

การประยุกต์ใช้กระบวนการไมโครฟิวเตชัน เพื่อเพิ่มผลผลิตในกระบวนการหมัก อะซิโตนบิวทานอลแบบต่อเนื่อง

เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และ จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

กระบวนการหมักบิวทานอลแบบครั้งคราว (batch) โดยใช้เชื้อ *Clostridium acetobutylicum* ATCC824 ที่อุณหภูมิ 35°C $\text{pH}=4.5-4.8$ ใช้มันสำปะหลังสดเป็นวัตถุดิบ ที่ค่าน้ำตาลเริ่มต้น 50 กรัม/ลิตร ใช้เวลาประมาณ 72 ชั่วโมงให้บิวทานอลสูงสุด (11.1-11.3 กรัมต่อลิตร) การเพิ่มผลผลิตสามารถทำได้โดยการพัฒนากระบวนการผลิตจากการทดลองหมักอะซิโตน-บิวทานอล โดยใช้น้ำตาลจากการย่อยสลายมันสำปะหลัง กระบวนการหมักแบบต่อเนื่องที่มีการเวียนกลับของเซลล์ (continuous with cell recycling) สามารถให้อัตราการผลิตมากกว่า 28 เท่าของแบบครั้งคราวพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องที่มีการเวียนกลับของเซลล์คือที่ความเข้มข้นน้ำตาล 52 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเจือจาง 0.4 ชม^{-1} โดยจะให้อัตราผลผลิตตัวทำละลายรวม 6.94 กรัมต่อลิตร-ชม ที่ความเข้มข้นตัวทำละลายรวม 17.36 กรัมต่อลิตร ประกอบด้วยบิวทานอล 9.89 กรัมต่อลิตร โดยค่าการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นตัวทำละลายรวม 36%

Application of Microfiltration for Improved Productivity in Continuous Acetone-Butanol Fermentation

Muenduen Phisalaphong and Chirakarn Muangnapoh
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Abstract

The maximum of butanol concentration (11.1-11.3 g/L) was obtained after 72 hours of batch fermentation of *Clostridium acetobutylicum* (ATCC824) at 35 °C, pH=4.5-4.8 using tapioca at 50 g/L sugar concentration as a raw material. The solvent productivity can be then increased considerably by improved process strategies. From continuous with cell recycling fermentation using enzyme hydrolysate of tapioca as a raw material, the productivity was 28 times higher than that of the batch process. The maximal solvent productivity (6.94 g/Lhr⁻¹) was achieved from the continuous with cell recycling process at 52 g/L feeding glucose concentration and a dilution rate of 0.4 hr⁻¹. The total solvent concentration was 17.36 g/L (with 9.89 g/L butanol) and the total solvent conversion yield was 0.36.

บทนำ

น้ำมันปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในปริมาณจำกัด จากสภาวะการขาดแคลนและราคาที่ไม่แน่นอนของน้ำมันปิโตรเลียม จึงได้มีการแสวงหาพลังงานในรูปแบบอื่นเพื่อนำมาใช้ทดแทนหรือช่วยลดปริมาณการใช้้ำมันปิโตรเลียมลง บิวทานอลเป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่ผลิตได้จากกระบวนการหมัก โดยใช้วัตถุดิบทางเกษตรกรรมในประเทศ เมื่อใช้เป็นสารผสมกับน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลในอัตราส่วน 10-50% จะใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมได้ดีในเครื่องยนต์สันดาปภายใน[3] ทั้งในเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล[1,2] ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาป ทั้งยังไม่ก่อให้เกิดปัญหาการแยกชั้นแบบที่พบในกรณีใช้เชื้อเพลิงผสมเอทานอล เนื่องจากบิวทานอล

สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำมันเบนซินและดีเซล นอกจากนี้บิวทานอลยังถูกใช้เป็นสารตั้งต้นและสารละลายในอุตสาหกรรมหลายชนิด

