสูงกว่าของกรดอะซิติกและกรดบิวทริก ยกเว้นที่ความเข้มข้น ABE 5 กรัมต่อลิตร ค่า Removing rate ของกรดอะซิติกและกรดบิวทริกเท่ากับ 0.24 และ 0.25 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าของแอสีโตนและเอทานอล ทั้งนี้ในชุดการทดลองนี้มีแอสีโตนและเอทานอลในปริมาณที่น้อยกว่า กระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊สยังช่วยลดความเข้มข้นของบิวทานอลในระบบ จากความเข้มข้นเริ่มต้น 4.10, 17.57 และ 18.96 กรัมต่อลิตร จนบิวทานอลมีความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 0.91, 8.21 และ 15.48 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้น ABE 5, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊สเป็นเทคนิคที่สามารถแยกสารระเหยออกจากน้ำหมักได้ดีกว่าสารจำพวกกรดอินทรีย์ น้ำตาลและสารอนินทรีย์ จึงสามารถลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบลงได้ (Lu *et al.*, 2013) สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Xue *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2013; Cai *et al.*, 2016) ที่สามารถลดความเข้มข้นของบิวทานอลในถังปฏิกรณ์และทำให้การหมักและผลผลิตจากการหมักเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 4.1 ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นของ ABE (a) 5 กรัมต่อลิตร, (b) 20 กรัมต่อลิตร และ (c) 30 กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ ABE 5 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำสุด มีร้อยละค่าเฉลี่ยในการแยกตัวทำละลายสูงที่สุดเท่ากับ 67.78 (แสดงในรูปที่ 4.2) เมื่อเปรียบเทียบชนิดสารอินทรีย์ พบว่าแอสีโตนมีร้อยละการแยกสูงที่สุดตามด้วย บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติกและกรดบิวทิริก ตามลำดับ เนื่องจากแอสีโตนมีค่าคงที่ของเฮนรี่ต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ทำให้แอสีโตนมีค่าการเลือก (selectivity) ในการถูกเป่าไล่และแยกออกจากสารละลายไปอยู่ในเฟสแก๊สได้ดีกว่าสารอินทรีย์ตัวอื่น ๆ

หลังจากกระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่แยกสารละลาย ABE และกรดบางส่วนออกจากถึงปฏิกรณ์ ตัวทำละลายที่ถูกเป่าไล่ออกมาพร้อมกับแก๊สจะถูกแยกออกโดยการควบแน่นในระบบควบแน่นสองชั้นตอนที่ควบคุมอุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์สองส่วนคือ condensate I และ condensate II โดยปริมาตรที่เก็บได้ของ condensate I จะมากกว่า condensate II ในตารางที่ 4.1 แสดงปริมาตรของสารอินทรีย์รวมเท่ากับ 39.3, 53.3 และ 58.6 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น ABE 5, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาตรสารอินทรีย์ที่ความเข้มข้น ABE 20 และ 30 กรัมต่อลิตร มีการแยกชั้นของตัวอย่างออกเป็น 2 ชั้นคือ ชั้นน้ำ (Lower) และชั้นสารอินทรีย์ (Upper) สาเหตุการแยกชั้นเนื่องมาจากค่าการละลายน้ำของบิวทานอล



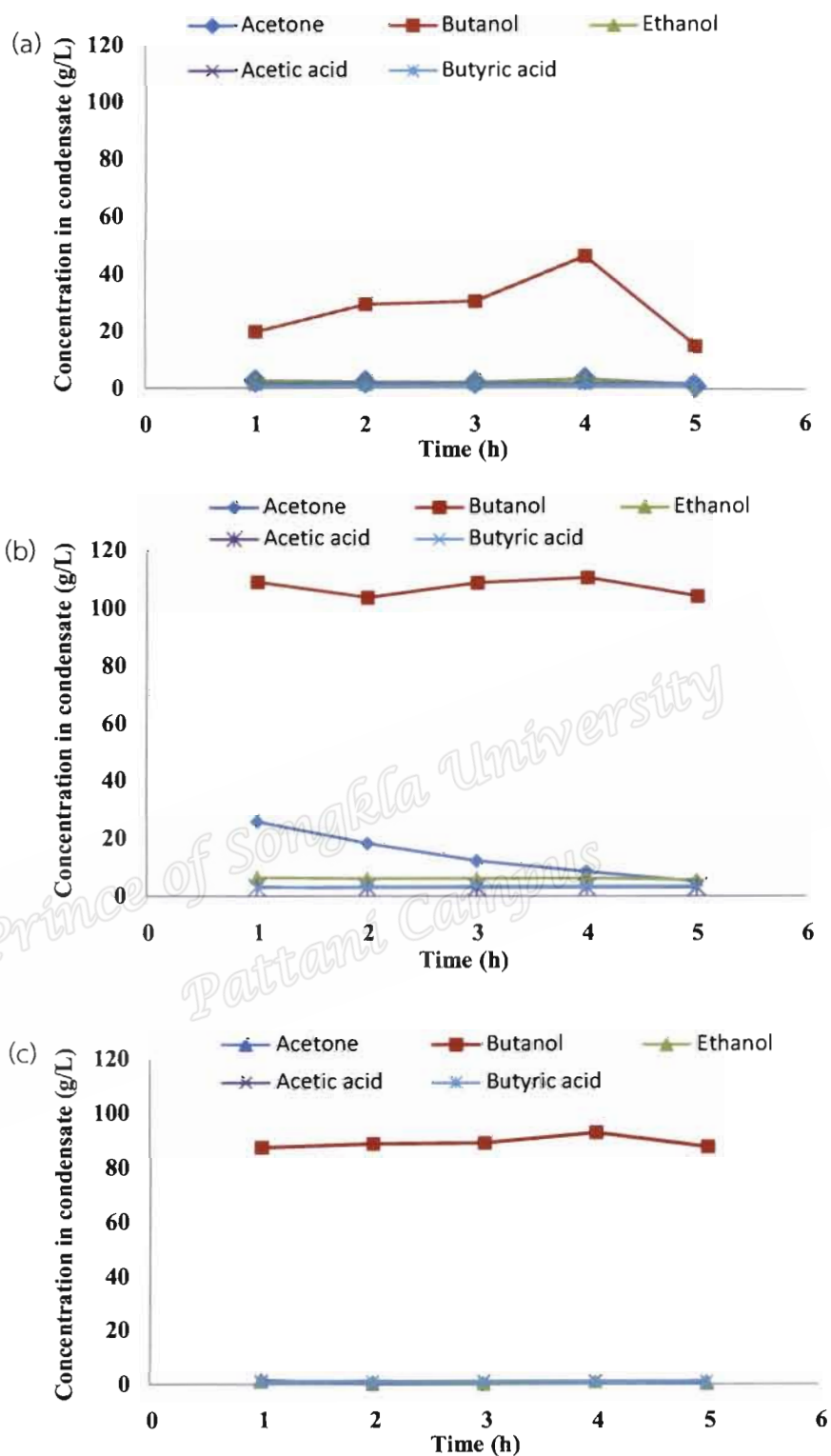
รูปที่ 4.2 ค่าร้อยละในการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทิริก ที่ความเข้มข้นของ ABE 5, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร โดยใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.1 ปริมาตรตัวทำละลายในคอนเดนเซอร์ที่ได้ด้วยแก๊สโดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที

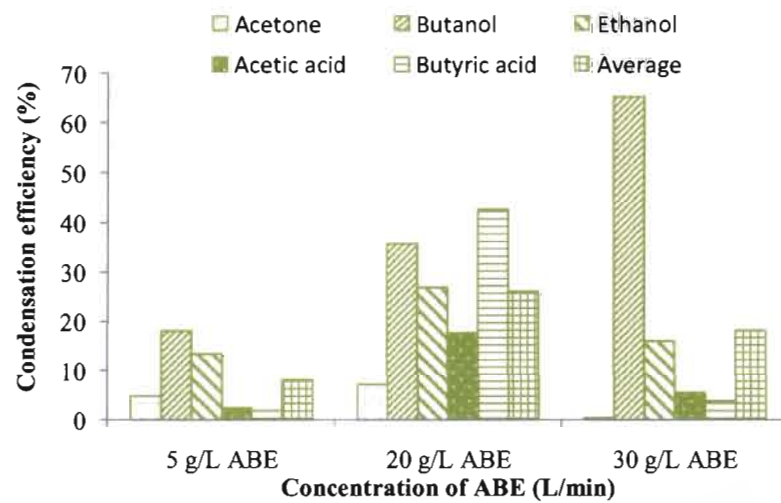
Time (h)	Volume of Condensate (mL)																	
	5 g/L concentration of ABE					20 g/L concentration of ABE					30 g/L concentration of ABE							
	Condensate I			Condensate II		Total	Condensate I			Condensate II		Total	Condensate I			Condensate II		Total
	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total
1	5	-	-	7.4	0.6	6.8	0.1	-	4.8	0.8	4	1.6	1.0	0.6				
2	8	-	-	11.0	1.6	9.4	0.4	-	8.8	1.0	7.8	2.6	1.7	0.9				
3	8	-	0.3	14.0	4.2	9.8	0.9	-	10.1	0.1	10	2.0	1.1	0.9				
4	8.4	-	0.4	8.9	0.1	8.8	0.4	-	13	2.0	10.1	0.8	0.5	0.3				
5	9.2	-	-	9.8	0	0	0.4	-	14	1.5	12.5	0.9	0.6	0.3				
Total			39.3			53.3									58.6			

ที่สามารถละลายน้ำได้ 7.7% (w/w) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและจะเกิดการแยกชั้นเมื่อ บิวทานอลมีความเข้มข้นมากกว่า 8% (Xue *et al.*,2013) จากนั้นแก๊สที่ออกจากระบบควบแน่น ชั้นที่สองจะถูกส่งผ่านน้ำที่บรรจุอยู่ใน impinger เพื่อดักจับสารอินทรีย์ในชั้นตอนสุดท้าย ปริมาณความเข้มข้นของแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทิริกในคอนเดนเซท เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง แสดงในรูปภาพที่ 4.3 พบว่าที่ความเข้มข้น ABE 20 กรัมต่อลิตร มีความเข้มข้นของบิวทานอลมากที่สุดอยู่ในช่วง 103.64-110.41 กรัมต่อลิตร เนื่องจากมีปริมาณของ บิวทานอลออกจากถังปฏิกรณ์สูงที่สุดจึงทำให้สามารถควบแน่นสารละลายที่มีบิวทานอล ความเข้มข้นมากที่สุด การใช้อุณหภูมิในการควบแน่นที่ต่ำลงจะทำให้ได้บิวทานอลที่ความเข้มข้น สูงขึ้น มีงานวิจัยที่แสดงปริมาณความเข้มข้นของตัวทำละลาย ABE ที่มีการควบคุมอุณหภูมิหล่อ เย็นไว้ที่ -196 องศาเซลเซียส เท่ากับ 166-204 กรัมต่อลิตร (Lu *at al.*,2014)

จากรูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการควบแน่นของแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทิริก ที่ความเข้มข้น ABE 5, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร โดยใช้แก๊สไนโตรเจน ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น ABE 20 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการควบแน่นสูงสุดคือ 25.96% เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดสารอินทรีย์ พบว่าบิวทานอลที่ความเข้มข้น ABE 5, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการควบแน่นมากที่สุด 17.94%, 35.68% และ 65.18% ตามลำดับ ในชั้นตอนสุดท้ายที่มีการดักจับสารอินทรีย์ ในส่วนของชุด impinger ได้ทำสมดุลมวลสารเพื่อตรวจสอบระบบการควบแน่นและร้อยละ การหายไปของมวลสารอินทรีย์ (% loss) แสดงดังตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าแอสีโตนมีร้อยละ การหายไปสูงในทั้งสามความเข้มข้น เนื่องจากแอสีโตนมีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำที่สุด มีความสามารถในการละลายในเฟสแก๊สสูง จึงถูกพาไปในกระแสแก๊สในปริมาณมากจึงทำให้เกิดการหายไปของ มวลสารภายในระบบ



รูปที่ 4.3 ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในชุดคอนเดนเซท 1 ที่ใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นของ ABE (a) 5 กรัมต่อลิตร, (b) 20 กรัมต่อลิตร และ (c) 30 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการควบแน่นของแอซีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทีริก ที่ความเข้มข้นของ ABE 5, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร โดยใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ที่ อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที

Prince of Songkla University
Pattani Campus

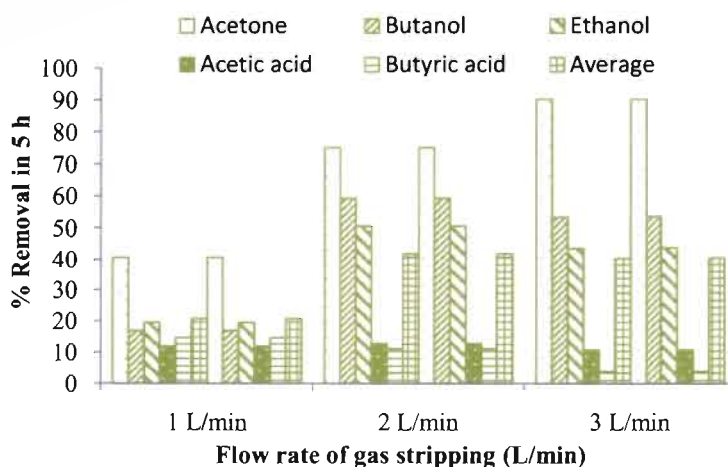
ตารางที่ 4.2 Mass distribution during the stripping process

