Pathumwan Academic Journal, Vol. 9, No. 24, January - April 2019: 39 - 58

การสกัดและกลไกการถ่ายโอนมวลของไอออนกรดแลคติกผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง

Extraction and Mass Transfer Mechanism of Lactic Acid Ions through a Hollow Fiber Supported Ionic-Liquid Membrane

ฑรรชนก ประภาสวัสดิ์* พสุพัฒน์ สัมมากสิพงศ์ พัชริดา แปลงไร่ และ พรหมมาศ โรจน์วีระพันธ์

สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมีและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

E-mail: p.tatchsnok@gmail.com

Tatchanok Prapasawat, Pasupat Summakasipong, Patcharida Plangrai and Prommas Rojweerapan Department of Petrochemical and Environmental Engineering, Faculty of Engineering,

Pathumwan Institute of Technology, Bangkok 10330, Thailand

E-mail: p.tatchsnok@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดและนำกลับกรดแลคติกผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นแบบไหลวนและสวนทางกันด้วยอัตราการไหล 100 mL/min ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสังเคราะห์กรดแลคติกในสารละลายป้อน 0.1 mol/L ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของสารสกัดไอออนิกชนิดกรดและเบส ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายโทลูอีน และชนิดของสารละลายนำกลับ จากการทดลองพบว่า การสกัดและการนำกลับกรดแลคติกผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงมีค่าสูงสุดประมาณ 52 % และ 46 % เมื่อใช้สารสกัดไอออนิกชนิดเบส Alamine 336 ที่ความเข้มข้น 6% (v/v) ในตัวทำละลายโทลูอีน และการใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายนำกลับ โดยใช้เวลาในการปฏิบัติการ 90 นาที นอกจากนี้การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของกรดแลคติกในวัฏภาคสารละลายป้อน (k_f) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอออนเชิงซ้อนกรดแลคติกในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (k_m) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของกรดแลคติกในวัฏภาคสารละลายนำกลับ (k_s) มีค่าเท่ากับ 1.27×10^{-4}, 3.20×10^{-3} และ 2.22×10^{-3} cm/s ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าการแพร่ของกรดแลคติกผ่านชั้นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนควบคุมการถ่ายโอนมวล (Mass transfer controlling step) ของการสกัดและนำกลับกรดแลคติก

Research Paper
***Corresponding author**

Received 28 March 2019
Revised 17 April 2019
Accepted 24 April 2019

คำสำคัญ: กลไกการถ่ายโอนมวล, เยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิก, การสกัด, กรดแลคติก, เส้นใยกลวง

Abstract

This proposed research examined the c extraction and recovery of lactic acid ions through a hollow fiber supported ionic liquid membrane using counter-current feed and stripping solutions with equal flow rate of 100 mL/min. The initial concentration of lactic acid solution was 0.1 mol/L. The studied parameters such as types of ionic-extractants or carriers, concentrations of acid and base ionic-extractants dissolved in toluene as an organic solvent, and types of the stripping solution were investigated. The results showed that the maximum extraction and the recovery of the lactic acid solution were 52% and 46%, which were performed by using Alamime 336 of 6% (v/v) as a base ionic-extractant and the deionized water as the stripping solution using the operation time of 90 min. Furthermore, the calculated mass transfer coefficients of the extraction and recovery of lactic acid ions through the feed phase (k_f), the liquid membrane phase (k_m) and the stripping phase (k_s) were 1.27×10^{-4}, 3.20×10^{-3} and 2.22×10^{-3} cm/s, respectively. According to these values indicating that the diffusion of lactic acid ions through the interface layer between the feed phase and the liquid membrane phase was the mass transfer controlling step of the extraction and recovery of lactic acid.