ปัญหาการผลิตบิวทานอลจากกระบวนการหมักแบบดั้งเดิมที่สำคัญคือ เปอร์เซนต์การเปลี่ยนน้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์ และความเข้มข้นรวมของตัวทำละลายที่ได้ (acetone-butanol-ethanol) ก่อนข้างต่ำคือประมาณ 30% conversion และ 20 กรัม/ลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้กระบวนการหมักแบบดั้งเดิมเป็นแบบครั้งคราว (batch) ให้ผลผลิตที่ต่ำ งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนากระบวนการหมักอะซิโตน-บิวทานอลจากมันสำปะหลังให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยประยุกต์ใช้กระบวนการไมโครฟิวเดชันในการเวียนกลับเซลล์เพื่อให้สามารถทำการหมักแบบต่อเนื่องที่ความเข้มข้นของเซลล์ในระบบสูงได้

ทฤษฎีและหลักการ

การพัฒนากระบวนการหมักเป็นแบบต่อเนื่อง สามารถเพิ่มผลผลิตเมื่อเทียบกับแบบครั้งคราว Yaruvenko V.L [13] ได้ทำการหมักแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังหมัก 11 ถัง วางต่อกันเป็นชุดลดหลั่นกันพบว่า อัตราผลผลิตของตัวทำละลายรวมเพิ่มขึ้น 20% และสามารถปฏิบัติการได้ 90 ชั่วโมง อย่างไรก็ดี กระบวนการนี้มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนมาก จีรกันต์ เมืองนาโพธิ์ และคณะ[14] ได้ศึกษาการเพิ่มผลผลิตตัวทำละลายโดยการหมักแบบต่อเนื่องซึ่งใช้น้ำตาลจากการย่อยสลายมันสำปะหลังพบว่า สามารถเพิ่มอัตราผลผลิตได้มากกว่าการหมักแบบไม่ต่อเนื่องประมาณ 2.2 เท่า

การนำเทคนิคการกรองระดับอนุภาคมาใช้ร่วมกับกระบวนการหมัก ทำให้สามารถแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำหมัก และหมุนเวียนจุลินทรีย์นำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีก กระบวนการนี้จะช่วยทำให้อัตราผลผลิตตัวทำละลายเพิ่มขึ้น สามารถปฏิบัติการที่อัตราการเจือจาง (dilution rate) สูงกว่าอัตราการเจริญจำเพาะ (specific growth rate) Minier M. และคณะ[17] ได้ศึกษาผลของการหมักโดยใช้เทคนิคการกรองระดับอนุภาคร่วมกับถังหมักพบว่าสามารถเพิ่มอัตราผลผลิตตัวทำละลายได้ถึง 1.2 กรัม/ลิตร-ชม Phisalaphong, M. and Muangnapoh, C.[18] ได้ศึกษาผลของการหมักน้ำตาลกลูโคสจากสารละลายสังเคราะห์เพื่อผลิตตัวทำละลาย โดยใช้เทคนิคการกรองระดับอนุภาคพบว่าสามารถเพิ่มอัตราผลผลิตได้สูงกว่าการหมักแบบไม่ต่อเนื่องประมาณ 10 เท่า สติดา ไกรลาศ, เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และจีรกันต์ เมืองนาโพธิ์[19] ได้ศึกษาการเพิ่มอัตราผลผลิตตัวทำละลาย โดยใช้เทคนิคการกรองระดับอนุภาคร่วมกับการหมักแบบต่อเนื่อง

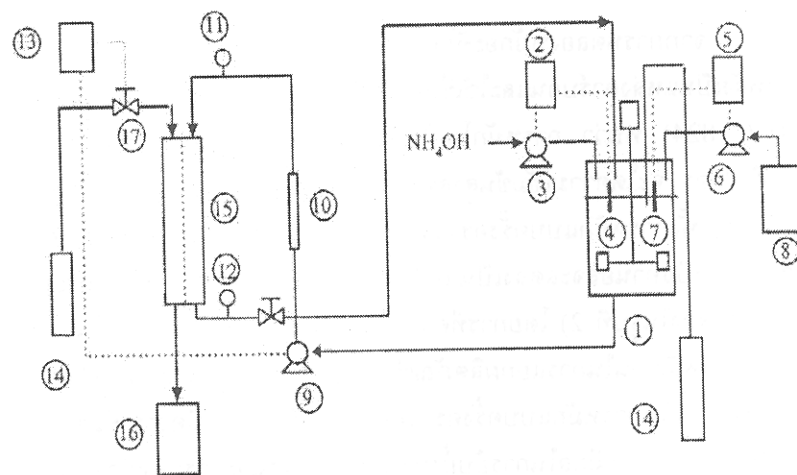
แบบสองขั้นตอนพบว่าอัตราการผลิตตัวทำละลายสูงสุดมีค่า 5.6 กรัม/ลิตร-ชม. โดยมีความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์เป็น 80 กรัม/ลิตร