Gas	Flow rate (L/min)	Concentration (g/L)	Compound	Initial mass in stripper (g/L)	Mass at 5 h (g/L)			Mass loss	% Loss	
					Stripper	Condensatel	Impinger			
N ₂	1	5	Acetone	2.62	1.00	1.03	0.00	1.00	1.12	64.27
			Butanol	6.68	2.27	14.83	0.00	6.67	4.25	66.51
			Ethanol	0.72	0.28	0.94	0.00	0.39	0.44	74.39
			Acetic acid	6.68	3.01	1.45	1.45	1.45	2.15	90.07
			Butyric acid	6.18	3.24	1.16	1.16	1.16	2.35	92.52
N ₂	1	20	Acetone	10.48	3.84	5.06	5.56	6.12	7.14	71.87
			Butanol	26.74	8.24	104.00	939.90	34.12	8.48	45.26
			Ethanol	2.76	1.06	5.52	9.06	2.57	0.57	47.25
			Acetic acid	6.00	2.68	3.03	2.28	3.03	0.37	40.59
			Butyric acid	12	5.73	3.35	2.71	2.91	-0.13	-32.44
N ₂	1	30	Acetone	13.58	6.65	0.38	0.00	1.24	8.75	96.80
			Butanol	37.92	16.56	87.54	0.00	2.32	2.15	30.95
			Ethanol	3.26	1.59	1.00	0.00	0.25	0.99	93.27
			Acetic acid	9.84	4.88	1.13	0.00	1.09	0.84	81.41
			Butyric acid	7.06	3.45	1.01	0.00	0.88	1.16	87.88

4.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สเป่าไล่

ก. ผลการทดลองกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สโดยใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่

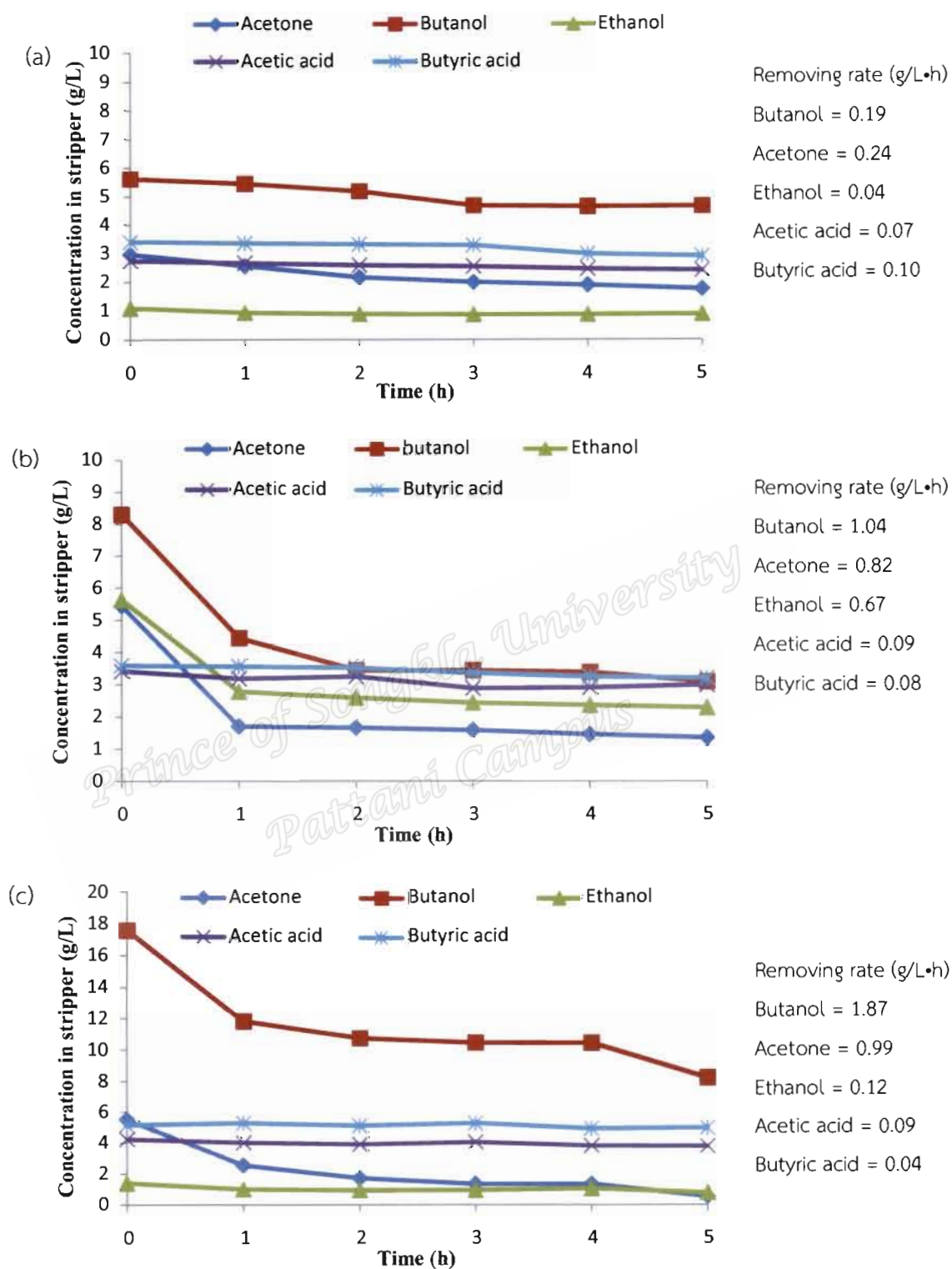
ร้อยละค่าเฉลี่ยในการแยกตัวทำละลาย ABE ในระยะเวลา 5 ชั่วโมง ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการแยก (% Removal) เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากปริมาณแก๊สที่เพิ่มขึ้น เข้ามาละลายในสารละลายผสมและสารถูกพาออกจากถังปฏิกรณ์โดยกระแสแก๊ส แต่อย่างไรก็ตามที่ อัตราการไหลต่ำ ๆ สารอินทรีย์ยังสามารถละลายในกระแสแก๊สและถูกพาออกจากถังปฏิกรณ์ได้ใน ปริมาณความเข้มข้นน้อย พบว่าที่อัตราการไหล 2 และ 3 ลิตรต่อนาที มีร้อยละค่าเฉลี่ยในการแยก ตัวทำละลาย ABE เท่ากับ 41.80% และ 40.36% ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ จากผลการทดลองพบว่าเอซีโตนเป็นสารอินทรีย์ที่มีร้อยละค่าเฉลี่ยในการแยกออก จากสารละลายผสมสูงสุดเท่ากับ 75.18% และ 90.33% ที่อัตราการไหล 2 และ 3 ลิตรต่อนาที เนื่องจากเอซีโตนมีความสามารถในการละลายในแก๊สมากที่สุดตามกฎของเฮนรี ดังแสดงในตารางที่ 2.2 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าทั้งสามอัตราการไหลมีร้อยละค่าเฉลี่ยในการแยกสารประเภท ตัวทำละลาย ABE ได้มากกว่ากรดอะซิติกและกรดบิวทริก มีความสอดคล้องกับค่าคงที่ของเฮนรี ซึ่ง ABE มีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำกว่ากรดอินทรีย์ จึงทำให้สามารถละลายในเฟสแก๊สได้มากกว่า ส่งผลให้ มีอัตราการแยกออกจากสารละลายผสมได้สูงและจากการรายงานวิจัยของ Lu *et al.*, (2013) กล่าวว่าเทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สจะแยกเฉพาะสารระเหยง่ายออกจากน้ำหมัก จึงทำให้สารประเภท กรดอินทรีย์ถูกแยกออกจากน้ำหมักในปริมาณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าตัวทำละลาย ABE



รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละในการแยกเอซีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทริก ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ ABE ที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ลดลงในระหว่างการหมักแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ทั้งสามอัตราการไหลที่ 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที มีแนวโน้มการลดลงของสารไปในทิศทางเดียวกัน โดยการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที มีอัตราการลดลงต่อหน่วยเวลาของบิวทานอลมากที่สุดถึง 1.87 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สมีความสามารถสูงในการแยกบิวทานอลออกจากสารละลายผสม เนื่องจากบิวทานอลมีค่าอัตราการแยกสารมากกว่าอัตราการผลิตอยู่ในช่วง 0.09-0.12 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง (Qureshi, *et al.* 2008) ส่งผลให้สามารถลดความเข้มข้นในระบบได้ โดยบิวทานอลมีความเข้มข้นสุดท้ายน้อยกว่า 10 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษในระบบได้ จากผลการทดลองที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที สามารถแยกสารอินทรีย์ออกจากถังปฏิกรณ์ได้มากที่สุดถึง 53.30 มิลลิลิตร เนื่องจากปริมาณแก๊สที่มีจำนวนมากจึงสามารถพาสารออกมาจากถังปฏิกรณ์ได้มากกว่าอัตราการไหลที่ต่ำกว่า ซึ่งอัตราการไหลที่ 1 และ 2 ลิตรต่อนาที สามารถเก็บปริมาตรสารอินทรีย์ได้ 9.80 และ 21.80 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยปริมาตรสารที่เก็บได้จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้น แสดงในตารางที่ 4.3 สังเกตเห็นได้ว่าที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที สารอินทรีย์มีการแยกชั้นระหว่างชั้นอินทรีย์และชั้นน้ำ ซึ่งอัตราการไหลที่ 1 และ 2 ลิตรต่อนาที สามารถเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ได้เฉพาะในส่วนของชุดคอนเดนเซตแรกเท่านั้น

การแยก ABE ออกจากถังหมักเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการหมัก และยังเป็น การลดความเป็นพิษในระบบจากบิวทานอลที่มีความเข้มข้นสูง ตัวทำละลายจากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สเข้าสู่กระบวนการควบแน่นโดยใช้สารหล่อเย็น ethylene glycon 10% ควบคุมอุณหภูมิที่ -4 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยในการควบแน่นสารในคอนเดนเซต พบว่าที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที บิวทานอลมีความเข้มข้นสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์ตัวอื่น ๆ เนื่องจากค่าการละลายน้ำของบิวทานอลที่มีค่าน้อยที่สุด ทำให้มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อย ส่งผลให้มีค่า removing rate มากที่สุด จึงถูกแยกออกจากถังปฏิกรณ์ได้ในปริมาณมากและถูกควบแน่นโดยความเข้มข้นของบิวทานอลในคอนเดนเซตสูงถึง 103-110.41 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าเอทานอลและแอสีโตนประมาณ 4-5 เท่า บิวทานอลจึงถูกแยกออกจากถังปฏิกรณ์โดยกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สได้มากที่สุด (Lu *et al.*, 2013) ส่วนแอสีโตนและเอทานอลสามารถแยกออกจากถังปฏิกรณ์ด้วยกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สได้เช่นเดียวกัน เพียงแต่สามารถแยกออกได้ในปริมาณความเข้มข้นที่น้อยกว่า แสดงในรูปที่ 4.7 ส่วนกรดอะซิติกและกรดบิวทริกถูกแยกออกจากน้ำหมักเช่นเดียวกัน แต่ในปริมาณความเข้มข้นที่น้อยกว่าประเภทสารอินทรีย์ ซึ่งกรดทั้งสองตัวเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการหมักที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis) ผสมกับตัวทำละลาย ABE ละลายในกระแสแก๊สและถูกพาออกจากถังปฏิกรณ์