Keywords: Mass transfer mechanism, Ionic liquid membrane, Extraction, Lactic acid, Hollow fiber

1. บทนำ

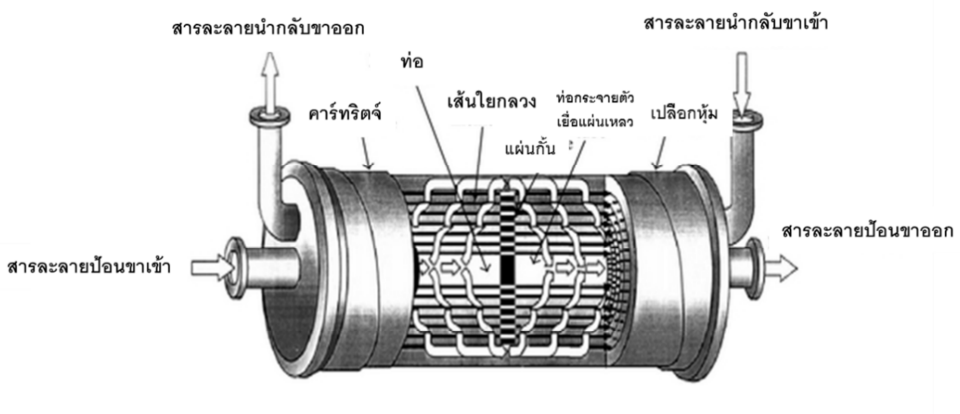
กรดแลคติกเป็นกรดอินทรีย์ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ในอุตสาหกรรมเคมีซึ่งใช้กรดแลคติกบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลายเพื่อส่งเสริมปฏิกิริยาเคมี ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มพบกรดแลคติกในผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวกับนมและอาหารหมักดองซึ่งใช้เป็นสารให้ความเปรี้ยว และเป็นสารปรับค่าความเป็นกรด-เบส ในอุตสาหกรรมยาใช้กรดแลคติกสำหรับปรับความเป็นกรด-เบส ใช้เป็นองค์ประกอบในการสังเคราะห์ยาและเป็นตัวกลางในการผสมยา ในอุตสาหกรรมฟอกหนังและอุตสาหกรรมสิ่งทอใช้กรดแลคติกเป็นสารที่ช่วยให้การย้อมและพิมพ์ติดแน่นยิ่งขึ้น และใช้ฟอกหนังเพื่อให้หนังนิ่ม [1-3] นอกจากนี้ในปัจจุบันกรดแลคติกยังถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์พอลิกรดแลคติก (Polylactic acid, PLA) หรือ พอลิแลคเทต (Polylactate) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและยังสามารถใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการปิโตรเคมีที่ต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนาน และส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์วิทยาและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [4]

การผลิตกรดแลคติกส่วนใหญ่สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีการหมักทางชีวภาพ และวิธีการสังเคราะห์ทางเคมี โดยวิธีที่นิยมศึกษาวิจัยในปัจจุบันคือวิธีการหมักทางชีวภาพ ซึ่งในวิธีนี้จะต้องมีขั้นตอนการแยกและสกัดกรดแลคติกออกมาก่อนนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิธีการแยกกรดแลคติกอย่างต่อเนื่อง เช่น การศึกษาการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) ที่ใช้สารสกัดไตรออกทิลอามีน (Trioctylamine, TOA) ละลายในตัวทำละลายไดออกทิลเฮกซะนอลและออกทานอล [5] การศึกษาการนำกลับกรดแลคติกโดยการกลั่นที่มีปฏิกิริยาร่วม (Reactive distillation) [6] การศึกษาการประยุกต์ใช้อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis) สำหรับแยกกรดแลคติกจากกระบวนการหมักกรดแลคติก [7] การศึกษาการดูดซับ (Adsorption) กรดแลคติกออกจากน้ำหมักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ (Amberlite IRA -400 anion exchange resin) [8] เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายจะต้องใช้ปริมาณสารสกัดและตัวทำละลายมาก วิธีการกลั่นที่มีปฏิกิริยาร่วมมีขั้นตอนกาสกัดหลายขั้นตอน วิธีอิเล็กโตรไดอะไลซิสต้องใช้ต้นทุนสูงและใช้เวลาการแยกนาน วิธีการดูดซับโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่มีราคาแพง ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงเมื่อน้ำหมักมีสารปนเปื้อนสูง เป็นต้น นอกจากวิธีการแยกกรดแลคติกที่กล่าวข้างต้นยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการแยกและการนำกลับด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow fiber supported ionic liquid membrane, HFSILM) เช่น การศึกษาของฑรรชนก ประภาสวัสดิ์. 2558 [9] ที่ใช้เยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงในการแยกอิแนนทิโอเมอร์ของกรดแลคติกและฟีนิลอะลานีน งานวิจัยของ R. Abejón และคณะ 2018 [10] ที่ศึกษาการถ่ายโอนมวลของลิกนินและมอนอแซกคาไรด์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยตัวรองรับพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของลินินและมอนอแซกคาไรด์อยู่ในช่วง $0.14 – 0.56 \times 10^{-4}$ cm/s