วิธีการดำเนินการวิจัย

ศึกษากระบวนการผลิตที่เหมาะสมในกระบวนการหมักบิวทานอล โดยใช้เชื้อ *Clostridium acetobutylicum* ATCC824 ที่อุณหภูมิ 35°C $\text{pH} = 4.5-4.8$ ใช้น้ำตาลจากการย่อยสลายมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ ดำเนินการหมักในระบบต่อเนื่องที่มีกระบวนการเวียนกลับของเซลล์ โดยประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. ใช้ไอน้ำทำการปลอดเชื้ออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบการหมักแบบต่อเนื่อง และระบบไมโครฟิลเตรชันโดยการพ่นไอน้ำอิ่มตัวที่ 100°C โดยตรง แต่ละส่วนใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 30 นาที
2. เตรียมสารอาหารที่ใช้สำหรับการป้อนแบบต่อเนื่องในถัง 15 ลิตร ทำให้อปลอดเชื้อในหม้อนี้ 121°C เป็นเวลา 15 นาที[18] การเตรียมสารอาหารที่ใช้มันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน สำหรับระบบที่ใช้ไมโครฟิลเตรชันมีความจำเป็นต้องย่อยหัวมันสำปะหลังให้เป็นกลูโคสก่อน โดยใช้วิธีการย่อยสลายน้ำแป้งที่เตรียมจากหัวมันสำปะหลังสด ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (Termamyl 120L) และอะไมโลกลูโคซิเดส (AMG 300L) ทำการกรองกากที่เหลือโดยการกรองผ่านผ้ากรองหยาบ และเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm อีกครั้งเพื่อแยกอนุภาคละเอียดออก
3. ป้อนสารอาหารลงในถังหมัก 2 ลิตร เต็มกล้าเชื้อจำนวน 200 มล. ผ่าน N_2 นาน 10 นาที ทำการหมักโดยควบคุมอัตราการกวนที่ 100 rpm อุณหภูมิ 35°C $\text{pH} \leq 4.8$ ด้วย $4\text{N NH}_4\text{OH}$
4. เก็บตัวอย่างทุก 4 ชั่วโมง เมื่อน้ำตาลลดลงเหลือ 10 กรัม/ลิตร เริ่มป้อนสารอาหารที่เตรียมไว้แบบต่อเนื่องด้วยปั๊มแบบรีดที่ควบคุมระดับ น้ำหมักจะถูกปั๊มผ่านระบบไมโครฟิลเตรชัน โดยของเหลวจะไหลผ่านท่อกลวงในแท่งเซรามิกในทิศทางการไหลตั้งฉากการกรอง ส่วนเพอร์มิเอทจะถูกปล่อยออกไปยังถังเก็บ โดยอัตราการปล่อยออกของเพอร์มิเอทจะถูกควบคุมด้วยวาล์วทางออก ส่วนคอนเซนเตรทประกอบด้วยเซลล์ที่มีความเข้มข้นสูงในสารละลายจะหมุนเวียนเข้าถังหมักดังแสดงในรูปที่ 1