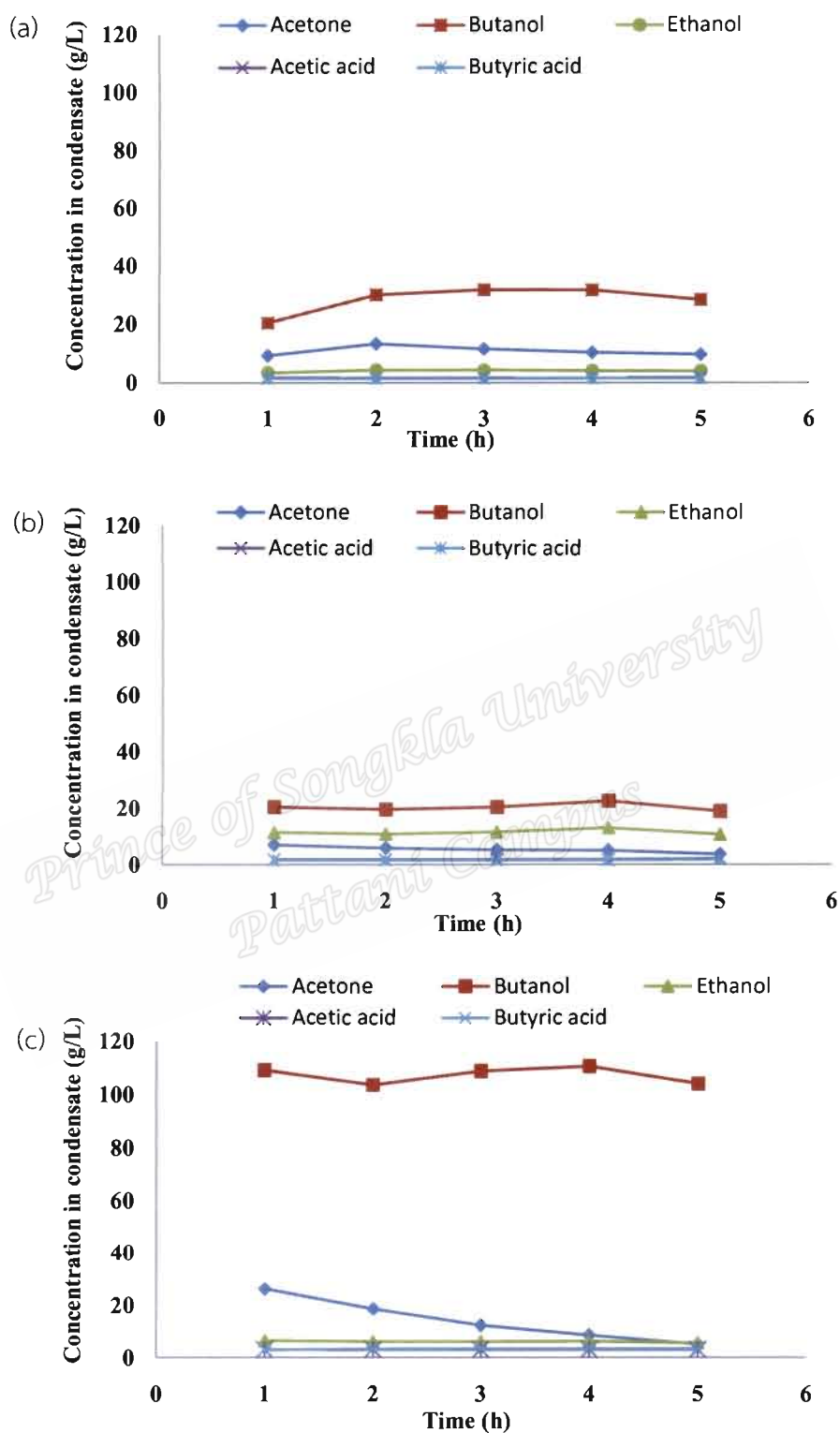
รูปที่ 4.6 ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ที่อัตราการไหลต่างกัน (a) 1 ลิตรต่ออนาที, (b) 2 ลิตรต่ออนาที และ (c) 3 ลิตรต่ออนาที ที่ความเข้มข้นของสารละลาย ABE 20 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.3 ปริมาณสารอินทรีย์ในคอนเดนเสทจากกระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊สโดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1-3 ลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้น ABE 20 กรัมต่อลิตร

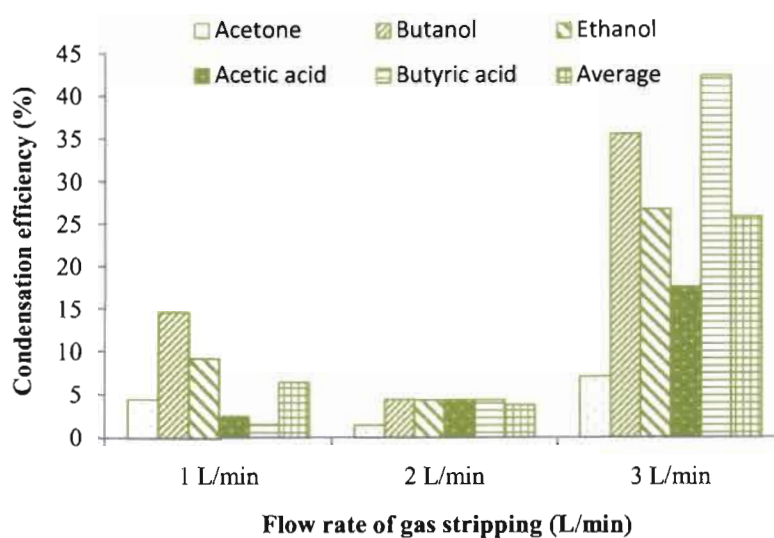
Time (h)	Volume of condensate (mL)																
	1 L/min flow rate of ABE			2 L/min flow rate of ABE			3 L/min flow rate of ABE										
	Condensate I		Condensate II	Condensate I		Condensate II	Condensate I		Condensate II	Condensate I		Condensate II					
Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower			
1	2	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	7.4	0.6	6.8	0.1	-	-
2	2.2	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	11.0	1.6	9.4	0.4	-	-
3	1.8	-	-	-	-	4.2	-	-	-	-	-	14.0	4.2	9.8	0.9	-	-
4	2.0	-	-	-	-	4.4	-	-	-	-	-	8.9	0.1	8.8	0.4	-	-
5	1.8	-	-	-	-	4.2	-	-	-	-	-	9.8	-	-	0.4	-	-
Total						9.8						21.8			53.3		

ซึ่งกรดอะซิติกและกรดบิวทิริกมีความเข้มข้นอยู่ในน้ำหมักระดับคงที่ตลอดกระบวนการหมัก (Chen *et al*, 2014) จากงานวิจัยของ (Lu *et al*, 2013) ได้เสนอว่ากระบวนการหมักที่ควบคุมการใช้เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊ส โดยมีบิวทานอลและแอสีโตนเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการหมัก ABE ซึ่งให้ผลผลิต ABE และบิวทานอลสูงกว่าการหมักที่ไม่ใช้เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ควบคุมในระหว่างการหมัก

ผลการทดลองจากกระบวนการควบคุมแน่นในชุดคอนเดนเสทแสดงประสิทธิภาพการควบคุมแน่นของแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทิริก แสดงในรูปภาพที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเป็น 3 ลิตรต่อนาที ทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมแน่นสูงขึ้น ซึ่งอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนและเกิดการแยกเฟสของสาร บิวทานอลสามารถแยกออกจากแก๊สไนโตรเจนได้ง่ายกว่าแอสีโตน เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทิริก สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อกระแสแก๊สเย็นลงและเกิดการอึดตัวด้วยไอรระเหยของน้ำ และสารประกอบอื่น ๆ บิวทานอลซึ่งเป็นสารที่มีปริมาณมากที่สุดในกระแสแก๊สจึงถูกควบคุมแน่นออกมาในปริมาณความเข้มข้นสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์ตัวอื่น จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที บิวทานอลมีประสิทธิภาพการควบคุมแน่นสูงถึง 35.68% ในตารางที่ 4.4 มีสารประกอบจำนวนหนึ่งหายไปจากระบบการควบคุมแน่น ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 40% เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 ลิตรต่อนาที จะเห็นได้ว่าร้อยละการหายไปของมวลสารเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากปริมาณของแก๊สมีจำนวนเพิ่มขึ้นทำให้แก๊สสามารถพาสารออกมาได้จำนวนมาก อย่างไรก็ตามการควบคุมแน่นควรใช้อุณหภูมิที่ต่ำมาก ๆ และในระบบอาจต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อช่วยในการควบคุมแน่นสาร (Xue *et al*, 2013)



รูปที่ 4.7 ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในชุดคอนเดนเซท 1 ที่ใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ ที่ความเข้มข้นของ ABE 20 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหลแตกต่างกัน (a) 1 ลิตรต่อนาที, (b) 2 ลิตรต่อนาที และ (c) 3 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการควบแน่นของแอซีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทีริก ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ ABE ที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

Prince of Songkla University
Pattani Campus

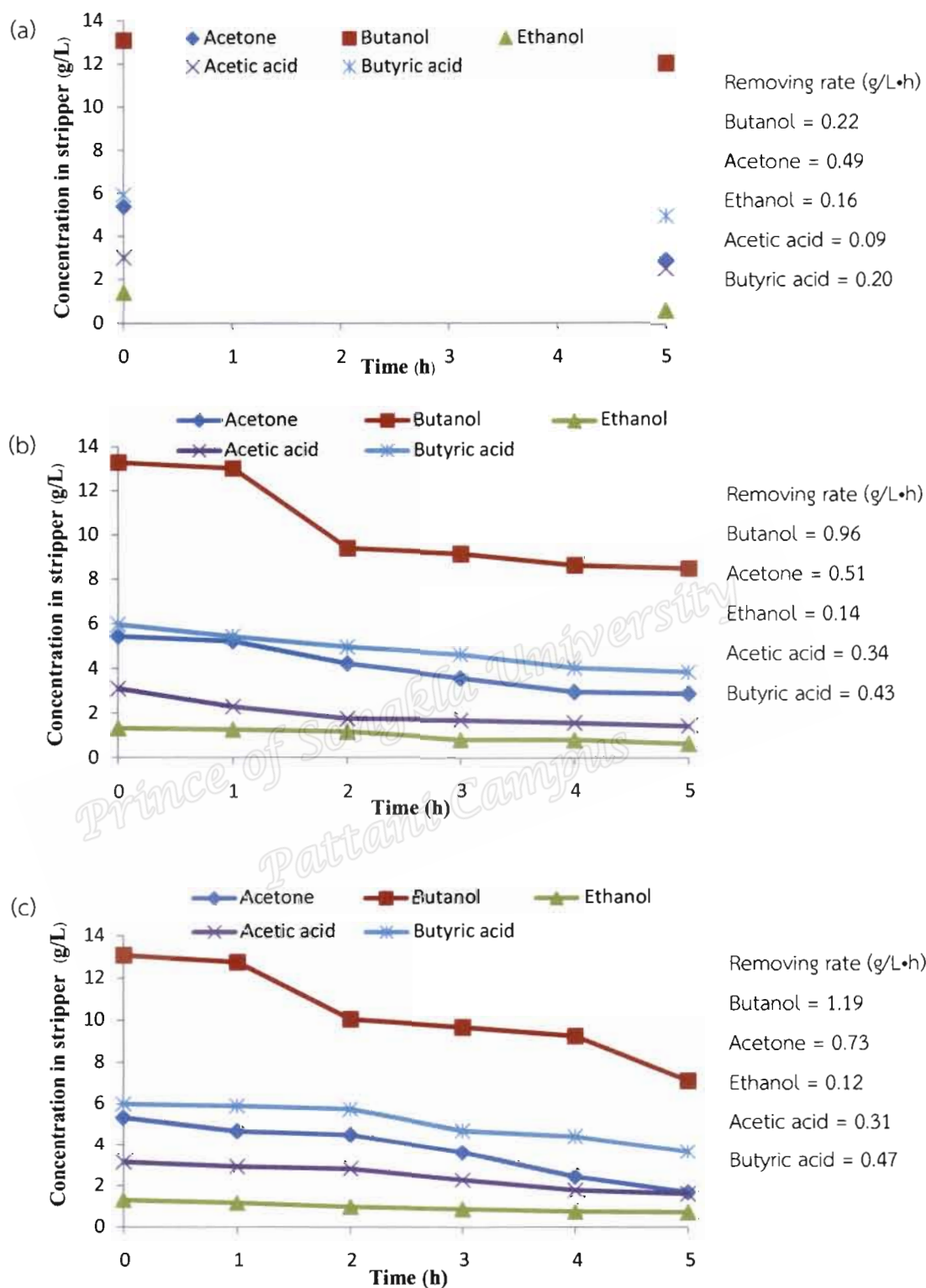
ตารางที่ 4.4 Mass distribution during the stripping process

Gas	Flow rate (L/min)	Concentration (g/L)	Compound	Initial mass in stripper (g/L)	Mass at 5 h (g/L)				Mass loss	% Loss
					Stripper	Condensatel	Condensatell	Impinger		
20%H ₂	1	20	Acetone	10.75	5.84	0.05	0.00	0.00	1.93	39.30
			Butanol	26.18	24.03	0.16	0.00	0.00	2.00	92.78
			Ethanol	2.78	1.23	0.01	0.00	0.00	1.54	99.05
			Acetic acid	6.00	5.06	0.00	0.00	0.01	0.94	98.86
			Butyric acid	11.85	9.89	0.00	0.00	0.04	1.91	97.62
20%H ₂	2	20	Acetone	10.89	5.77	0.16	0.00	0.20	4.76	93.10
			Butanol	26.57	16.96	0.52	0.00	0.01	9.08	94.49
			Ethanol	2.66	1.26	0.02	0.00	0.00	1.38	98.51
			Acetic acid	6.22	2.85	0.00	0.00	0.00	3.37	100.00
			Butyric acid	11.95	7.69	0.01	0.00	0.33	3.92	91.92
20%H ₂	3	20	Acetone	10.68	3.37	0.87	0.00	1.77	4.68	63.93
			Butanol	26.16	14.22	4.84	0.00	0.12	6.99	58.53
			Ethanol	2.62	1.43	0.20	0.00	0.15	0.83	69.83
			Acetic acid	6.32	3.20	0.00	0.00	0.00	3.11	99.94
			Butyric acid	12.02	7.35	0.16	0.00	0.35	4.16	89.16

ข. ผลการทดลองกระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊สโดยใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($H_2 = 20\%$) ในการเป่าไล่

