

กระบวนการออสโมซิสผันกลับเพื่อเพิ่ม ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ จากน้ำหมักในกระบวนการหมัก อะซิโตน-บิวทานอล

เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ และ จิรภานต์ เมืองนาโพธิ์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการแยกตัวทำละลายอินทรีย์(บิวทานอล เอทานอล อะซิโตน กรดบิวทริก และกรดอะซิติก) จากน้ำหมัก การหมักใช้สารละลายมันสำปะหลังเลี้ยงยีสต์ด้วยเอมไซม์เป็นวัตถุดิบและใช้เชื้อ *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 โดยกระบวนการแยกใช้โมดูลออสโมซิสผันกลับทำจากโพลีเอไมด์ ทำการทดลองศึกษาหาผลกระทบบของความดันที่ใช้ อัตราการไหลเวียน และความเข้มข้นของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อสมบัติการแยกในกระบวนการออสโมซิสผันกลับพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการแยกตัวทำละลายจากน้ำหมักอยู่ที่ความดันช่วง 40-50 กก.ต่อซ.ม อัตราการไหลเวียน 3-5 ลิตรต่อนาที โดยได้เพอร์มิเอทฟลักซ์มากกว่า 20 ลิตรต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ที่เปอร์เซ็นต์รีเจกชันของบิวทานอลเป็น 93-98 และเปอร์เซ็นต์รีโคเวอร์โดยมวลเป็น 99.5-99.9 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบพลังงานในการทำเข้มข้นโดยวิธีการกลั่นและออสโมซิสผันกลับในการทำเข้มข้นจากบิวทานอล 9.5 กรัมในน้ำหมักไปเป็น 19.1 กรัมต่อลิตร พบว่า พลังงานที่ใช้ในการแยกตัวทำละลายโดยกระบวนการออสโมซิสผันกลับมีค่าน้อยกว่าการกลั่นแบบครั้งคราวประมาณ 10 เท่า

Reverse Osmosis for the Concentration of Organic Solvents from Acetone-Butanol Fermentation Broth

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

Abstract

Reverse osmosis (RO) for the separation of organic solvents (butanol, ethanol, acetone, butyric acid and acetic acid) from fermentation broth has been studied. The broth was prepared from acetone-butanol-ethanol fermentation by *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 using enzyme hydrolysate of tapioca as a raw material. Polyamide had been used as the membrane for the separation. The effect of operating pressure, circulation flow rate and concentration of organic solvents on the properties of the reverse osmosis system has been investigated. The optimal applied pressure and circulation flow rate for the separation was 40-50 kg/hr and 3-5 L/min respectively with permeate flux more than 20 L/m²hr, 93-98% rejection and 99.5-99.9% recovery. Experimental results showed the energy supply to concentrate 9.5 g/L butanol in fermentation broth to 19.1 g/L by the reverse osmosis process were about 1/10 of that by batch distillation process.

บทนำ

น้ำมันปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในปริมาณจำกัด เป็นผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนได้ในอนาคต ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมและการพัฒนาประเทศได้ จากปัญหาดังกล่าว การแสวงหาพลังงานทดแทนในรูปแบบอื่น จึงจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อนำมาใช้ทดแทน หรือลดปริมาณการใช้้ำมันปิโตรเลียมลง พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานด้านหนึ่งที่ได้รับการสนใจเป็นอย่างมากโดยเฉพาะประเทศที่มีผลผลิตทางเกษตรกรรมสูง มีวัตถุดิบทางเกษตรกรรมหลายอย่างที่สามารถนำมาเปลี่ยนเป็นสารที่ให้พลังงานทางเคมี (chemical fuels) โดยกระบวนการหมักเช่น แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ คือ เมทานอล เอทานอล และบิวทานอล เป็นต้น

บิวทานอล เมื่อใช้เป็นสารผสมกับน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล จะใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมได้ดีในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ทั้งในเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล (โกวิท ศตวุฒิ และอิทธิพล ปานงาม 1984; เบญจ ภมรสุด และพวก 1985) ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปโดยไม่ต้องใช้สารตะกั่ว ทั้งยังไม่ก่อให้เกิดปัญหาการแยกชั้นแบบที่พบในกรณีใช้เชื้อเพลิงผสมเอทานอล (gasohol) สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำมันเบนซินและดีเซล ปัจจุบันบิวทานอลถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการเปลี่ยนเป็น butylnitrate ซึ่งเป็นสารละลายที่ดีสำหรับ nitrocellulose lacquer นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการทำยางสังเคราะห์

ปัญหาที่พบในการผลิตบิวทานอลโดยกระบวนการหมักคือ ได้ผลิตภัณฑ์จากการหมักที่ความเข้มข้นต่ำซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการกลั่นแยกบิวทานอล งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนากระบวนการแยกผลิตภัณฑ์ โดยการนำกระบวนการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ในน้ำหมัก โดยดำเนินการในลักษณะต่อเนื่อง ทำการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้กระบวนการแยกผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการออสโมซิสผันกลับกับกระบวนการกลั่น