การดำเนินการจะเริ่มดำเนินการที่ความเข้มข้นน้ำตาล 41 กรัม/ลิตร ที่อัตราการเจือจาง 0.4 ชม.⁻¹ ความเข้มข้นน้ำตาล 52 กรัม/ลิตร ที่อัตราการเจือจาง 0.2 ชม.⁻¹ และความเข้มข้นน้ำตาล 52 กรัม/ลิตร ที่อัตราการเจือจาง 0.4 ชม.⁻¹ ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นหรืออัตราการเจือจางแต่ละครั้ง เป็นการเพิ่มอัตราการป้อนน้ำตาลให้เพียงพอกับอัตราการใช้น้ำตาลของเซลล์ในระบบไม่ให้ปริมาณน้ำตาลที่เหลือในระบบต่ำกว่า 5 กรัม/ลิตร การควบคุมความเข้มข้นของจุลินทรีย์ ในช่วงท้ายเมื่อได้ความเข้มข้นที่ต้องการ จะปั้มน้ำหมักในถังหมักออกด้วยอัตราที่เหมาะสมเพื่อให้ความเข้มข้นเซลล์ในระบบคงที่



รูปที่ 1 ถังหมักแบบต่อเนื่องแบบมีการเวียนกลับเซลล์

- | | | |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1. Fermenter | 2. pH controller | 3. Alkali feed pump |
| 4. pH sensor | 5. Level controller | 6. Feed pump |
| 7. Level sensor | 8. Feed tank | 9. Recirculation pump |
| 10. Flow meter | 11. Inlet pressure guage | 12. Outlet pressure guage |
| 13. Control block | 14. N ₂ storage tank | 15. Microfiltration module |
| 16. Storage tank | 17. Control valve | |

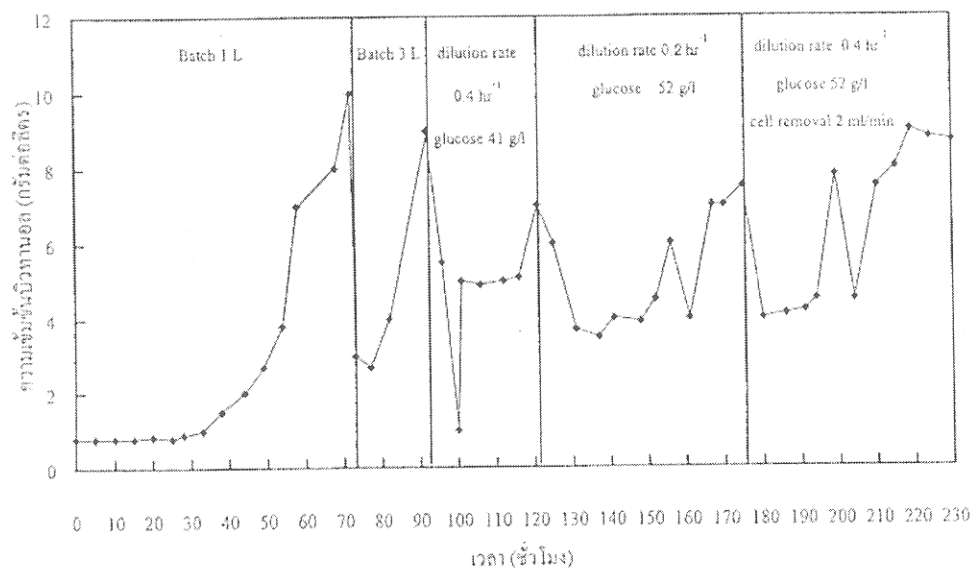
5. ระบบไมโครฟิลเตรชันที่ใช้จะเป็นแท่งกรองเซรามิกประกอบด้วย ท่อ กลวง 16 ท่อ ภายในเคลือบผิวด้วยเซรามิก ขนาดท่อกลวงเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. ยาว 85 ซม. มีพื้นที่ผิวกรอง 0.2030 ม² และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร (แบบ 1M-1 บริษัท Membralox)
6. ทำการวิเคราะห์ปริมาณตัวทำละลาย และกรดด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี วิเคราะห์ปริมาณกลูโคสด้วยเครื่องวิเคราะห์กลูโคส วิเคราะห์ปริมาณเซลล์ด้วยการหาน้ำหนักแห้งและวัดค่าความขุ่นที่ 620 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ผลการทดลอง