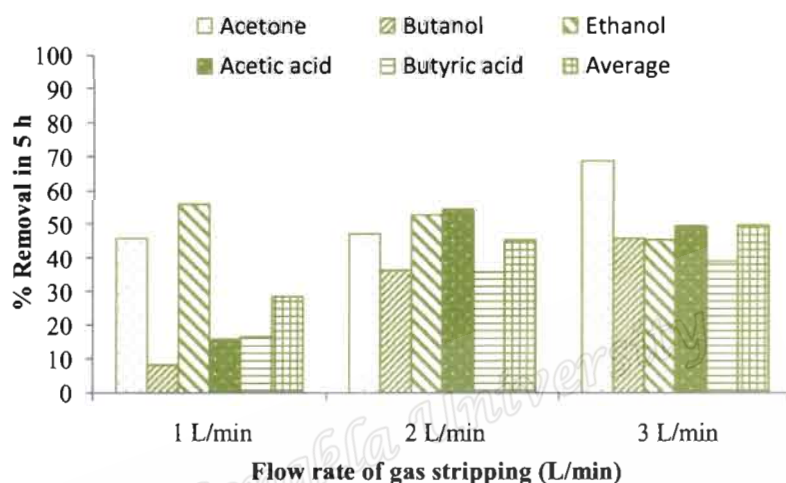
นอกจากแก๊สไฮโดรเจนที่นำมาใช้ในการเป่าไล่ยังสามารถใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก โดยศึกษาประสิทธิภาพการแยกสารอินทรีย์ออกจากถังปฏิกรณ์โดยเปรียบเทียบอัตราการไหลของแก๊สที่ 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที จากรูปที่ 4.9 แสดงปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ของ $20\%H_2$ เปรียบเทียบที่ 3 อัตราการไหล จะเห็นได้ว่าปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ในถังหมักมีการลดลงจากชั่วโมงแรกจนถึงชั่วโมงสุดท้ายเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง แสดงแนวโน้มการลดลงไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการแยกสารอินทรีย์ออกจากถังปฏิกรณ์ของกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สและสามารถลดความเข้มข้นของบิวทานอลเพื่อยับยั้งการเกิดความเป็นพิษของตัวเองที่ความเข้มข้น 12 กรัมต่อลิตรบิวทานอลในน้ำหมัก (Andrade and Vascontes, 2003) สามารถลดความเข้มข้นลงเหลือประมาณ 8 กรัมต่อลิตร ซึ่งควรรักษาระดับความเข้มข้นของบิวทานอลไว้สูงกว่า 8 กรัมต่อลิตร เนื่องจากบิวทานอลสามารถละลายน้ำได้เมื่อมีความเข้มข้น 7 กรัมต่อลิตร แต่ไม่ควรให้ความเข้มข้นเกิน 12 กรัมต่อลิตร ในระหว่างกระบวนการหมัก ABE ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดความเป็นพิษในระบบ (Chen *et al*, 2014) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าบิวทานอลทั้งสามอัตราการไหลมีค่า Removing rate เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่มากขึ้น เนื่องจากปริมาณแก๊สที่มากขึ้นสามารถพาตัวทำละลายออกจากเฟสของเหลวได้เร็วขึ้น แสดงถึงความสามารถในการแยกบิวทานอลออกจากถังปฏิกรณ์

จากรูปที่ 4.9 (a) ได้ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง แต่มีการเก็บตัวอย่างชั่วโมงเริ่มต้นและชั่วโมงสุดท้าย เนื่องจากวางแผนทำการทดลองการเป่าไล่ด้วยแก๊สเพียง 2 ชั่วโมง แต่ผลปรากฏว่าไม่มีการควบแน่น ณ ชั่วโมงที่ 2 จึงเพิ่มเวลาในการทดลองเพื่อเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ ณ ชั่วโมงสุดท้าย อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน เพียงแต่ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที อาจมองเห็นภาพไม่ชัด ซึ่งที่อัตราการไหล 2 และ 3 ลิตรต่อนาที แสดงผลความสามารถในการแยกตัวทำละลายออกจากถังหมักจนมีความเข้มข้นต่ำกว่า 12 กรัมต่อลิตร จากรูปภาพที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการแยกของแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทิริก ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยใช้แก๊สผสม (CO_2 และ H_2) ที่ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน 20% กระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สจะแยกเฉพาะสารระเหยง่าย โดยเฉพาะแอสีโตน บิวทานอลและเอทานอล ส่วนกรดจะถูกแยกออกมาในปริมาณความเข้มข้นน้อย ๆ ซึ่งผลของอัตราการไหลที่ 3 ลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการเป่าไล่ด้วยแก๊สสูงที่สุดถึง 49.49%



รูปที่ 4.9 ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้น ABE 20 กรัมต่อลิตร โดยใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($H_2 = 20\%$) ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล (a) 1 ลิตรต่อนาที, (b) 2 ลิตรต่อนาที และ (c) 3 ลิตรต่อนาที

และสังเกตเห็นได้ว่าแอสีโตนมีค่าร้อยละการแยกสูงกว่าสารอินทรีย์ตัวอื่น ๆ ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยมีค่าเท่ากับ 45.64%, 47.01% และ 68.48% ตามลำดับ เนื่องจากแอสีโตนมีค่าคงที่ของเฮนรีต่ำสุด มีความชอบที่จะอยู่ในเฟสแก๊ส จึงสามารถละลายในกระแสแก๊สและถูกพาออกจากถังปฏิกรณ์ได้มากกว่าสารอินทรีย์ตัวอื่น ๆ



รูปที่ 4.10 ร้อยละในการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทิริกโดยใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($H_2 = 20\%$) ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล (a) 1 ลิตรต่อนาที, (b) 2 ลิตรต่อนาที และ (c) 3 ลิตรต่อนาที

จากกระบวนการแยกสารอินทรีย์สามารถเก็บปริมาตรสารได้เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล แสดงในตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที แสดงผลปริมาตรสูงสุด 43.7 มิลลิลิตร ส่วนอัตราการไหล 1 และ 2 ลิตรต่อนาที มีปริมาตรเท่ากับ 2.1 และ 10.6 มิลลิลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาตรของสารอินทรีย์มีการแยกขึ้นออกเป็น 2 ชั้น เหมือนชุดการทดลองที่ใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ เนื่องจากบิวทานอลที่มีความเข้มข้นมากกว่า 8 กรัมต่อลิตร ไม่สามารถละลายในน้ำได้หมด จากรูปภาพที่ 4.11 แสดงผลความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในคอนเดนเซทจากการเป่าไล่ด้วยแก๊สผสมจะเห็นว่าทั้ง 3 อัตราการไหล แสดงผลบิวทานอลที่มีความเข้มข้นในคอนเดนเซทสูงสุด เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของบิวทานอลในถังปฏิกรณ์มีปริมาณมากและความสามารถในการละลายน้ำน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์ตัวอื่น ๆ ซึ่งที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที แสดงผลความเข้มข้นของบิวทานอลสูงสุดถึง 175.25 กรัมต่อลิตร

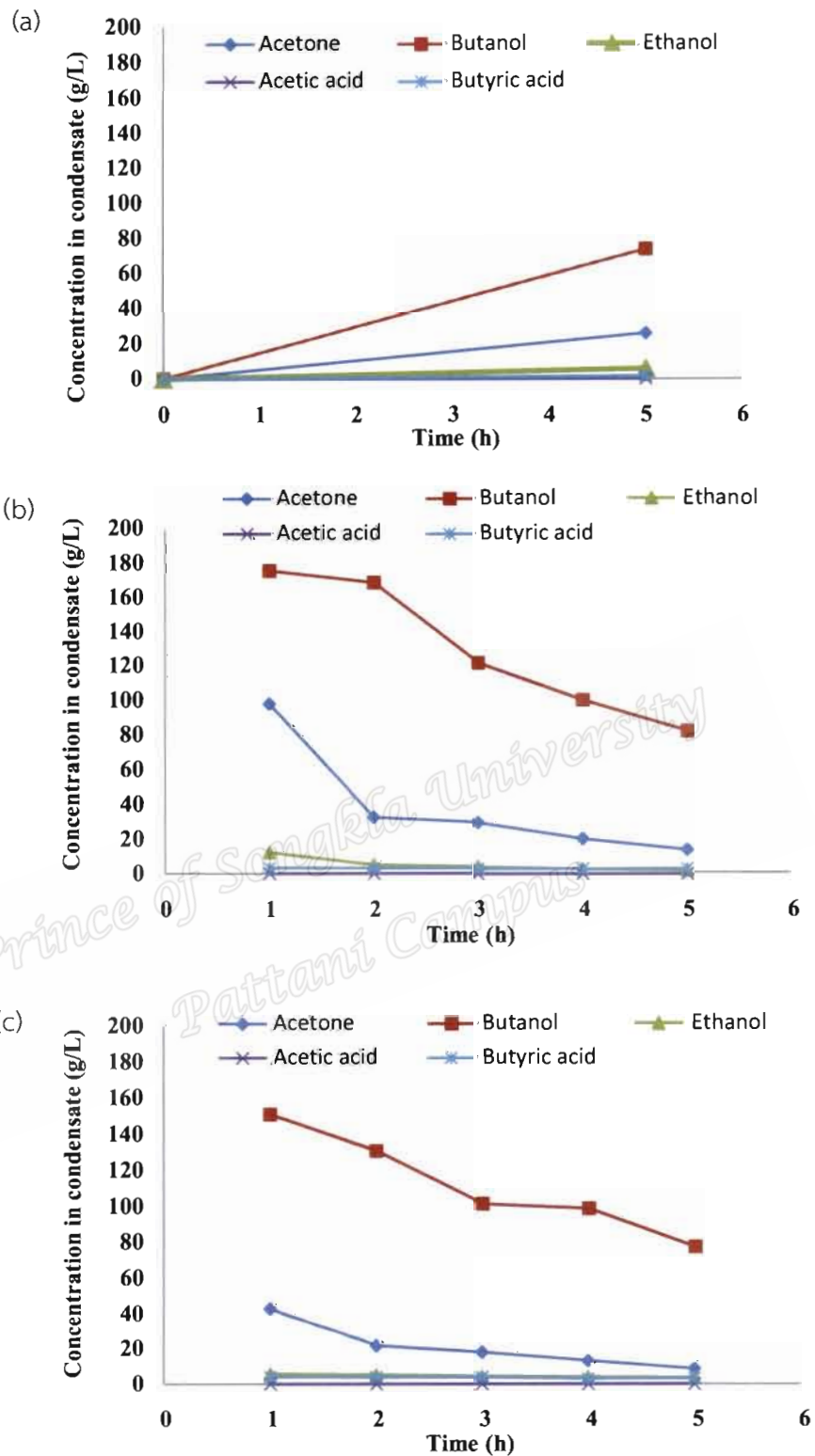
ตารางที่ 4.5 ปริมาตรตัวทำละลายในคอนเดนเซอร์โดยใช้แก๊สผสม (CO₂ และ H₂) ที่ความเข้มข้น 20% แก๊สไฮโดรเจนในการเป่าไล่ที่อัตราไหล 1-3 ลิตรต่อนาที

Time (h)	Volume of condensate (mL)											
	1 L/min flow rate of ABE				2 L/min flow rate of ABE				3 L/min flow rate of ABE			
	Condensate I		Condensate II		Condensate I		Condensate II		Condensate I		Condensate II	
Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	
1	-	-	-	1.4	-	-	-	-	6.6	0.2	6.4	-
2	-	-	-	1.6	0.2	1.4	-	-	11.0	1.0	10.0	-
3	-	-	-	2.4	0.2	2.0	-	-	9.0	0.6	8.4	-
4	-	-	-	2.2	0.2	2.2	-	-	7.6	0.2	7.4	-
5	2.1	0.1	2	3.0	0.2	2.8	-	-	9.5	-	-	-
Total	2.1		10.6		43.7							

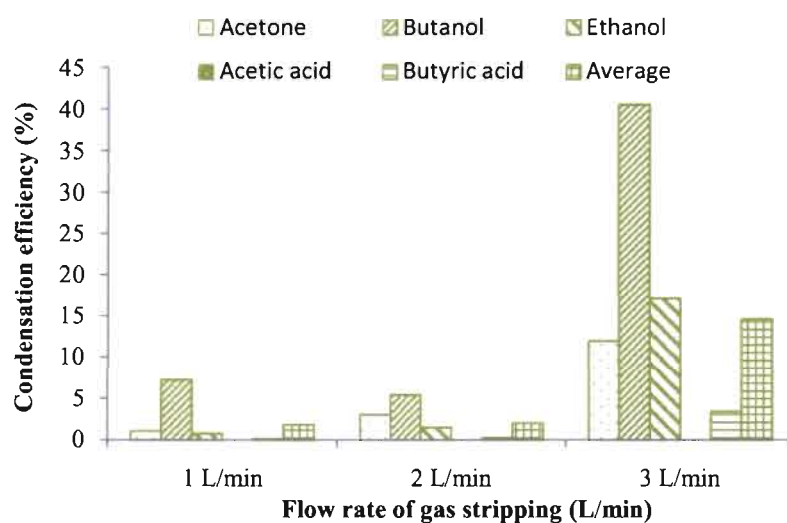
จะเห็นได้ชัดว่าอัตราการแยกตัวทำละลายเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของการเป่าไล่ด้วยแก๊ส นอกเหนือจากนี้ตัวทำละลายในคอนเดนเซทสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ได้ โดยเพิ่มปริมาณของตัวทำละลายในขณะที่มีปริมาณน้ำคงที่ (Lu et al, 2013)

จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สแสดงประสิทธิภาพการควบแน่นของสารอินทรีย์ โดยบิวทานอลมีประสิทธิภาพสูงสุดในการควบแน่นถึง 7.20%, 5.40% และ 40.50% ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และผลการทดลองแสดงประสิทธิภาพการควบแน่นสูงสุดคือ 14.58% ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที จากรูปที่ 4.12 มีความสอดคล้องกับผลของมวลสารที่หายไปจากระบบในตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับชุดการทดลองการใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ที่อัตราการไหลต่างกัน เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 ลิตรต่อนาที ทำให้อัตราการหายไปของมวลสาร (% Loss) มากขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาที่สารอยู่ในระบบการควบแน่นน้อยลง จึงเกิดการหายไปของมวลสารมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการควบแน่นน้อยลง แต่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 3 ลิตรต่อนาที ผลปรากฏว่าอัตราการหายไปของมวลสารน้อยลง หมายถึงสารอินทรีย์สามารถควบแน่นได้มากขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการปั่นป่วน (Turbulence) ส่งผลให้สารอินทรีย์ถูกแยกออกจากเฟสแก๊สได้มากขึ้น

Prince of Songkhla University
Pattani Campus



รูปที่ 4.11 ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในชุดคอนเดนเซอร์ 1 ที่ความเข้มข้น ABE 20 กรัมต่อลิตร โดยใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($H_2 = 20\%$) ในการเป่าไลที่อัตราการไหล (a) 1 ลิตรต่อนาที, (b) 2 ลิตรต่อนาที และ (c) 3 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการควบแน่นของแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติกและกรดบิวทีริก โดยใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($H_2 = 20\%$) ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล (a) 1 ลิตรต่อนาที, (b) 2 ลิตรต่อนาที และ (c) 3 ลิตรต่อนาที

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตารางที่ 4.6 Mass distribution during the stripping process

Gas	Flow rate (L/min)	Concentration (g/L)	Compound	Initial mass in stripper (g/L)	Mass at 5 h (g/L)				Mass loss	% Loss
					Stripper	Condensatel	Condensatell	Impinger		
20%H ₂	1	20	Acetone	10.75	5.84	0.05	0.00	0.00	1.93	39.30
			Butanol	26.18	24.03	0.16	0.00	0.00	2.00	92.78
			Ethanol	2.78	1.23	0.01	0.00	0.00	1.54	99.05
			Acetic acid	6.00	5.06	0.00	0.00	0.01	0.94	98.86
20%H ₂	2	20	Butyric acid	11.85	9.89	0.00	0.00	0.04	1.91	97.62
			Acetone	10.89	5.77	0.16	0.00	0.20	4.76	93.10
			Butanol	26.57	16.96	0.52	0.00	0.01	9.08	94.49
			Ethanol	2.66	1.26	0.02	0.00	0.00	1.38	98.51
20%H ₂	3	20	Acetic acid	6.22	2.85	0.00	0.00	0.00	3.37	100.00
			Butyric acid	11.95	7.69	0.01	0.00	0.33	3.92	91.92
			Acetone	10.68	3.37	0.87	0.00	1.77	4.68	63.93
			Butanol	26.16	14.22	4.84	0.00	0.12	6.99	58.53
20%H ₂	3	20	Ethanol	2.62	1.43	0.20	0.00	0.15	0.83	69.83
			Acetic acid	6.32	3.20	0.00	0.00	0.00	3.11	99.94
			Butyric acid	12.02	7.35	0.16	0.00	0.35	4.16	89.16

4.3 ผลของชนิดแก๊สเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที

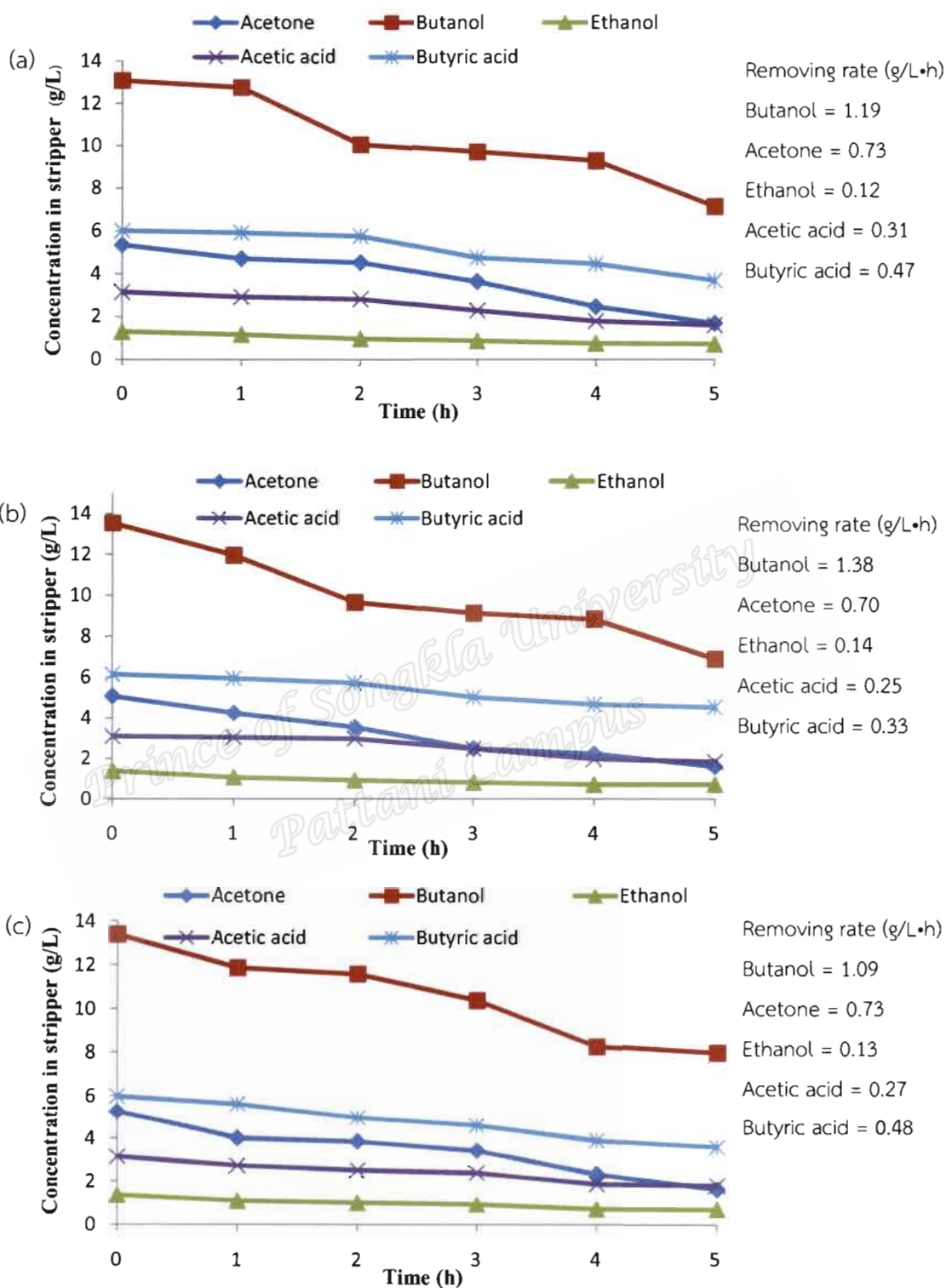
สำหรับการเลือกใช้ชนิดแก๊สในการเป่าไล่สามารถพิจารณาได้จากคุณสมบัติ ดังนี้

(1) แก๊สที่ใช้ในการเป่าไล่จะต้องมีความสามารถในการละลายน้อย

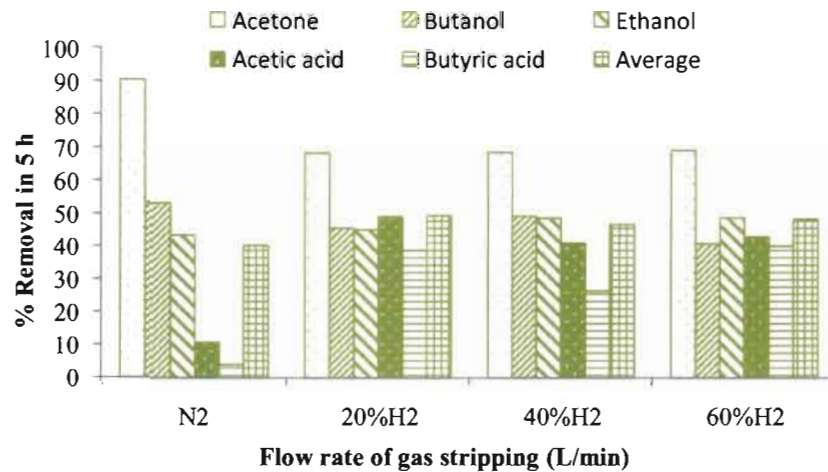
(2) ตัวทำละลายจะต้องไม่เป็นสารที่ระเหยยาก

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แก๊สในการเป่าไล่ 2 ชนิด คือแก๊สไนโตรเจนและแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีความเข้มข้นที่แตกต่างกันคือ 100%N₂, 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเป่าไล่ด้วยแก๊สและประสิทธิภาพการควบแน่นโดยใช้แก๊สทั้ง 2 ชนิดที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที จากรูปที่ 4.11 แสดงปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ของ 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂ ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที จะเห็นได้ว่าทั้งสามความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนมีเส้นแนวโน้มการลดลงของสารอินทรีย์ไปในทิศทางเดียวกันเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งบิวทานอลถูกแยกออกจากสารละลายผสมได้ดีจนมีความเข้มข้น ณ ชั่วโมงสุดท้ายในถังปฏิกรณ์ต่ำกว่า 8 กรัมต่อลิตร เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สสามารถลดความเข้มข้นของบิวทานอลที่เป็นสาเหตุของการเกิดความเป็นพิษต่อตัวมันเอง ผลปรากฏว่าทั้งสามความเข้มข้นมีประสิทธิภาพการแยกเท่ากับ 49.49%, 46.82% และ 48.46% ที่ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจน 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂ ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกสารอินทรีย์ออกจากถังปฏิกรณ์เช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 4.12 แสดงร้อยละในการแยกตัวทำละลายออกจากถังหมัก โดยเปรียบเทียบชนิดแก๊สที่ใช้ในการเป่าไล่สารที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ผลปรากฏว่า 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂ มีประสิทธิภาพการแยกตัวทำละลายออกจากถังปฏิกรณ์ได้ดีกว่าการใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนชอบอยู่ในแก๊สเฟสมากกว่าในเฟสของเหลว จึงสามารถแยกตัวทำละลายออกมาได้ดี จะเห็นได้ว่าแอสีโตนมีประสิทธิภาพในการแยกออกจากถังปฏิกรณ์ได้มากกว่าสารประกอบตัวอื่น ๆ ที่ความเข้มข้นของแก๊ส 100%N₂, 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂ เนื่องจากแอสีโตนชอบที่อยู่ในเฟสแก๊สมากกว่าและสอดคล้องกับกฎของเฮนรี่ที่มีค่าการละลายในแก๊สมากที่สุด ทำให้มีประสิทธิภาพการแยกสูงสุดถึง 90.33% โดยใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ และเมื่อเปรียบเทียบเฉพาะสารประกอบชนิดเดียวกันในชุดการทดลองที่ใช้แก๊สผสมโดยมีความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าสารแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการแยกใกล้เคียงกันโดยไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นั่นหมายความว่าความเข้มข้นของแก๊สที่เพิ่มไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกของสารประกอบ



รูปที่ 4.13 ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ที่ความเข้มข้น ABE 20 กรัมต่อลิตร โดยใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ในการเป่าไล่ (a) 20% H₂, (b) 40% H₂ และ (c) 60% H₂