ทฤษฎีและหลักการ

กระบวนการหมักอะซิโตนบิวทานอล ได้ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 1 เพื่อใช้ในกิจการทำวัตถุระเบิด ปัจจุบันการผลิตบิวทานอลโดยกระบวนการหมักถูกแทนที่ด้วย กระบวนการสังเคราะห์ทางปิโตรเคมีที่ทำให้ได้บิวทานอลราคาถูกกว่า ปัญหาสำคัญของการผลิตบิวทานอลจากกระบวนการหมักคือ กระบวนการนี้ให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนน้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์ (% conversion yield) ค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 30%) (Robson, P.M. and Jones, D.T., 1982) และความเข้มข้นรวมของผลิตภัณฑ์ตัวทำละลายต่ำคือ ประมาณ 20 กรัม/ลิตร ทำให้สูญเสียพลังงานที่ใช้ในการกลั่นแยกเป็นจำนวนมาก

การกลั่นเป็นกระบวนการแยกตัวทำละลายที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์ โดยทั่วไป แอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักมักมีความเข้มข้นต่ำ จึงทำให้ต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาระบบต่างๆ เช่น ออสโมซิสผันกลับ และเพอร์เมอเรชันขึ้นเพื่อลดต้นทุนในการแยกตัวทำละลาย

ออสโมซิสผกกลับเป็นกระบวนการที่ถูกออกแบบ เพื่อแยกตัวทำละลายให้ได้ สารละลายที่มีความเข้มข้นขึ้น และใช้ทำน้ำบริสุทธิ์ โดยใช้ความดันประมาณ 400 – 1000 ปอนด์แรง/นิ้ว² บังคับให้น้ำและสารที่มีโมเลกุลเล็กๆ (เพอร์มิเอท) ผ่านเยื่อแผ่นที่มีคุณสมบัติยอมให้น้ำผ่านได้ ด้วยหลักการนี้ ออสโมซิสผกกลับจึงเหมาะที่จะนำมาใช้เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายก่อนกลั่น แต่เมื่อความเข้มข้นสูงจะทำให้ค่าความดันออสโมติกสูงขึ้นจึงทำให้ไม่สามารถปฏิบัติการต่อไปได้

Albert Garcia III และคณะ (1984) ได้ทำการทดลองใช้กระบวนการออสโมซิสผกกลับทำการแยกน้ำออกจากสารละลายสังเคราะห์เตรียมจากบิวทานอล 1.5% และอะซิโตน 0.75% โดยน้ำหนักในน้ำ เพื่อทำให้ได้ตัวทำละลายที่เข้มข้นขึ้นโดยใช้เยื่อแผ่นที่ทำจากโพลีเอไมต์ในโมดูลม้วนพบว่า ค่ารีเจกชันของบิวทานอล สูงถึง 85% โดยใช้ความดัน 5.5-5.6 เมกกาปาสกาล รีโคเวอรีโดยปริมาตร 50-70% ช่วงฟลักซ์ 0.5-1.8 ลิตร/ตารางเมตร-นาทิต ต่อมาได้ทำการทดลองโดยการนำสารละลายน้ำหมักที่ผ่านกระบวนการกรองระดับอนุภาค จากการทดลองให้ค่าบิวทานอลรีเจกชันสูงถึง 98% ในช่วงรีโคเวอรีโดยปริมาตร 20-45% ฟลักซ์ 0.05-0.6 ลิตร/ตารางเมตร-นาทิต (Albert Garcia III, 1986)

Yiamsombat S. และ Muangnapoh C. (1990) ได้ศึกษาการผลิตบิวทานอลจากการหมัก และเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลจากสารสังเคราะห์โดยระบบออสโมซิสผกกลับ พบว่า ที่ความดันระหว่าง 30-50 กก./ตารางเซนติเมตร และที่อัตราการไหล 3 ลิตร/นาทิต สามารถทำให้บิวทานอลเข้มข้นขึ้นจาก 6 กรัม/ลิตร เป็น 16-20 กรัม/ลิตร โดยให้ค่าบิวทานอลรีเจกชัน 87% (ที่ 75% รีโคเวอรีโดยปริมาตร)