จากการทดลองหมักอะซิโตน-บิวทานอล โดยใช้น้ำตาลจากการย่อยสลายมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้เชื้อจุลินทรีย์ *Clostridium acetobutylicum* (ATCC 824) พบว่า การหมักโดยใช้น้ำตาลเริ่มต้นในสายป้อนใกล้เคียงกันที่ประมาณ 50 กรัม/ลิตร จะได้ความเข้มข้นสูงสุดของบิวทานอลในน้ำหมักค่อนข้างคงที่ (9.9-10.0 กรัม/ลิตร) ทั้งการหมักแบบครั้งคราวและแบบต่อเนื่องที่มีการเวียนกลับเซลล์ ความเข้มข้นสูงสุดของบิวทานอลจะลดลงเป็น 6.7 กรัม/ลิตร ถ้าใช้น้ำตาลเริ่มต้น ประมาณ 40 กรัม/ลิตร (ดังแสดงในรูปที่ 2) โดยการที่ความเข้มข้นผลิตภัณฑ์สารละลายในน้ำหมักต่ำจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการแยกผลิตภัณฑ์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา[14,18] ความเข้มข้นน้ำตาลที่เหมาะสมในการหมักแบบครั้งคราวคือ 50 กรัม/ลิตร ที่ความเข้มข้นน้ำตาลสูงเกินไป (60 กรัม/ลิตร) จะมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตและการผลิตบิวทานอลของเซลล์

ในการหาอัตราการเจือจางที่เหมาะสมที่ความเข้มข้นน้ำตาลในสายป้อน 52 กรัม/ลิตร ทำการทดลองเพิ่มอัตราการเจือจางเริ่มจาก 0.2 ต่อชั่วโมง พบว่า ที่อัตราการเจือจางเพิ่มขึ้นเป็น 0.4 ต่อชั่วโมงหลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ จะเหลือน้ำตาลในระบบ 6-7 กรัม/ลิตร ได้ความเข้มข้นสารละลายรวม 17.35 กรัม/ลิตร (บิวทานอล 9.89 กรัม/ลิตร) ที่ความเข้มข้นของเซลล์ 198 ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ระดับสูงสุดของการดำเนินการในระบบนี้ กระบวนการเวียนกลับเซลล์ในการทดลองนี้สามารถดำเนินการได้ที่มีความเข้มข้นของเซลล์ *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 ไม่เกิน 200 กรัม/ลิตร โดยที่ความเข้มข้นของเซลล์สูงเกิน 200 กรัม/ลิตร จะทำให้เกิดปัญหาอุดตันของท่อกรองและทำให้ฟลักซ์ที่ได้ต่ำเกินไป เนื่องจากความเข้มข้นของเซลล์ในกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องที่มีการเวียนกลับเซลล์มากกว่า 40 เท่าของการหมักแบบครั้งคราว จึงเป็นผลให้

อัตราการผลิตบิวทานอลจากการหมักเพิ่มเป็น 6.94 กรัม/ลิตร-ชม หรือประมาณ 28 เท่าของการหมักแบบครั้งคราว จากงานวิจัยที่ผ่านมา[18] สำหรับในสถานะที่น้ำตาลพอเพียงแล้ว การเพิ่มอัตราการเจือจางมากขึ้นอีกโดยไม่เพิ่มความเข้มข้นเซลล์จะไม่เพิ่มอัตราการผลิตบิวทานอลแต่จะเหลือน้ำตาลในระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่อัตราเจือจางที่ 0.4 ต่อชั่วโมงจึงเป็นค่าที่เหมาะสมของการดำเนินการที่ความเข้มข้นน้ำตาลในสายป้อน 52 กรัม/ลิตร สำหรับปริมาณเซลล์ อัตราการใช้น้ำตาล อัตราการผลิตผลิตภัณฑ์ และความเข้มข้นของสารละลายจากการหมักแบบต่างๆ สามารถสรุปผลได้ดังใน ตารางที่ 1 โดยอัตราการใช้น้ำตาลจะเพิ่มจาก 0.69 กรัม/ลิตร-ชม เป็น 14.20 และ 17.33 กรัม/ลิตร-ชม. จากการหมักแบบครั้งคราวเป็นแบบต่อเนื่องที่มีการเวียนกลับเซลล์ที่น้ำตาลในสายป้อน 41 และ 52 กรัม/ลิตร ตามลำดับ สอดคล้องกับการเพิ่มของอัตราผลผลิตจาก 0.24 เป็น 4.80 และ 6.94 กรัม/ลิตร-ชม. โดยมีค่าการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นตัวทำละลาย (solvent production yield) คงที่ คือในช่วง 0.34-0.36