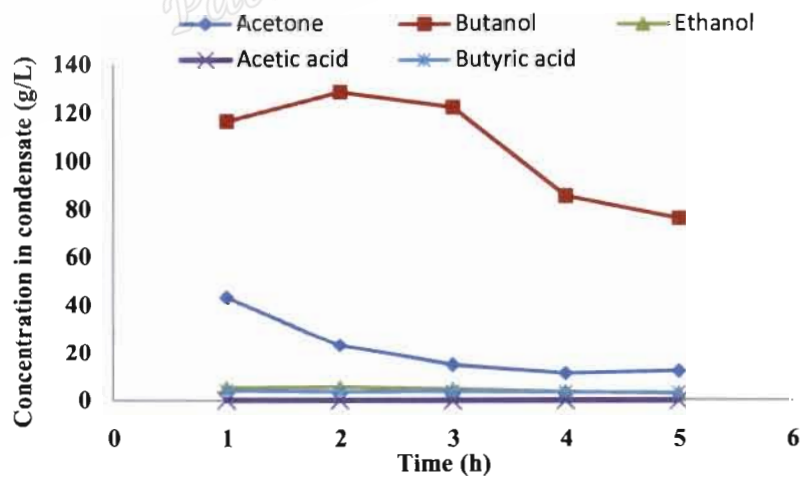
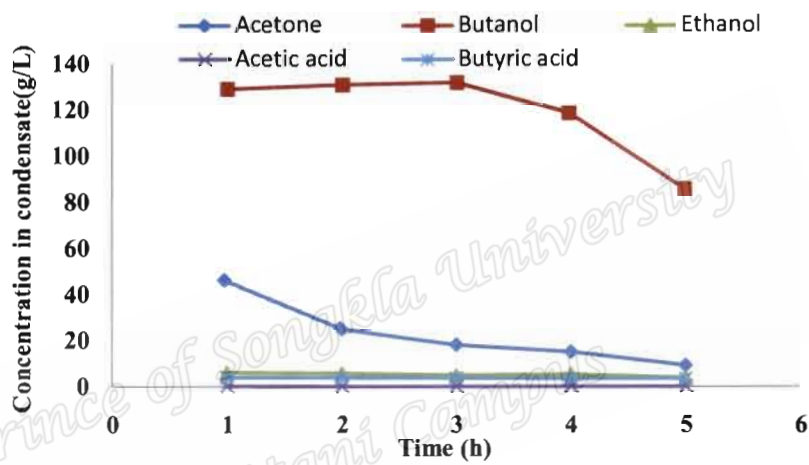
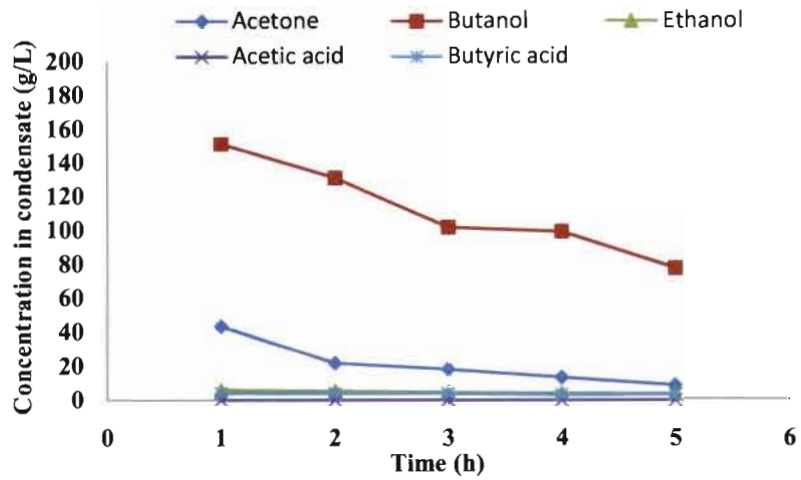


รูปที่ 4.14 ค่ายร้อยละในการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทริกโดยเปรียบเทียบชนิดแก๊สที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ในการเป่าไล่ 100%N₂, 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂

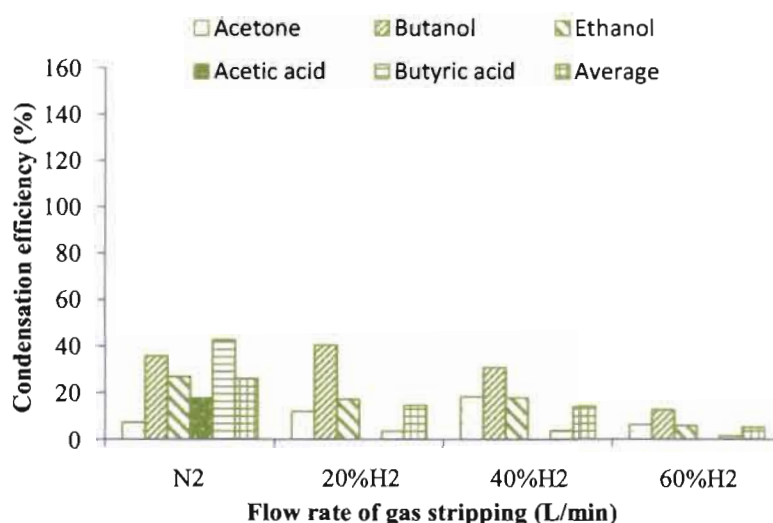
จากกระบวนการแยกตัวทำละลายเข้าสู่ระบบการควบแน่นสารในคอนเดนเซท 1 สามารถเก็บตัวอย่างซึ่งมีปริมาตรเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น 43.7, 46.3 และ 47.9 มิลลิลิตร ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ในชุดคอนเดนเซท 1 ซึ่งมีการแยกชั้นของตัวทำละลายเหมือนกันทั้งสามชุดการทดลอง แสดงในตารางที่ 4.7 และเมื่อวัดความเข้มข้นของตัวทำละลายผลปรากฏว่าทั้งสามชุดการทดลองสามารถควบแน่นบิวทานอลที่มีความเข้มข้นสูงสุดได้เหมือนกันเมื่อเทียบกับสารประกอบตัวอื่น ๆ และพบว่าที่ชุดการทดลอง 20%H₂ มีความเข้มข้นของบิวทานอลสูงสุดถึง 150.92 กรัมต่อลิตร แสดงในรูปที่ 4.13 แอสีโตนและเอทานอลถูกควบแน่นภายในคอนเดนเซทเช่นเดียวกันแต่ในปริมาณความเข้มข้นที่น้อยมาก ๆ โดยปกติแล้วความเข้มข้นของบิวทานอลที่สามารถควบแน่นได้อยู่ในช่วง ~80 – 120 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าเอทานอลเป็น 3 - 4 เท่า เป็นตัวบ่งชี้ว่าเทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สมีความสามารถในการแยกบิวทานอลได้มากกว่าเอทานอล ซึ่งชุดการทดลองที่ 100%N₂ มีประสิทธิภาพการควบแน่นสูงสุดถึง 25.96% เมื่อเทียบกับ 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂ แสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการควบแน่นสารลดลงตามไปด้วย เนื่องจากชุดการทดลอง 60%H₂ พบว่ามีร้อยละการหายไปของมวลสารประกอบทั้งห้าตัว (% Loss) มากกว่าชุดการทดลองที่ 20%H₂ และ 40%H₂ แสดงในตารางที่ 4.8 เมื่อแก๊สมีปริมาณมากและเข้าไปอยู่ในระบบการควบแน่นในระยะเวลาที่สั้น จึงทำให้มวลสารมีโอกาสที่จะหายออกไปจากระบบส่งผลให้มีประสิทธิภาพการควบแน่นของสารน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.7 ปริมาตรตัวทำละลายในคอนเดนเซอร์ที่ใช้แก๊สผสม (CO₂ และ H₂) ที่ความเข้มข้น 20%, 40% และ 60% แก๊สไฮโดรเจนในการป่าไต้ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที

Time (h)	Volume of condensate (mL)												
	20% of H ₂				40% of H ₂				60% of H ₂				
	Condensate I		Condensate II		Condensate I		Condensate II		Condensate I		Condensate II		
	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	Upper	Lower	Total	
1	6.6	0.2	6.4	-	-	8.1	0.4	7.7	-	-	8.8	0.6	8.2
2	11.0	1.0	10.0	-	-	12.5	1.0	11.5	-	-	11.2	1.2	10.0
3	9.0	0.6	8.4	-	-	12.7	0.4	12.7	-	-	9.6	1.0	8.6
4	7.6	0.2	7.4	-	-	7.5	0.2	7.3	-	-	10.8	0.4	10.4
5	9.5	-	-	-	-	5.1	0.2	4.9	-	-	7.5	0.2	7.3
Total			43.7			46.3					47.9		



รูปที่ 4.15 ปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในชุดคอนเดนเซท 1 ที่ความเข้มข้นของ ABE 20 กรัมต่อลิตร โดยใช้แก๊สแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที ในการเป่าไล่ (a) 20% H₂, (b) 40% H₂ และ (c) 60% H₂



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการควบแน่นของแอซีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทริกโดยเปรียบเทียบการใช้แก๊สต่างชนิด (100%N₂, 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂) ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบแน่นระหว่างชนิดแก๊สไนโตรเจนและแก๊สไฮโดรเจน ผลปรากฏว่า แก๊สไนโตรเจนมีประสิทธิภาพการควบแน่นสูงสุด เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนมีค่าการละลายน้ำที่น้อยกว่า จึงสามารถพาสารอินทรีย์ระเหยง่าย (ABE) ออกจากเฟสของเหลวไปยังเฟสแก๊สได้ง่ายขึ้น ตามด้วยกฎของเฮนรี่ที่กล่าวว่า แก๊สไนโตรเจนมีค่าการละลายในแก๊สมากที่สุด ชอบที่อยู่ในเฟสแก๊สเมื่อเข้าสู่ระบบการควบแน่นจึงสามารถควบแน่นสารได้ดีกว่าแก๊สผสม และเมื่อเปรียบเทียบมวลสารที่หายไปในช่วงการทดลองที่ใช้แก๊สไนโตรเจนในการเป่าไล่ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การหายไปน้อยกว่าชุดแก๊สผสม จึงเป็นเหตุผลสนับสนุนได้ว่า แก๊สไนโตรเจนมีประสิทธิภาพในการควบแน่นที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.8 Mass distribution during the stripping process

Gas	Flow rate (L/min)	Concentration (g/L)	Compound	Initial mass in stripper (g/L)	Mass at 5 h (g/L)				Mass loss	% Loss
					Stripper	Condensatel	Condensatell	Impinger		
20%H ₂	3	20	Acetone	10.68	3.37	0.87	0.00	1.77	4.68	63.93
			Butanol	26.16	14.22	4.84	0.00	0.12	6.99	58.53
			Ethanol	2.62	1.43	0.20	0.00	0.15	0.83	69.83
			Acetic acid	6.32	3.20	0.00	0.00	0.00	3.11	99.94
			Butyric acid	12.02	7.35	0.16	0.00	0.35	4.16	89.16
40%H ₂	3	20	Acetone	3.19	0.25	6.13	2.02	3.67	52.67	3.19
			Butanol	13.72	1.31	19.06	0.13	9.12	68.28	13.72
			Ethanol	1.42	0.06	1.14	0.16	0.95	70.04	1.42
			Acetic acid	3.66	0.00	0.00	0.00	2.54	99.98	3.66
			Butyric acid	9.05	0.04	0.56	0.35	2.78	85.54	9.05
60%H ₂	3	20	Acetone	10.51	3.23	0.36	6.26	1.69	5.13	70.54
			Butanol	26.78	15.85	1.80	19.23	0.12	9.43	86.30
			Ethanol	2.74	1.40	0.08	1.03	0.14	1.12	83.42
			Acetic acid	6.29	3.59	0.00	0.00	0.00	2.70	100.00
			Butyric acid	11.97	7.16	0.06	0.55	0.35	4.40	91.33

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สสำหรับการแยกแอสีโตน บิวทานอล และเอทานอลออกจากสารละลาย ABE โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก ABE ดังนี้ จากผลการทดลองการเปรียบเทียบความเข้มข้นของ ABE ในถังปฏิกรณ์ที่ใช้แก๊สไนโตรเจน ในการเป่าไล่ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที แสดงผลประสิทธิภาพการเป่าไล่ด้วยแก๊สสูงสุด ที่ความเข้มข้น ABE 5 กรัมต่อลิตร 67.78% และแอสีโตนมีประสิทธิภาพสูงสุดในการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ในทั้งสามความเข้มข้น และที่ความเข้มข้นของ ABE 20 กรัมต่อลิตร แสดงประสิทธิภาพการควบแน่น สูงสุด 25.96% โดยบิวทานอลมีประสิทธิภาพในการควบแน่นสูงสุดในทั้งสามความเข้มข้น จากผลการเปรียบเทียบอัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยใช้แก๊สไนโตรเจนและแก๊สผสม ($\text{CO}_2 + \text{H}_2$) พบว่าผลของอัตราการไหลของแก๊สที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีประสิทธิภาพการแยก ABE ออกจากสารละลายผสมที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยอัตราการไหลที่ 3 ลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพการแยก สูงสุด ซึ่งการเป่าไล่ด้วยแก๊สผสมให้ผลดีกว่าถึง 9.04% เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สไนโตรเจน และมีประสิทธิภาพการเป่าไล่ด้วยแก๊สรวมสูงกว่าประมาณ 49.40% แก๊สไนโตรเจนมีประสิทธิภาพ การควบแน่นสูงกว่าแก๊สผสมประมาณ 11.38% โดยแก๊สไนโตรเจนแสดงประสิทธิภาพการควบแน่นที่ อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที เท่ากับ 25.96% สำหรับความเข้มข้นในคอนเดนเซทที่ได้จากการเป่าไล่ ด้วยแก๊สมีความเข้มข้นของบิวทานอลสูงถึง 150.92 กรัมต่อลิตร ในชุดการทดลองที่ใช้ 20% ไฮโดรเจนในแก๊สผสม