เพอร์เวเพอเรชัน เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลจากสารป้อนของเหลวผ่านเยื่อแผ่นโพลีเมอร์ที่ไม่มีรูพรุน เพอร์มิเอทจะถูกดึงออกจากอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นในสถานะไอ การถ่ายเทมวลถูกเหนี่ยวนำจากการทำให้ความดันย่อยของสารในด้านเพอร์มิเอทต่ำกว่าความดันในด้านสารป้อน โดยทำให้เกิดภาวะสูญญากาศ ใช้แก๊สเป็นตัวพาหรือการทำให้ควบแน่นบนผิวที่เย็น ชมพูนุท พิภพลาภอนันต์ และจิรกันต์ เมืองนาโพธิ์ (1994) ได้ศึกษาการแยก และการทำให้บิวทานอลเข้มข้นขึ้นจากสารละลายเจือจางน้ำ-บิวทานอล โดยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันโดยใช้เยื่อแผ่นซิลิโคนพบว่า สามารถเพิ่มความเข้มข้นของบิวทานอลจาก 4.4% โดยน้ำหนัก ไปเป็น 68% โดยน้ำหนัก ที่อัตราการไหลของเพอร์มิเอทต่อพื้นที่เท่ากับ 25 กรัม/ตารางเมตร-ชม. เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่า ระบบออสโมซิสผกกลับ ให้อัตราการไหลของบิวทานอลต่อพื้นที่ (butanol flux) สูงกว่า

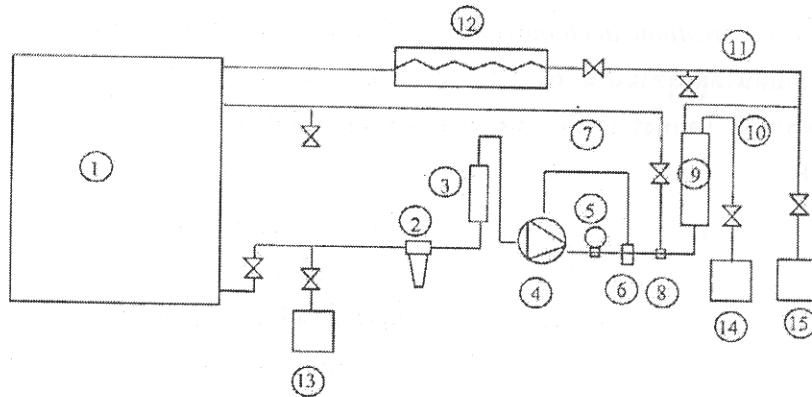
ระบบเพอร์เวเพอร์ชันมาก เนื่องจากเยื่อแผ่นที่ใช้ในกระบวนการเพอร์เวเพอร์ชันยังมี
ประสิทธิภาพในการแยกที่ต่ำ

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเพื่อพัฒนากระบวนการแยกตัวทำละลาย โดยกระบวนการออสโมซิส
ผกกลับทำในระบบที่ถูกออกแบบขึ้น เพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อการแยกตัวทำ
ละลายในน้ำหมัก (ใช้สารละลายหลังการย่อยมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เป็นวัตถุดิบและใช้
เชื้อ *Clostridium acetobutylicum* ATCC824 ในการหมัก) ระบบที่ทดลองควบคุม
ความดันได้สูงสุดไม่เกิน 60 กก./ซม² และอัตราการไหลของสารละลายสูงสุดไม่เกิน 7
ลิตร/นาที่ โดยทั้งระบบมีความจุ 1.6 ลิตร รายละเอียดส่วนต่างๆของระบบมีดังนี้ (รูปที่
1)

1. ถังป้อน (feed reservoir) เป็นถังสแตนเลสขนาด 200 ลิตร ส่วนล่าง
ของถังมีท่อต่อออก 2 ทาง ทางหนึ่งสำหรับสารป้อนเข้าระบบอีกทางหนึ่ง
เป็นท่อทิ้งสารละลาย มีปั๊มลอยโข่งหัวเทพลอนขนาด 45 วัตต์ อัตราการ
ไหล 35 ลิตร/นาที่ ทำหน้าที่หมุนเวียนสารละลายในถังป้อนให้ผสมกัน
2. ไส้กรอง (cartridge filter) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 ซม. และ 25 ซม.
ความละเอียดการกรอง 10 ไมโครเมตรทำหน้าที่กรองสารละลายก่อนเข้า
สู่มอดูลออสโมซิสผกกลับ
3. ปั๊มความดันสูง (high pressure pump) เป็นแบบ triplex piston
pump ของ CAT PUMP model 281 ทำด้วยสแตนเลสต่อกับมอเตอร์
1.0 แรงม้า ใช้อัตราการไหลสูงสุด 11 ลิตร/นาที่ ความดันสูงสุด 70
กก/ซม² ควบคุมรอบมอเตอร์ด้วยทรานซิสเตอร์อินเวอร์เตอร์ (transister
inverter) ยี่ห้อ Inverter ปรับลักษณะการไหลให้เรียบด้วยอุปกรณ์
Pressure Pulsation Dampener วาล์วปรับความดัน (pressure relief
valve) ควบคุมความดันในระบบไม่เกิน 60 กก./ซม²
4. มิเตอร์วัดอัตราการไหล (flow meter) เป็นแบบ Rotameter ของ Blue
White (U.S.A) ทำด้วยอะคริลิก (acrylic) วัดอัตราการไหลของน้ำช่วง
0-7 ลิตร/นาที่
5. โมดูลออสโมซิสผกกลับ (reverse osmosis module) ทำจากโพลีเอ
ไมด์ (polyamide) ของ FILMTECH model SW30-2521 เป็นโมดูล