รูปที่ 2 ความเข้มข้นของบิวทานอลที่เวลาต่าง ๆ ในระบบที่มีกระบวนการเวียนกลับเซลล์
ที่ความเข้มข้นของกลูโคสในสายป้อนเป็น 41 และ 52 กรัม/ลิตร

ตารางที่ 1

สรุปผลการผลิตบิวทานอลโดยกระบวนการหมักแบบแบบไม่ต่อเนื่องและต่อเนื่องที่มีการเวียนกลับของเซลล์โดยใช้มันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้จุลินทรีย์ ATCC 824

ความเข้มข้นน้ำตาลในสายป้อน (g/L)	อัตรา การเจือจาง (hr ⁻¹)	ความเข้มข้นของ เซลล์ (g/L)	ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในระบบ (g/L)	อัตราผลผลิต (g/L-hr)	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)	อัตราการใช้น้ำตาล (g/L-hr)	การเปลี่ยนน้ำตาลเป็นตัวทำละลาย
				solvent butanol	solvent butanol		
52.00	batch	3.50	3.50	0.24 0.14	17.00 10.00	0.69	0.35
41.00	0.40	34.0	4.50	4.80 2.68	12.01 6.70	14.20	0.34
52.00	0.40	198.0	6.70	6.94 3.96	17.35 9.89	17.33	0.36

สรุปและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตบิวทานอล จากการหมัก โดยใช้วัตถุดิบจากทางการเกษตรคือ มันสำปะหลังสดเนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีมากในประเทศและมีราคาถูก ในการทดลองหมักอะซิโตนบิวทานอลแบบต่อเนื่องที่มีการเวียนกลับของเซลล์ โดยใช้สารละลายจากการย่อยมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนใช้จุลินทรีย์ *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 และใช้ท่อกลวงแท่งเซรามิกกรองแยกเซลล์เพื่อเวียนกลับพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราความเข้มข้นน้ำตาล 52 กรัมต่อลิตร อัตราการเจือจาง 0.4 ชม⁻¹ จะให้อัตราการผลิตตัวทำละลายรวม 6.94 กรัมต่อลิตร-ชม อัตราการผลิตบิวทานอล 3.96 กรัมต่อลิตร-ชม. ที่ความเข้มข้นตัวทำละลายรวม 17.36 กรัมต่อลิตร ประกอบด้วย บิวทานอล อะซิโตน และเอทานอล 9.89 6.94 และ 0.50 กรัม/ลิตรตามลำดับ โดยค่าการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นตัวทำละลายรวม 36% การดำเนินการสามารถควบคุมความเข้มข้นของเซลล์ในกระบวนการหมัก โดยการปั้มน้ำในถังหมัก (ที่มีเซลล์เข้มข้น) ออกที่อัตรา 2 มิลลิลิตร/นาที่ จากการประเมินราคาในการผลิตบิวทานอลแบบคร่าวๆ โดยคิดจากกระบวนการผลิตที่มีกำลังการผลิตที่ใช้มันสำปะหลัง 3,300 ตันต่อปี ได้ราคาผลิตประมาณ 56.3 บาทต่อลิตร (31.7 บาทต่อปอนด์)[3] จากการพิจารณาโดยรวมจะพบว่าราคาบิวทานอลจากกระบวนการหมักข้างต้นยังสูง เมื่อเทียบกับราคาบิวทานอลจากกระบวนการทางปิโตรเคมี 24.75 บาทต่อปอนด์ (1.21 US\$/kg chemical marketing