ของเหลวไอออนิก (Ionic liquid) เป็นสารประกอบไอออนิกหรือเกลืออินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 100 °C มีความเสถียรทั้งเชิงกลและเชิงความร้อน สามารถปรับสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ได้ และสามารถละทิ้งเรื่องความดันไอได้ โดยปกติสารประกอบไอออนิกประกอบด้วยอะตอมของไอออนบวกและไอออนลบที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไอออนิก ส่วนของเหลวไอออนิกประกอบด้วยไอออนบวกอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่ไม่สมมาตร (Bulky asymmetric organic cation) และไอออนลบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ยึดกันด้วยแรงคูลอมบ์ (Coulomb interaction) สารประกอบไอออนิกชนิดใด ๆ จะมีสถานะเป็นของเหลวและหลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิห้องเรียกว่า Room temperature ionic liquid (RTIL) ที่มีความหนืดต่ำ [11-14]

เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง หรือ เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง ดังรูปที่ 1 เยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่เป็นสารละลายผสมของสารสกัดแบบไอออนิก (ของเหลวไอออนิก) และตัวทำละลายจะถูกตรึงไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ในรูพรุนจุลภาคของตัวรองรับแบบเส้นใยที่เป็นพอลิเมอร์ด้วยแรงคะปิลลารี (Capillary force) ทำให้มีความเสถียรมากขึ้น การใช้สารสกัดแบบไอออนิกยังช่วยลดการสูญเสียจากการระเหย (Evaporation) และการแพร่กระจาย (Dispersion) ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่อยู่ในรูพรุนของตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง [15-17] ขณะที่ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงเป็นวิธีที่สามารถใช้แยกสาร

ที่มีความเข้มข้นต่ำมากในระดับส่วนในล้านส่วน (Part per million, ppm) หรือส่วนในพันล้าน (Part per billion, ppb) การสกัดและการนำกลับเกิดขึ้นพร้อมกันในขั้นตอนเดียว ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำเพราะใช้สารสกัดและตัวทำละลายน้อย และใช้พลังงานน้อย สามารถดัดแปลงและขยายขนาดได้ง่ายโดยการนำมอดูลเส้นใยกลวงมาต่อแบบอนุกรมกันหรือต่อแบบขนาน อายุการใช้งานค่อนข้างนาน สามารถคืนสภาพเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [9, 18-21]



รูปที่ 1 มอดูลเส้นใยกลวง [22]

จากที่ได้กล่าวถึงประโยชน์ของกรดแลคติกในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ ทั้งอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกชีวภาพและด้านอุตสาหกรรมยาและอาหาร รวมทั้งข้อดีของเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกและประสิทธิภาพของระบบการแยกด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง จึงเป็นแรงจูงใจของงานวิจัยนี้ที่จะศึกษาการใช้เยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกร่วมกับตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงสำหรับแยกและนำกลับกรดแลคติกออกจากสารละลายน้ำ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กระบวนการนี้สำหรับการแยกและการทำบริสุทธิ์กรดแลคติกที่ได้จากกระบวนการหมักทางชีวภาพต่อไป

2. สมการที่เกี่ยวข้องกับการสกัดกรดแลคติกและการถ่ายโอนมวล

2.1 เปอร์เซ็นต์การสกัดและเปอร์เซ็นต์การนำกลับ สามารถหาได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\% \, Extraction = \frac{C_{f,in} - C_{f,out}}{C_{f,in}} \times 100 \tag{1}$$