แบบม้วนมีพื้นที่ผิวเยื่อแผ่น 0.88 m^2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ซม. ยาว 52.5 ซม. ทนความดันสูงสุดประมาณ 70 กก./ซม^2 อุณหภูมิ 45°C อัตราการไหลสูงสุด 23 ลิตร/ชม. ที่ทางออกมีเกจความดันช่วง 0 ถึง 100 กก./ซม^2 และวาล์วเข็ม (needle valve) ปรับความดัน ท่อสายคอนเซนตริกแยกไปถึงเก็บคอนเซนตริก และท่อเวียนกลับเข้าสู่ถังป้อน โดยต่อผ่านหน่วยหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมของระบบออสโมซิสผันกลับ

- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1. ถังป้อน | 9. เยื่อแผ่นออสโมซิสผันกลับ |
| 2. ไส้กรองละเอียด | 10. วาล์วเข็ม |
| 3. มิเตอร์วัดอัตราการไหล | 11. ท่อคอนเซนตริกเวียนกลับ |
| 4. ปั๊มความดันสูง | 12. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน |
| 5. Pulsation Dampener | 13. ถังสารละลายล้างเยื่อแผ่น |
| 6. สวิตช์ตัดไฟด้วยความดัน | 14. ถังเพอร์มิเอท |
| 7. ท่อไหลกลับ | 15. ถังคอนเซนตริก |
| 8. วาล์วปรับความดัน | |

การศึกษาผลกระทบจากภาวะการแยกตัวทำละลายจากน้ำหมัก โดยใช้ระบบออสโมซิสผันกลับทำโดยศึกษาผลกระทบความดัน อัตราการไหลและความเข้มข้นสารละลายที่มีผลต่อการแยกตัวทำละลาย ทำการทดลองที่อัตราการไหลที่ 1 3 และ 5 ลิตร/นาที่ ความดัน 10 20 30 40 และ 50 กก./ซม² ที่ความเข้มข้นตัวทำละลายรวมตั้งแต่ 10-30 กรัม/ลิตร การศึกษาดำเนินการในลักษณะแบบต่อเนื่องโดยควบคุมความเข้มข้นของสายป้อนให้คงที่ ที่ความดันและอัตราการไหลในแต่ละการทดลอง เมื่ออัตราการไหล

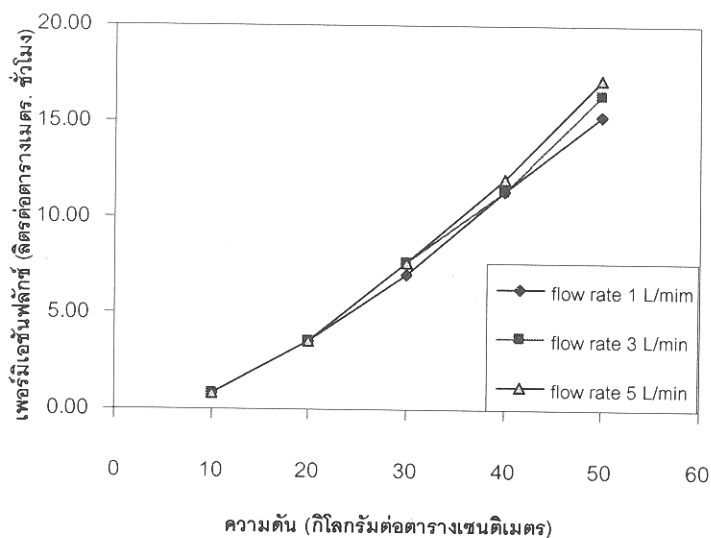
เพอร์มิเอทคงที่ วัดอัตราการไหลเพอร์มิเอท และเก็บตัวอย่าง 3 จุดคือ สายป้อน สาย
เพอร์มิเอทและสายคอนเซนเตรท ทำความสะอาดระบบใหม่ทุกครั้ง เมื่อเปลี่ยนสภาวะการ
ทดลอง

ผลการทดลอง

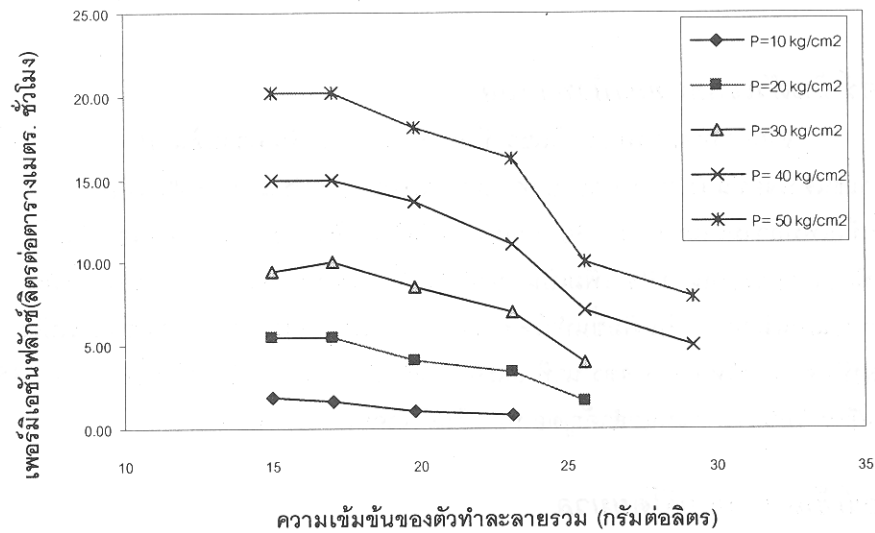
การศึกษาผลกระทบความดัน อัตราการไหลผ่านและความเข้มข้นต่อการแยก
ตัวทำละลายจากน้ำหมักได้ผลดังนี้