Reporter, 2001)[22] การที่ราคาบิวทานอลค่อนข้างสูงทำให้ยังไม่คุ้มค่าในการนำบิวทานอลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ ทั้งที่บิวทานอลสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมได้ดีทั้งในน้ำมันเบนซินและดีเซล

อย่างไรก็ตาม จุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นจุลินทรีย์ที่มียังมีประสิทธิภาพในการหมักไม่สูงนักและขนาดกำลังการผลิตที่ใช้ในการประเมินราคาค่อนข้างต่ำ จากรายงานในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพในการหมักสูงขึ้น จากรายงานของ MBI International การหมักบิวทานอลจากแป้งข้าวโพดโดยเชื้อ *Clostridium acetobutylicum* ที่มีการปรับปรุงสายพันธุ์โดยการผ่าเหล่า (U.S. Patent# 5,192,673) ใช้กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง 2 ขั้นตอนต่อด้วยการหมักแบบไม่ต่อเนื่องโดยระยะเวลาทั้งหมดในการหมัก 48-72 ชั่วโมงได้สารละลายเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร (บิวทานอล 20 กรัมต่อลิตร) และใช้กระบวนการเพอร์เวปอเรชัน (pervaporation) ร่วมในการแยกผลิตภัณฑ์ ประเมินราคาต้นทุนการผลิตบิวทานอลที่ 25-304 cents/ปอนด์ หรือ 11.25-136.80 บาทต่อปอนด์ (ขึ้นกับขนาดกำลังการผลิตและราคาวัตถุดิบ)(www.ilcorn.org/reports/97011102) รายงานจาก Qureshi N. และ Blaschek, HP.[21] ราคาบิวทานอลจากกระบวนการหมักแบบครั้งคราวโดยใช้วัตถุดิบจากข้าวโพด, ใช้จุลินทรีย์ที่ถูกพัฒนาสายพันธุ์ *Clostridium beijerinckii* BA 101 และแยกผลิตภัณฑ์ด้วยการกลั่นที่กำลังการผลิต 153,000 ตันของอะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล ราคาต้นทุนบิวทานอลจะอยู่ระหว่าง 7.00-21.88 บาทต่อปอนด์ (0.34-1.07 US\$/kg) จุดที่น่าสนใจอีกจุดหนึ่งในกระบวนการหมักนี้คือ การที่จุลินทรีย์ *Clostridium acetobutylicum* สามารถใช้น้ำตาล pentose เช่น xylose arabinose ในการหมักได้ดีพอๆ กับ น้ำตาล hexose (glucose and fructose) ทำให้เชื้อนี้ สามารถใช้ทั้ง hexose และ pentose จากการย่อยสลาย สารประเภทเซลลูโลสจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จากความพยายามในการพัฒนาทั้งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการหมัก และกระบวนการแยก ตลอดจนความพยายามที่จะลดต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่การผลิตอะซิโตน-บิวทานอล โดยกระบวนการหมักจะคุ้มค่าทางเศรษฐกิจในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย สำนักงานพืชไร่ จ.ระยอง ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสนับสนุนสำปะหลัง และคณะนิสิตปริญญาโท