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เทคนิคการเป่าไล่ด้วยแก๊สสามารถแยกสารอินทรีย์ (ABE) ออกจากถังปฏิกรณ์ได้ โดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบ เป็นวิธีที่ง่ายต่อการติดตั้งกับระบบการหมัก มีความเจาะจงแยกเฉพาะสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากร้าน้ำหมัก ไม่แยกสารอาหารออก ไม่มีผลเสียต่อ เชื้อแบคทีเรีย และเพิ่มประสิทธิภาพอัตราการผลิตตัวทำละลาย ที่สำคัญช่วยลดความเข้มข้นของ บิวทานอลที่มีผลต่อเชื้อในระบบการหมัก และช่วยยับยั้งไม่ให้เกิดความเป็นพิษหรือควบคุมความ เข้มข้นของบิวทานอลในระหว่างกระบวนการหมักได้ โดยสามารถใช้แก๊สผสมที่ได้จากกระบวนการ หมักมาใช้ในการเป่าไล่เพื่อแยกสารออกจากน้ำหมัก เป็นการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายและเป็นการใช้ สรรพากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าและให้เกิดประโยชน์สูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเป่าไล่ด้วยแก๊สร่วมกับกระบวนการหมัก ABE โดยใช้เชื้อ *C.beijerinikii* เพื่อลดความเข้มข้นของบิวทานอลในน้ำหมักในระหว่างการหมักจนในระบบมีความเข้มข้นของบิวทานอลต่ำกว่าระดับความเป็นพิษ
2. ศึกษาอุณหภูมิที่มีต่อระบบการควบแน่นของสาร เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญอีกหนึ่งประการ ซึ่งการใช้อุณหภูมิที่ต่ำมากๆ ระบบสามารถควบแน่นสารได้ปริมาณมากขึ้น
3. ศึกษาการนำแก๊สจากกระบวนการเป่าไล่ด้วยแก๊สกลับมาใช้ใหม่ โดยแก๊สที่ใช้ในการเป่าไล่ในระบบไม่ว่าจะเป็นแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สผสม สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในระบบได้อีกครั้ง สิ่งที่ต้องคำนึงคือ วิธีการแยกแก๊สเก็บไว้ในถังพักแก๊สและตรวจสอบความบริสุทธิ์ของแก๊สก่อนปล่อยเข้าสู่ถังปฏิกรณ์

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บรรณานุกรม

- Abdehagh, N., Tezel, F.H. and Thibault, J. 2014. Separation techniques in butanol production: Challenges and developments. *Biomass and Bioenergy*, 60, 222-246.
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M. and Negro, M.J. 2010. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*. 101, 4851-4861.
- Andrade, J.C. and Vasconcelos, I. 2003. Continuous cultures of *Clostridium acetobutylicum*: culture stability and low-grade glycerol utilization. *Biotechnology Letters*. 25, 121-125.
- Anbarasan, P., Baer, Z. C., Sreekumar, S., Gross, E., Binder, J. B., Blanch, H. W., Clark, D.S, Toste, F.D., 2012. Integration of chemical catalysis with extractive fermentation to produce fuels. *Nature* 491, 235-239.
- Butler, E.T. 2010. Continuous single vessel butanol synthesis by fermentation. United States Patent. US 7833778B2, issued November 16.
- Chao, K.P., Chen, C.S., Wang, E.U. and Su, Y. 2005. Aquacultural characteristics of *Rhizoclonium riparian* an evaluation of its biomass growth potential *Journal of Applied Phycology*. 17, 67-73.
- Chao, K.P., Su, Y. and Chen, C.S. 1999. Chemical composition and potential for utilization of the marine alga *Rhizoclonium* sp. *Journal of Applied Phycology*. 11, 525-533.
- Chen, Y., Ren, H., Liu, D., Zhao, T., Shi, X., Cheng, H., Zhao, N., Li, Z., Li, Z., Li, B., Niu, H., Zhuang, W., Xie, J., Chen, X., Wu, J., Ying, H., 2014. Enhancement of n-butanol production by *in situ* butanol removal using permeating-heating-gas stripping in acetone-butanol-ethanol fermentation. *Bioresource Technology* 164, 276-284.
- Cai, D., Chang, Z., Gao, L., Chen, C., Niu, Y., Qin, P., Wang, Z., Tan, T. 2015. Acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation integrated with simplified gas stripping using sweet sorghum bagasse as immobilized carrier. *Chemical Engineering Journal*, 227, 176-185.

- Cai, D., Chen, H., Chen, C., Hu, S., Wang, Y., Chang, Z., Miao, Q., Qin, P., Wang, Z., Wang, J., Tan, T., 2016. Gas stripping-pervaporation hybrid process for energy-saving product recovery from acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation broth. *Chemical Engineering Journal* 287, 1-10.
- Cai, D., Wang, Y., Chen, C., Qin, P., Miao, Q., Zhang, C., Li, P., Tan, T., 2016. Acetone-Butanol-Ethanol from sweet sorghum juice by an immobilized fermentation-gas stripping integration process. *Bioresource Technology* 211, 704-710.
- Davis, S. E., Morton, S. A., 2008. Investigation of ionic liquids for the separation of butanol and water. *Separation Science and Technology* 43, 2460-2472.
- de Vrije, T., Budde, M., van der Wal, H., Claassen, P. A.M. and López-Contreras, A. M., 2013. 'In situ' removal of isopropanol, butanol and ethanol from fermentation broth by gas stripping. *Bioresource Technology*, 137, 153-159.
- Durre P. 2007. Biobutanol: An attractive biofuel. *Biotechnol Journal*. 2, 1525-1534.
- Durre P. 2008. Fermentative butanol production-bulk chemical and biofuel. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1125, 353-362.
- El-Zawawy, W.K., Ibrahim, M.M. Abdel-Fattah, Y.R., Soliman, N.A. and Mahmoud, M.M. 2011. Acid and enzyme hydrolysis to convert pretreated lignocellulosic materials into glucose for ethanol production. *Carbohydrate Polymers*. 84, 865-871.
- Ezeji, T.C., Karcher, P.M., Qureshi, N. and Blaschek, H.P. 2005. Improving performance of a gas stripping-based recovery system to remove butanol from *Clostridium beijerinckii* fermentation. *Bioprocess Biosyst Eng*. 27: 207-214.
- Ezeji, T.C., Qureshi, N. and Blaschek, H.P. 2004. Acetone butanol ethanol (ABE) production from concentrated substrate: reduction in substrate inhibition by fed-batch technique and product inhibition by gas stripping. *Appl Microbiol Biotechnol*, 63: 653-658.
- Ezeji, T.C., Qureshi, N. and Blaschek, H.P. 2007a. Bioproduction of butanol from biomass: from genes to bioreactors. *Current Opinion in Biotechnology*, 18:220-227

- Ezeji, T., Qureshi, N. and Blaschek, H.P. 2007b. Butanol Production From Agricultural Residues: Impact of Degradation Products on *Clostridium beijerinckii* Growth and Butanol Fermentation. *Biotechnology and Bioengineering*. 97, 1460-1469.
- Glassner, D.A. Jain, M.K. and Datta, R. 1991. Process for the fermentative production of acetone butanol and ethanol. United States Patent. US 5063156, issued November 5.
- Intanoo, P., Chaimongkol, P., Chavadej, S, 2016. Hydrogen and methane production from cassava wastewater using two-stage upflow anaerobic sludge blanket (UASB) with an emphasis on maximum hydrogen production. *Science Direct*.41, 6107-6114.
- Jensen, N.S., Thygesen, A., Leipold, F., Thomsen, S.J., Roslander, C., Lilholt, H. and Bjerre, AB. 2013. Pretreatment of the macroalgae *Chaetomorpha linum* for the production of bioethanol – comparison of five pretreatment technologies. *Bioresource Technology*. 140, 36 - 42.
- Jones, K., Wood, W.W, 1986. The preparation and attempted alkylation of some 6-cyano-carbohydrates. 155, 217-222.
- Kaminski, W., Tomczak, E. and Gorak, A. 2011. Biobutanol production and purification method. *Ecological Chemistry and Engineerings*. 18 (1), 31-37.
- Lee, S.Y., Park, J.H., Jang, S.H., Nielsen, L.K., Kim, J., and Jang, K.S., 2008. Fermentation butanol production by Clostridia. *Biotechnology and Bioengineering*. 101, 209-228.
- Lu, C., Zhao. J., Yang, S.T., Wei, D, 2012. Fed-batch fermentation for n-butanol production from cassava bagasse hydrolysate in a fibrous bed bioreactor with continuous gas stripping. *Bioresearch Technology*. 104, 380-387.
- Lu, C., Dong, J. and Yang, S.T. 2013. Butanol production from wood pulping hydrolysate in an integrated fermentation-gas stripping process. *Bioresearch Technology*. 143, 467-475.
- Lu, K.M., Li, Y.S, 2014. An integrated *in situ* extraction-gas stripping process for Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) fermentation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 45, 2106-2110.

- Mitchell W.J. 1998. Physiology of carbohydrate to solvent conversion by Clostridia. *Advances in Microbial Physiology*, 39: 31-130.
- McNeil, B., Kristiansen, B, 1986. The Acetone Butanol fermentation. *Advances in Applied Microbiology*. 31, 61-91.
- Nigam, P.S. and Singh, A. 2011. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*. 37, 52-68.
- Ollivier, F., Cellier, C., Rousseaux, p., 2011. Method for purifying an alcohol from a fermentation broth using a falling film, a nipped film, a thin film or a short path evaporator. *Metabolic Explorer*. 13. 1223, 848.
- Parten, W.D. 2009. Method for controlling the butanol concentration in a fermentation broth during butanol production. United States Patent. WO2009079362 A2, issued June 25.
- Qureshi, N., Saha, C.B., Hector, R.E., Hughes, S.R. and , Cotta, M.A. 2008b. Butanol production from wheat straw by simultaneous saccharification and fermentation using *Clostridium beijerinckii*: Part I-Batch fermentation. *Biomass and Bioenergy*, 32g 168-175.
- Rodrigues, M.A. and Bon, E.P.S. 2011. Evaluation of *Chlorella* (Chlorophyta) as source of fermentable sugar via cell wall enzymatic hydrolysis. *Enzyme Research*, Volume 2011, Article ID 405603, 5 pages
- Ruangchuay, R., Lueangthuwapranit, C. and Pianthumdee, N. 2550. Apparent characteristics and taxonomic study of macroalgae in Pattani Bay. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 29(4), 893-905.
- Sander, R. 1999. Compilation of Henry's law Constants for Inorganic and Organic Species of Potentanc in Environmental chimmistyy. Germany P_p. 37,48
- Vance, A.G. 2012. Fuel farm process for producing butanol. United States Patent. US 7855061 B2, issued December 21.
- Vera, J., Castro, J., Gonzalez, A. and Moenne, A. 2011. Seaweed Polysaccharides and Derived Oligosaccharides Stimulate Defense Responses and Protection Against Pathogens in Plants. *Marine Drugs*. 93, 52514-2525.
- Wackett, L. P., 2008. Biomass to fuels via microbial transformation. *Current Opinion in Chemical Biology* 12, 187-193

- Wargacki, A.J. Leonard, E., Win, M.N., Regitsky, D.D., Santos, C.N.S., Kim, P.B., Cooper, S.R., Raisner, R.M., Herman, A. Sivitz, A. B., Lakshmanaswamy, A., Kashiyama, Y., Baker, D. and Yoshikuni, Y. 2012. An Engineered Microbial Platform for Direct Biofuel Production from Brown Macroalgae. *Science*, 335: 303-313.
- Xue, C., Zhao, J., Liu, F., Lu, C., Yang, S.T. and Bai, F.W. 2013. Two-stage *in situ* gas stripping for enhanced butanol fermentation and energy-saving product recovery. *Bioresourch Technology*. 135, 396-402.
- Xue, C., Du, G.Q., Sun, J.X., Chen, L.J., Gao, S.S., Yu, M.L., Yang, S.T. and Bai, F.W. 2014. Characterization of gas stripping and its integration with acetone-butanol-ethanol fermentation for high-efficient butanol production and recovery *Biochemical. Engineering Journal*, 83, 55-61.