เพอร์มิเอชันฟลักซ์

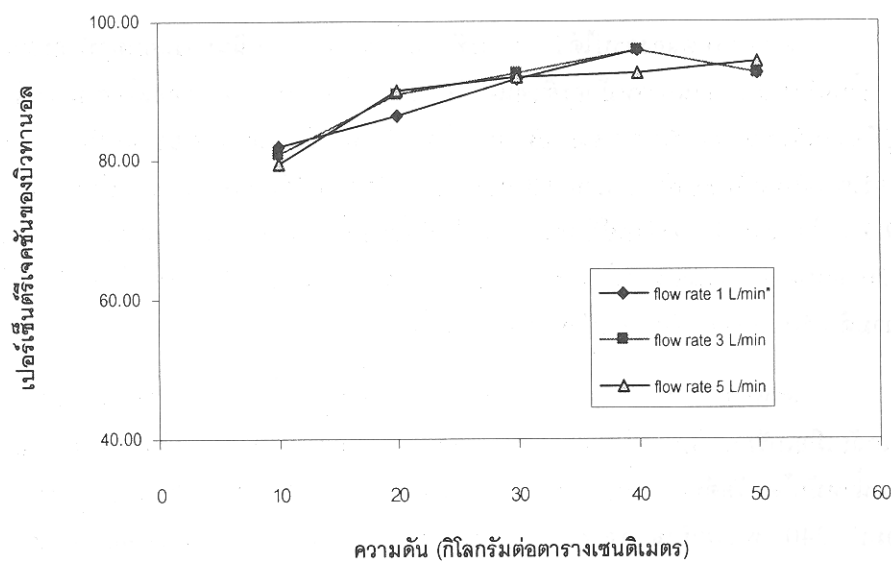
จากการศึกษาผลกระทบต่อเพอร์มิเอชันฟลักซ์ของความดันในช่วง 10-50 กก./ซม² และอัตราการไหลเข้าจาก 1-5 ลิตร/นาที่ ที่ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำหมักตั้งแต่ 15-30 กรัม/ลิตร พบว่า ค่าเพอร์มิเอชันฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นในลักษณะค่อนข้างจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดัน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการไหลผ่านเยื่อแผ่นออสโมซิสผันกลับโดยใช้แรงดันต้านความดันออสโมติก ในขณะที่การเพิ่มอัตราการไหลเข้าจาก 1-5 ลิตร/นาที่ มีผลต่อการเพิ่มเพอร์มิเอชันฟลักซ์เล็กน้อย (รูปที่ 2) ซึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องจากการเพิ่มสัมประสิทธิ์การไหลของสารละลายผ่านเยื่อแผ่น เมื่ออัตราการไหลผ่านเยื่อแผ่นสูงขึ้น สำหรับผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายในน้ำหมักตั้งแต่ 15-30 กรัม/ลิตร พบว่า เพอร์มิเอชันฟลักซ์จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายในระบบสูงขึ้นเนื่องจากแรงดันออสโมติกของระบบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มิเอชันฟลักซ์และความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในการแยกตัวทำละลายออกจากน้ำหมักที่ตัวทำละลายเข้มข้น 23.1 กรัม/ลิตร โดยกระบวนการออสโมซิสผันกลับ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มิเอชันฟลักซ์และความเข้มข้นของตัวทำละลายรวม ที่ความดันต่าง ๆ ในการแยกตัวทำละลายออกจากน้ำหมักด้วยอัตราการไหล 3 ลิตรต่อนาที โดยกระบวนการออสโมซิสผันกลับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์รีเจคชันและความดันที่อัตราการไหลต่าง ๆ ในการแยกตัวทำละลายออกจากน้ำหมักที่ตัวทำละลายเข้มข้น 17.0 กรัม/ลิตร โดยกระบวนการออสโมซิสผันกลับ