ประจำห้องวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมี
ส่วนช่วยในการพิมพ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] โกวิท ศตวุฒิ และอิทธิพล ปานงาม การวิจัยเพื่อนำแอลกอฮอล์หนักมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ทูลส่งเสริมการวิจัยของงบประมาณแผ่นดิน 1984.
- [2] เบญจ ภมรสุต และคณะ โครงการวิจัยเติมสารเสริมในแอลกอฮอล์เพื่อใช้แทนน้ำมันดีเซล สภาวิจัยแห่งชาติ 1985.
- [3] จิรกันต์ เมืองนาโพธิ์ เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และ พูลพร แสงบางปลา รายงานโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต n-butanol จากวัสดุทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ทูลอุดหนุนการวิจัยพัฒนาและวิศวกรรม จากศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ 2544.
- [4] Beesch, S.C., Acetone-butanol Fermentation of Sugar, Ind. Eng. Chem., 44, 1985, 1677-1682.
- [5] Saddler, J.N., Yu E.K.C., Mes-Hartree, M., Levitin n. and Brownell H.N, Utilization of enzymatically hydrolyzed wood hemicellulose by microorganisms for production of liquid fuels. App. Environ. Microbiol., 45, 1983, 153-160.
- [6] Gottschal, J.C. and Morris, J.C., Non Production of acetone and butanol by *Clostridium acetobutylicum* during glucose and ammonia limitation in continuous culture. Biotechnol. Lett., 3, 1981, 523-530.
- [7] Bahl, H., Andersch, W. and Gottschalk, G., Continuous production of acetone and butanol by *Clostridium acetobutylicum* in a two-stage phosphate limited chemostat, European J. Appl. Microbiol Biotechnol., 15, 1982, 201-205.
- [8] Prescott, S.C. and Dunn, C.G., Industrial microbiology, 3 rd. ed., New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1959, 250-284.
- [9] Monot, F., Martin, J.R., Petitdemange, H. and Gay, R., Acetone and butanol production by *Clostridium acetobutylicum* in a synthetic medium. Appl. Environ. Microbiol., 44, 1982, 1318-1324.

- [10] Bahl, H., Andersch, W., Braun, K. and Gottschalk, G., Effect of pH and butyrate concentration on the production of acetone and butanol by *Clostridium acetobutylicum* grown in continuous culture. European J. Appl. Microbiol. Biotechnol., 14, 1982, 17-20.
- [11] Bahl, H., and Gottschalk, G., Parameters affecting solvent production by *Clostridium acetobutylicum* in continuous culture, Sixth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals, 1984, 215-224.
- [12] Gottschalk, G. and Bahl, H., Feasible improvements of the butanol production by *Clostridium acetobutylicum*, Hollander A. (Ed) Trends in the biology of fermentation for fuels and chemicals. Plenum Press, New York, 1981, 463-471.
- [13] Yarovenko, V.L., Continuous Cultivation of Microorganism, Prage Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, 1962.
- [14] จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ และคณะ กระบวนการหมักอะซิโตน-บิวทานอลจากมันสำปะหลัง, ทูลส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์, 2529.
- [15] ปาริชาติ จานทองและคณะผลกระทบความเข้มข้นของน้ำตาลต่อการหมักอะซิโตน-บิวทานอล ในถึงปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 20-21 ตุลาคม 2537.
- [16] Muangnapoh, C. Fermentation acetonobutylique par *Cl. Butylicum* NRRL B592: Optimisation de la mise en oeuvre en culture continuous. These docteur ingenieur, INSA TOULOUSE, 1984.
- [17] Minier, M., Ferras, E., Goma, G. and Soucalle, P. Improvement of microbial production based on physiological and technical approach. VII the international Biotechnology Symposium, New Delhi, February, 1984, 19-25.
- [18] Phisalaphong, M. and Muangnapoh, C., Application of Crossflow Microfiltration for Improved Productivity in Continuous Acetone-Butanol Fermentation. The First National Chemical Engineering Conference, Bangkok Dec. 17-19, 1990, 352-359.
- [19] สติศา ไกรลาศ, จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ และเหมือนเดือน พิศาลพงศ์ การเพิ่มอัตราผลผลิตตัวทำละลาย ในกระบวนการหมักอะซิโตน-บิวทานอล โดยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน การประชุมวิชาการทาง

วิศวกรรมเคมีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยขอนแก่น 20-21 ตุลาคม 2537.

- [20] Qureshi N., Blaschek HP, Recent advances in ABE fermentation: hyper-butanol producing *Clostridium beijerinckii* BA101, Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 27, (5), 2001, 287-291.
- [21] Qureshi N., Blaschek HP, ABE Production from Corn: a Recent Economic Evaluation, Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 27(5), 2001, 292-297.
- [22] Qureshi N., Blaschek HP, Evaluation of Recent Advances in Butanol Fermentation, Upstream, and Downstream Processing, Bioprocess and Biosystems Engineering, 24 (4), 2001, 219-226.