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก ก

ตาราง ก1 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 5 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	0.94	4.10	0.32	3.09	3.34
1	0.58	3.37	0.26	2.90	3.08
2	0.33	2.77	0.21	2.15	2.56
3	0.32	2.50	0.19	2.12	2.26
4	0.19	1.47	0.03	2.11	2.24
5	0.07	0.91	0.03	1.89	2.07
Condensate I (g)					
1	0.01	0.10	0.01	0.01	0.01
2	0.02	0.24	0.02	0.01	0.01
3	0.02	0.24	0.02	0.01	0.01
4	0.03	0.39	0.02	0.01	0.01
5	0.01	0.14	0.01	0.01	0.01
Condensate II (g)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก2 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่มีความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	5.50	17.57	1.39	4.23	5.27
1	2.56	11.81	1.05	4.01	5.26
2	1.72	10.73	1.01	4.05	5.16
3	1.35	10.44	0.95	3.90	5.10
4	1.35	10.42	0.95	3.80	4.91
5	0.53	8.21	0.79	3.77	4.96
Condensate I (g)					
1	0.19	0.81	0.05	0.02	0.02
2	0.20	1.14	0.07	0.03	0.04
3	0.17	1.52	0.08	0.04	0.05
4	0.08	0.98	0.05	0.03	0.03
5	0.05	1.02	0.05	0.03	0.03
Condensate II (g)					
1	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก3 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่มีความเข้มข้น 30 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	6.79	18.96	1.63	4.92	3.53
1	4.89	17.16	1.40	4.86	3.42
2	4.60	17.02	1.40	4.77	3.36
3	3.50	16.86	1.50	4.69	3.29
4	3.23	16.80	1.46	4.87	2.92
5	2.27	15.48	1.11	4.40	2.87
Condensate I (g)					
1	0.01	0.42	0.00	0.01	0.00
2	0.00	0.78	0.01	0.01	0.01
3	0.00	0.90	0.00	0.01	0.01
4	0.01	1.21	0.01	0.01	0.01
5	0.01	1.23	0.01	0.02	0.01
Condensate II (g)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก4 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่มีความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	2.96	5.62	1.10	2.74	3.41
1	2.56	5.45	0.94	2.67	3.35
2	2.17	5.18	0.89	2.59	3.32
3	2.00	4.68	0.88	2.55	3.29
4	1.90	4.64	0.87	2.45	2.98
5	1.76	4.66	0.89	2.41	2.90
Condensate I (g)					
1	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00
2	0.03	0.07	0.01	0.00	0.00
3	0.02	0.06	0.01	0.00	0.00
4	0.02	0.06	0.01	0.00	0.00
5	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00
Condensate II (g)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก5 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	5.45	8.30	5.63	3.42	3.59
1	1.71	4.44	2.78	3.19	3.56
2	1.67	3.45	2.60	3.26	3.53
3	1.59	3.44	2.44	2.89	3.36
4	1.45	3.38	2.36	2.90	3.24
5	1.35	3.08	2.28	2.98	3.19
Condensate I (g)					
1	0.03	0.10	0.06	0.01	0.01
2	0.02	0.08	0.04	0.01	0.01
3	0.02	0.08	0.05	0.01	0.01
4	0.02	0.10	0.06	0.01	0.01
5	0.02	0.08	0.04	0.01	0.01
Condensate II (g)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก6 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	5.50	17.57	1.39	4.23	5.16
1	2.56	11.81	1.01	4.01	5.27
2	1.72	10.73	0.95	3.90	5.10
3	1.35	10.44	0.95	4.05	5.26
4	1.35	10.42	1.05	3.80	4.91
5	0.53	8.21	0.79	3.77	4.96
Condensate I (g)					
1	0.19	0.81	0.05	0.02	0.02
2	0.20	1.14	0.07	0.03	0.04
3	0.17	1.52	0.08	0.04	0.05
4	0.08	0.98	0.05	0.03	0.03
5	0.05	1.02	0.05	0.03	0.03
Condensate II (g)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก7 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 20\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	5.38	13.09	1.39	3.00	5.92
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2.92	12.01	0.62	2.53	4.95
Condensate I (g)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.05	0.16	0.01	0.00	0.00
Condensate II (g)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก8 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 20\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	5.44	13.28	1.33	3.11	5.98
1	5.23	13.02	1.26	2.29	5.44
2	4.22	9.38	1.16	1.74	4.97
3	3.59	9.15	0.83	1.70	4.66
4	2.97	8.63	0.81	1.58	4.05
5	2.88	8.48	0.63	1.42	3.85
Condensate I (g)					
1	0.08	0.14	0.01	0.00	0.00
2	0.03	0.13	0.00	0.00	0.00
3	0.02	0.10	0.00	0.00	0.00
4	0.02	0.08	0.00	0.00	0.00
5	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00
Condensate II (g)					
1	0.16	0.00	0.00	0.00	0.07
2	0.02	0.00	0.00	0.00	0.07
3	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
5	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07

ตาราง ก9 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 20\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	5.34	13.08	1.31	3.16	6.01
1	4.70	12.74	1.17	2.93	5.91
2	4.52	10.04	0.97	2.82	5.75
3	3.63	9.67	0.87	2.28	4.72
4	2.46	9.25	0.75	1.78	4.45
5	1.68	7.11	0.72	1.60	3.68
Condensate I (g)					
1	0.28	1.00	0.04	0.00	0.03
2	0.24	1.44	0.06	0.00	0.04
3	0.16	0.91	0.04	0.00	0.04
4	0.10	0.75	0.03	0.00	0.02
5	0.08	0.74	0.04	0.00	0.03
Condensate II (g)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก10 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่มีความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 40\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	5.08	13.54	1.39	3.10	6.15
1	4.24	11.96	1.07	3.04	5.94
2	3.54	9.65	0.92	2.98	5.72
3	2.49	9.09	0.82	2.47	5.01
4	2.23	8.80	0.72	1.97	4.66
5	1.59	6.86	0.71	1.83	4.52
Condensate I (g)					
1	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00
2	0.02	0.13	0.01	0.00	0.00
3	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Condensate II (g)					
1	0.29	0.71	0.05	0.00	0.00
2	0.30	0.99	0.06	0.00	0.03
3	0.26	1.12	0.07	0.00	0.04
4	0.31	0.61	0.03	0.00	0.02
5	0.06	0.41	0.02	0.00	0.02

ตาราง ก11 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Stripper, Condensate I และ Condensate II จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่มีความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 60\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Stripper (g/L)					
0	5.26	13.39	1.37	3.14	5.99
1	4.00	11.86	1.10	2.72	5.62
2	3.85	11.57	1.01	2.51	4.96
3	3.42	10.37	0.94	2.38	4.59
4	2.33	8.26	0.72	1.86	3.90
5	1.62	7.93	0.70	1.79	3.58
Condensate I (g)					
1	0.03	0.07	0.00	0.00	0.01
2	0.03	0.15	0.01	0.00	0.01
3	0.02	0.12	0.00	0.00	0.01
4	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01
5	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01
Condensate II (g)					
1	0.30	0.74	0.05	0.00	0.00
2	0.04	0.11	0.01	0.00	0.00
3	0.02	0.09	0.00	0.00	0.00
4	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก12 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ที่ความเข้มข้น 5 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
	Impinger (g)				
1	0.20	0.15	0.01	0.04	0.03
2	0.15	0.27	0.02	0.04	0.03
3	0.09	0.23	0.02	0.04	0.03
4	0.06	0.18	0.02	0.04	0.03
5	0.03	0.17	0.01	0.04	0.03

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก13 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
	Impinger (g)				
1	0.87	0.54	0.06	0.08	0.07
2	0.51	0.69	0.06	0.08	0.07
3	0.35	0.78	0.07	0.08	0.07
4	0.21	0.71	0.06	0.08	0.07
5	0.15	0.85	0.06	0.08	0.07

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก14 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ที่ความเข้มข้น 30 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Impinger (g)					
1	0.08	0.05	0.01	0.03	0.02
2	0.07	0.06	0.01	0.03	0.02
3	0.04	0.05	0.00	0.03	0.02
4	0.04	0.05	0.01	0.03	0.02
5	0.03	0.06	0.01	0.03	0.02

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก15 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊ส ที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Impinger (g)					
1	0.08	0.05	0.01	0.03	0.02
2	0.07	0.06	0.01	0.03	0.02
3	0.04	0.05	0.00	0.03	0.02
4	0.04	0.05	0.01	0.03	0.02
5	0.03	0.06	0.01	0.03	0.02

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก16 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
	Impinger (g)				
1	0.21	0.13	0.09	0.04	0.04
2	0.21	0.14	0.09	0.04	0.03
3	0.17	0.15	0.08	0.04	0.03
4	0.13	0.12	0.08	0.04	0.03
5	0.10	0.14	0.07	0.04	0.03

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก17 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Impinger (g)					
1	0.87	0.54	0.06	0.08	0.07
2	0.51	0.69	0.06	0.08	0.07
3	0.35	0.78	0.07	0.08	0.07
4	0.21	0.71	0.06	0.08	0.07
5	0.15	0.85	0.06	0.08	0.07

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก18 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 20\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
	Impinger (g)				
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก19 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 20\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
	Impinger (g)				
1	0.16	0.00	0.00	0.00	0.07
2	0.02	0.00	0.00	0.00	0.07
3	0.01	0.00	0.00	0.00	0.07
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
5	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก20 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 20\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
	Impinger (g)				
1	0.47	0.03	0.03	0.00	0.07
2	0.47	0.03	0.03	0.00	0.07
3	0.35	0.02	0.04	0.00	0.07
4	0.24	0.02	0.03	0.00	0.07
5	0.23	0.02	0.03	0.00	0.07

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก21 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 40\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Impinger (g)					
1	0.58	0.03	0.03	0.00	0.07
2	0.55	0.03	0.03	0.00	0.07
3	0.38	0.03	0.04	0.00	0.07
4	0.26	0.02	0.03	0.00	0.07
5	0.25	0.02	0.03	0.00	0.07

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก22 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ใน Impinger จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น ABE 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม ($H_2 = 60\%$)

Time (h)	Concentration				
	Acetone	Butanol	Ethanol	Acetic acid	Butyric acid
Impinger (g)					
1	0.46	0.03	0.03	0.00	0.07
2	0.46	0.03	0.03	0.00	0.07
3	0.31	0.02	0.03	0.00	0.07
4	0.23	0.02	0.03	0.00	0.07
5	0.22	0.02	0.03	0.00	0.07

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก23 ค่าร้อยละในการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทริก จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น ABE 5, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Organic compound	% Removal of ABE concentration (%)		
	5 g/L	20 g/L	30 g/L
Acetone	92.94	90.33	5.25
Ethanol	77.86	53.30	1.83
Butanol	91.35	43.51	0.83
Acetic acid	38.74	10.72	1.05
Butyric acid	38.02	3.93	1.87
Average	67.78	40.36	2.17

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก24 ค่าร้อยละในการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทริก จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น ABE 20 g/L ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Organic compound	% Removal of flow rate (%)		
	1 L/min	2 L/min	3 L/min
Acetone	40.61	75.18	90.33
Ethanol	16.95	59.29	53.30
Butanol	19.56	50.62	43.51
Acetic acid	11.94	12.76	10.72
Butyric acid	14.78	11.14	3.93
Average	20.77	41.80	40.36

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก25 ค่าร้อยละในการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทริก จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น ABE 20 g/L ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม (H=20%)

Organic compound	% Removal of flow rate (%)		
	1 L/min	2 L/min	3 L/min
Acetone	45.64	47.01	68.48
Ethanol	8.22	36.16	45.65
Butanol	55.78	52.54	45.23
Acetic acid	15.77	54.22	49.27
Butyric aid	16.51	35.64	38.82
Average	28.39	45.11	49.49

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก26 ค่าร้อยละในการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทีริก จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น ABE 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยเปรียบเทียบชนิดแก๊ส (100%N₂, 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂)

Organic compound	% Removal of gas type (%)			
	100%N ₂	20%	40%	60%
Acetone	90.33	68.48	68.64	69.23
Ethanol	53.30	45.65	49.34	40.79
Butanol	43.51	45.23	48.70	48.89
Acetic acid	10.72	49.27	40.97	42.93
Butyric acid	3.93	38.82	26.44	40.20
Average	40.36	49.49	46.82	48.41

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก27 ประสิทธิภาพการควบแน่นของแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และ กรดบิวทริก จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น ABE 5, 20 และ 30 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Organic compound	% Removal of ABE concentration (%)		
	5 g/L	20 g/L	30 g/L
Acetone	4.81	7.10	0.40
Ethanol	17.94	35.68	65.18
Butanol	13.31	26.83	16.04
Acetic acid	2.38	17.63	5.42
Butyric acid	1.79	42.54	3.74
Average	8.04	25.96	18.16

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก28 ประสิทธิภาพการควบแน่นของแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และ กรดบิวทริก จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น ABE 20 g/L ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สไนโตรเจน

Organic compound	% Removal of flow rate (%)		
	1 L/min	2 L/min	3 L/min
Acetone	4.43	1.43	7.10
Ethanol	14.57	4.46	35.68
Butanol	9.19	4.36	26.83
Acetic acid	2.43	4.42	17.63
Butyric acid	1.50	4.41	42.54
Average	6.42	3.82	25.96

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก29 ประสิทธิภาพการควบแน่นของแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และ กรดบิวทริก จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น ABE 20 g/L ที่อัตราการไหล 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที โดยแก๊สผสม (H=20%)

Organic compound	% Removal of flow rate (%)		
	1 L/min	2 L/min	3 L/min
Acetone	1.10	3.04	11.90
Ethanol	7.20	5.40	40.50
Butanol	0.76	1.49	17.08
Acetic acid	0.00	0.00	0.01
Butyric aid	0.17	0.29	3.39
Average	1.85	2.04	14.58

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ตาราง ก30 ค่าร้อยละในการแยกแอสีโตน บิวทานอล เอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทริก จากกระบวนการการเป่าไล่ด้วยแก๊สที่ความเข้มข้น ABE 20 g/L ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยเปรียบเทียบชนิดแก๊ส (100%N₂, 20%H₂, 40%H₂ และ 60%H₂)

Organic compound	% Removal of gas type (%)			
	100%N ₂	20%	40%	60%
Acetone	7.10	11.90	18.29	6.18
Ethanol	35.68	40.50	30.72	12.60
Butanol	26.83	17.08	17.81	5.85
Acetic acid	17.63	0.01	0.02	0.00
Butyric acid	42.54	3.39	3.76	1.47
Average	25.96	14.58	14.12	5.22

Prince of Songkla University
Pattani Campus