เปอร์เซ็นต์รีเจคชันของบิวทานอล

จากการทดลองพบว่า ในช่วงที่มีการดำเนินการเพิ่มความดัน 10-30 กก/ชม² เปอร์เซ็นต์รีเจคชัน (การกัก) ของบิวทานอลจะเพิ่มขึ้นจากประมาณ 80% เพิ่มขึ้นเป็น 93% และเมื่อเพิ่มความดันมากกว่า 30 กก/ชม² เปอร์เซ็นต์รีเจคชันของบิวทานอลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจากประมาณ 93% เพิ่มขึ้นเป็น 98% (รูปที่ 4) ทั้งนี้อาจเกิดจากการอัดตัวเพิ่มขึ้นของเยื่อแผ่นเมื่อความดันเพิ่มขึ้นทำให้สามารถกักบิวทานอลได้เพิ่มขึ้น สำหรับการเปลี่ยนแปลงที่อัตราการไหล 1-5 ลิตร/นาที่ และความเข้มข้นของตัวทำละลายในน้ำหมัก 15-35 กรัม/ลิตร ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์รีเจคชันของบิวทานอล

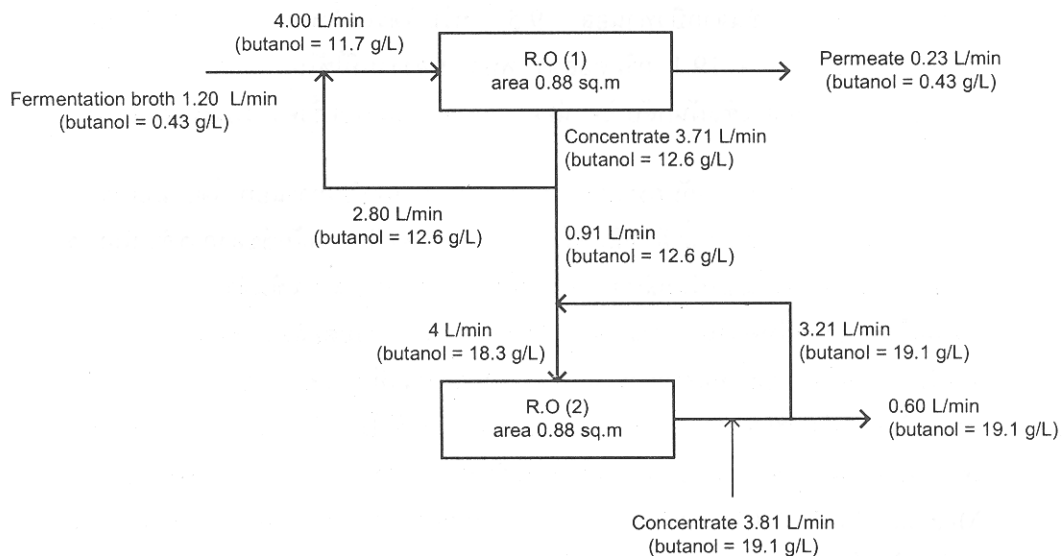
เปอร์เซ็นต์รีโคเวอรีโดยมวล

จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความดันที่ใช้ในการดำเนินการช่วง 10-50 กก/ชม² อัตราการไหล 1-5 ลิตร/นาที่ และความเข้มข้นของตัวทำละลายในน้ำหมัก 15-30 กรัม/ลิตร ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์รีโคเวอรีโดยมวล โดยเปอร์เซ็นต์รีโคเวอรีโดยมวลมีค่าค่อนข้างคงที่ 93.0-99.9%

จากการทดลองสรุปได้ว่า ภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการแยกตัวทำละลายจากน้ำหมักในกระบวนการหมักอะซิโตน-บิวทานอล โดยกระบวนการออสโมซิสผันกลับอยู่ที่ความดันช่วง 40-50 กก/ชม² อัตราการไหลเข้า 3-5 ลิตร/นาที่ โดยช่วงดังกล่าวจะมีเปอร์เซ็นต์รีเจคชันของบิวทานอล 93-98% และเปอร์เซ็นต์รีโคเวอรีโดยมวลเป็น 99.5-99.9% โดยเพอร์มิเอฟลักซ์ขึ้นกับความเข้มข้นของตัวทำละลาย ในระบบนี้มีค่าในช่วง 8-20 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของตัวทำละลาย 15-30 กรัมต่อลิตร ที่ความดัน 50 กก/ชม² อัตราการไหลเข้า 3 ลิตรต่อนาที่

สำหรับการใช้พลังงานเพื่อแยกผลิตภัณฑ์ออกจากน้ำหมัก โดยวิธีรีออสโมซิสผันกลับเมื่อเปรียบเทียบกับโดยการกลั่น (วัดพลังงานไฟฟ้าในการแยกตัวทำละลายออกจากน้ำหมักโดยวัตต์เมตรของบริษัท SIEMEN ขนาด 50 เฮิร์ซ 220/380 โวลท์ 20 แอมป์ 240 หน่วย/กิโลวัตต์-ชม.) ดำเนินการทำเข้มข้นด้วยกระบวนการออสโมซิสผันกลับที่ความดัน 40 กก/ชม² และอัตราการไหลเข้า 4 ลิตร/นาที่ตาม รูปที่ 5 ปริมาณพลังงานที่ใช้เพื่อทำให้ สารละลายน้ำหมัก 500 มล. (ประกอบด้วย บิวทานอล อะซิโตน และเอทานอล จำนวน 9.5 3.80 และ 0.5 กรัม/ลิตร ตามลำดับ) เข้มข้นเป็นสารละลายน้ำหมัก 250 มล. (ประกอบด้วย บิวทานอล อะซิโตน และเอทานอล จำนวน 19.1 8.0 และ

0.9 กรัม/ลิตร ตามลำดับ) เท่ากับ 0.04 กิโลวัตต์-ชม (พลังงานในการแยกเพอร์มิเอท ใน
ขั้นที่ 1 เท่ากับ 0.020 กิโลวัตต์-ชม. ในขั้นที่ 2 เท่ากับ 0.019 กิโลวัตต์-ชม.) ในขณะที่
การดำเนินการกลั่นแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อแยกบิวทานอลจากน้ำหมักพบว่า การกลั่นให้ได้
เปอร์เซ็นต์รีโคเวอรีโดยมวลของบิวทานอลมีค่าประมาณ 100% (เปอร์เซ็นต์รีโคเวอรีโดย
ปริมาตร 49.7%) ได้ผลิตภัณฑ์ยอดหอที่มีความเข้มข้นบิวทานอลรวม 19.1 กรัม/ลิตร
โดยกระบวนการกลั่นใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อทำให้สารละลายน้ำหมัก 500 มล. (บิวทานอล
9.5 กรัม/ ลิตร) เข้มข้นเป็นสารละลาย 250 มล. ที่มีบิวทานอล 19.1 กรัม/ลิตร เท่ากับ
0.39 กิโลวัตต์-ชม. จากผลการทดลองจะเห็นว่าในการดำเนินการข้างต้นพลังงานที่ใช้แยก
ตัวทำละลายโดยกระบวนการออสโมซิสผันกลับน้อยกว่ากระบวนการกลั่นประมาณ 10
เท่า



รูปที่ 5 ไดอะแกรมแสดงการดำเนินงานแบบต่อเนื่อง โดยกระบวนการออสโมซิสผัน
กลับในการเพิ่มความเข้มข้นบิวทานอลในน้ำหมักจาก 9.5 กรัมต่อเป็น 19.1 กรัมต่อลิตร
โดยดำเนินการที่ความดัน 40 กก/ชม² และอัตราการไหลเข้า 4 ลิตร/นาทึ

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการแยกตัวทำละลายอินทรีย์ (บิวทานอล เอทานอล อะซิโตน) จากน้ำมันดิบ โดยการหมักใช้สารละลายไขมันสำหรับเลี้ยงด้วยเอมไซม์เป็นวัตถุดิบและใช้เชื้อ *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 กระบวนการแยกใช้โมดูลออสโมซิสผกกลับทำจากโพลีเอไมด์ ทำการทดลองศึกษาหาผลกระทบบของความดันที่ใช้ อัตราการไหลเวียน และความเข้มข้นของตัวทำละลายอินทรีย์ต่อสมบัติการแยกในกระบวนการออสโมซิสผกกลับพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการแยกตัวทำละลายจากน้ำมันดิบคือที่ความดัน 40-50 กก./ซ.ม และอัตราการไหลเวียน 3-5 ลิตร/นาที่ โดยมีเปอร์เซ็นต์รีเจคชันของบิวทานอลเป็น 93-98 และเปอร์เซ็นต์รีโคเวอรีโดยมวลเป็น 99.5-99.9 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบพลังงานในการทำเข้มข้นโดยวิธีการกลั่นและออสโมซิสผกกลับในการทำเข้มข้นจากบิวทานอล 9.5 กรัม/ลิตรในน้ำมันดิบ ไปเป็นน้ำมันดิบที่ประกอบด้วยบิวทานอล 19.1 กรัมต่อลิตร พบว่า พลังงานที่ใช้ในการแยกตัวทำละลายโดยกระบวนการออสโมซิสผกกลับ มีค่าน้อยกว่าการ กลั่นแบบครั้งคราวประมาณ 10 เท่า

เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเพอเวพอเรชันที่เป็นการแยก โดยเมมเบรนที่สามารถแยกบิวทานอลจากน้ำอีกชนิดหนึ่งพบว่า ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ของการดำเนินการโดยกระบวนการออสโมซิสผกกลับสูงกว่ามากโดยเฉพาะที่ความเข้มข้นต่ำ จากการทดลองในงานวิจัยนี้ที่ความเข้มข้นของตัวทำละลาย 15 กรัมต่อลิตร ที่ความดันในการดำเนินการ 50 kg/cm^2 ที่อัตราการไหลผ่าน 3-5 ลิตร/นาที่ อุณหภูมิห้อง (33°C) จะได้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มากกว่า 20 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ในขณะที่ในการแยกโดยเพอเวพอเรชันจะได้ค่า เพอร์มิเอทฟลักซ์ค่อนข้างต่ำ จากรายงานปัจจุบัน (Huang JC, Meagher MM, 2001) แสดงผลการแยกบิวทานอลจากสารละลายบิวทานอล 10 กรัมต่อลิตร โดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ซิลิเกตในซิลิโคน (silicate-filled silicone composite membranes) ดำเนินการที่ 70°C ได้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ของสารละลาย 0.3-0.4 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง (ฟลักซ์ของสารละลาย 600-700 กรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง ฟลักซ์ของบิวทานอล 300 กรัมต่อตารางเมตรชั่วโมง) โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การเลือกอยู่ระหว่าง 90-100

อย่างไรก็ดีแม้ว่าการทำให้เข้มข้นโดยกระบวนการออสโมซิสผกกลับจะมีข้อดีที่ประหยัดพลังงาน ไม่ต้องเปลี่ยนสถานะของสารในระบบ ให้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ที่สูง และง่ายต่อการดำเนินการ แต่กระบวนการนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้แยกที่ความเข้มข้นสารละลาย

สูงมาก ๆ ดังนั้น กระบวนการออสโมซิสผันกลับจึงควรนำไปประยุกต์ในขั้นตอนการเพิ่มความเข้มข้นของตัวทำละลายหลังการหมักก่อนการแยก โดยการกลั่นหรือก่อนกระบวนการทำให้บริสุทธิ์อื่นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย สำนักงานพืชไร่ จ.ระยอง ที่กรุณาเอื้อเฟื้อมันสำปะหลัง และคณะนิสิตปริญญาโท ประจำห้องวิจัยวิศวกรรมชีวเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งมีส่วนช่วยพิมพ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] โกวิท ศตวุฒิ และอิทธิพล ปานงาม การวิจัยเพื่อนำแอลกอฮอล์หมักมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ทุนส่งเสริมการวิจัยของงบประมาณแผ่นดิน 1984
- [2] เบญจ ภมรสุด และคณะ โครงการวิจัยเติมสารเสริมในแอลกอฮอล์เพื่อใช้แทนน้ำมันดีเซล สภาวิจัยแห่งชาติ 1985
- [3] ชมพูนุช พิธลาพอนันต์ และจิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ การแยกและทำให้นิวทานอลเข้มข้นจากสารละลายเจือจาง น้ำ-บิวทานอล โดยกระบวนการเพอร์เมอเรชัน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยขอนแก่น 20-21 ตุลาคม 2537
- [4] Robson, P.M. and Jones, D.T., Industrial production of acetone-butanol, Colloque Societe France Microbiol, Rueil-Malmaison, 169-213, 1982.
- [5] Garcia III, A., Lannotti, E.L., and Fischer, J.L., Reverse Osmosis Application for Butanol-Acetone Fermentation, Biotechnol. Bioeng, 14, 534-552, 1984.
- [6] Gaecia, A., Lannotti, E.L., and Fischer, J.L., Butanol Fermentation Liquor Production and Separation by Reverse Osmosis, Biotechnol. Bioeng, 28, 785-791, 1986.
- [7] Yiamsobat, S. and Muangnapoh, C. Production of Butanol Fermentation and Increasing Butanol Concentration by Reverse Osmosis, Microbial, Utilization of Renewable Resources. Vol.7, 544-550, 1990.

- [8] Ballweg, A. H., Bruschke, H.E.A., Schneider, W.M. and Tusel, G.F., Proc. 5th International Alcohol Fuel Tech Symposium, Auckland, New Zealand, 1, 97, 1982.
- [9] Aptel, P. and Nell, J., Pervaporation in Sythetic Membranes: Science, Engineering, and Application, 403-436, 1986.
- [10] Roffler, S., Extractive Fermentation of Acetone and Butanol: Process design and Economic Evaluation, Biotechnology Progress, vol 3, No3, 131-140, 1987.
- [11] Fang J., Jia DM., Huang JC., Guo QH. and Wu FL, Studies on Reverse Osmosis Separation of Aqueous organic Solutions by PAA/PSF composite membrane, Chinese Journal of Polymer Science, 18 (2), 11-5-122, 2000.
- [12] Qureshi N., Blaschek HP, Evaluation of Recent Advances in Butanol Fermentation, Upstream, and Downstream Processing, Bioprocess and Biosystems Engineering, 24(4), 219-226, 2001.
- [13] Tsurumi, R., Shiraishi, S., Ando, Y., Yanagida M. and Takeda, K, Production of Flavor Compounds from Apple Pomace, J. Japanese Society for Food Science and Technology, 48(8), 564-569, 2001.
- [14] Huang JC and Meagher MM, Pervaporative recovery of n-butanol from aqueous solutions and ABE fermentation broth using thin film silicate-filled silicone composite membranes, J. Membrane Science, 192 (1-2), 231-242, 2001.