$$\% \, Stripping = \frac{C_{s,out}}{C_{f,in}} \times 100 \tag{2}$$

เมื่อ

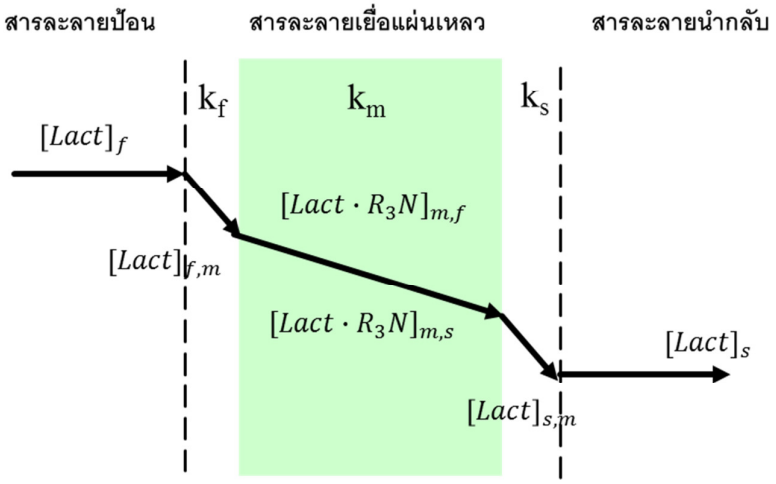
$C_{f,in}$ = ความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ต้องการในสารละลายป้อนขาเข้า (mol/L)

$C_{f,out}$ = ความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ต้องการในสารละลายป้อนขาออก (mol/L)

$C_{s,out}$ = ความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ต้องการในสารละลายนำกลับขาออก (mol/L)

2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของกรดแลคติก

ขั้นตอนของการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงของไอออนกรดแลคติกแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การถ่ายโอนมวลของไอออนกรดแลคติกผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง [22]

เมื่อ

$[Lact]_f$ = ความเข้มข้นของไอออนกรดแลคติกในวัฏภาคสารละลายป้อน (mol/L)

$[Lact]_{f,m}$ = ความเข้มข้นของไอออนกรดแลคติกที่ชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (mol/L)

$[Lact \cdot R_3N]_{m,f}$ = ความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อนของกรดแลคติกที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (mol/L)

$[Lact \cdot R_3N]_{m,s}$ = ความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อนของกรดแลคติกที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ (mol/L)

$[Lact]_{s,m}$ = ความเข้มข้นของไอออนกรดแลคติกที่ชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ (mol/L)

$[Lact]_s$ = ความเข้มข้นของไอออนกรดแลคติกในวัฏภาคสารละลายนำกลับ (mol/L)

k_f = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอออนกรดแลคติกผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (cm/s)

k_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลไอออนเชิงซ้อนของกรดแลคติกในวัฏภาคภาคเยื่อแผ่นเหลว (cm/s)

k_s = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอออนกรดแลคติกผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ (cm/s)

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของกรดแลคติกผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (k_f) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และความสัมพันธ์ของ Sherwood-Graetz [23] ดังสมการที่ (4) - (5) โดยที่ m = 1.62 และ n = 0.33 เป็นค่าคงที่ที่ประมาณโดย Lévêque ซึ่งใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของของไหลในท่อเส้นใยกลวง [24–27]

$$Sh = \frac{k_f r_i}{D_f} \tag{3}$$

$$Sh = mGz^n \tag{4}$$

$$Gz = \frac{r_i{}^2 v}{LD_f} \tag{5}$$

เมื่อ

D_f = สัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดแลคติกในสารละลายป้อน (cm^2/s) ซึ่งคำนวณได้จากสมการของ Wilke-Chang [28–29]

Gz = Graetz number

k_f = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของกรดแลคติกผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (cm/s)

L = ความยาวของเส้นใยกลวง (cm)

r_i = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (cm)

Sh = Sherwood number

v = ความเร็วของสารละลายป้อนภายในท่อ (cm/s)

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอออนเชิงซ้อนของกรดแลคติกในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (k_m) คำนวณได้จากสมการที่ (6) [30]

$$k_m = \frac{\varepsilon D_m}{\tau^2 r_i \ln(r_o/r_i)} \tag{6}$$

เมื่อ

D_m = สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนกรดแลคติกในวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (cm^2/s) ซึ่งคำนวณได้จากสมการของ Wilke-Chang [28–29]

k_m = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอออนเชิงซ้อนของกรดแลคติกในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (cm/s)

r_i = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (cm)

r_o = รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (cm)

ε = ความพรุนของเส้นใยกลวง (Porosity)

τ = ความคดเคี้ยวของเส้นใยกลวงในมอดูล (Tortuosity)

สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอออนเชิงซ้อนของกรดแลคติกผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ (k_s) คำนวณได้จากสมการที่ (7) และความสัมพันธ์ของ Sherwood number (Sh) Reynolds number (Re) และ Schmidt number (Sc) ซึ่งอ้างอิงจากผลงานวิจัยของ Schöner และคณะ (1998) [31]

$$Sh = \frac{k_s\left|(d_o^2-d_i^2-4Nr_o^2)\right|}{2D_sNr_o} \quad (7)$$

เมื่อ

D_s = สัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดแลคติกในวัฏภาคสารละลายำกลับ (cm^2/s) ซึ่งคำนวณได้จากสมการของ Wilke-Chang [28–29]

d_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของมอดูลเส้นใยกลวง (cm)

d_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของมอดูลเส้นใยกลวง (cm)

k_s = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอออนเชิงซ้อนของกรดแลคติกผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ (cm/s)

N = จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล (เส้น)

r_o = รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (cm)

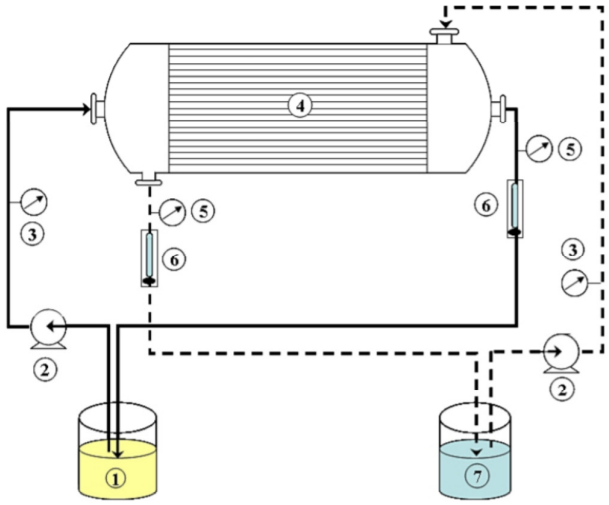
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลที่คำนวณได้จะบ่งชี้ขั้นตอนควบคุมการถ่ายโอนมวล (Mass transfer controlling step) ซึ่งพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล 3 ขั้นตอน คือ การถ่ายโอนมวลผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว การถ่ายโอนมวลผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และการถ่ายโอนมวลผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของขั้นตอนใดมีค่าน้อยที่สุด ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นตอนควบคุมการถ่ายโอนมวล

3. การทดลอง

การศึกษาการสกัดกรดแลคติกด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งลักษณะสมบัติของมอดูลเส้นใยกลวงแสดงดังตารางที่ กำหนดให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อ (Tube side) และสวนทางกับสารละลายนำกลับที่ไหลในฝั่งเปลือก (Shell side) ด้วยอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เท่ากันที่ 100 mL/min โดยมีรูปแบบการไหลเป็นแบบไหลวน แสดงดังรูปที่ 3 โดยใช้เวลาในการปฏิบัติการ 90–120 นาที [22]

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของมอดูลเส้นใยกลวง [9]

สมบัติ	ชนิด/ขนาด
วัสดุเส้นใยกลวง	พอลิโพรพิลีนชนิดมีรูพรุน
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 μm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 μm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของมอดูลเส้นใยกลวง	2.2 cm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของมอดูลเส้นใยกลวง	4.67 cm
ความยาวเส้นใยกลวง	15 cm
จานวนเส้นใยกลวง	35,000 เส้น
ความพรุนของเส้นใยกลวง	30%
ความคดเคี้ยวของเส้นใยกลวง	2.6
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m^2 (15.2 ft^2)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 cm^2/cm^3 (74.4 cm^2/cm^3)
ขนาดของมอดูล (เส้นผ่านศูนย์กลาง × ความยาว)	6.3 cm x 20.3 cm (2.5 inch x 8 inch)
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 kg/cm^2 (60 psi)
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1-60 °C



รูปที่ 3 การสกัดกรดแลคติกผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง
1) ภาชนะบรรจุสารละลายป้อน 2) ปั๊ม 3) มาตรวัดความดันขาเข้า 4) มอดูลเส้นใยกลวง
5) มาตรวัดความดันขาออก 6) มาตรวัดอัตราการไหล และ 7) ภาชนะบรรจุสารละลายนำกลับ [9]

การเตรียมสารละลายต่าง ๆ เริ่มจากเตรียมสารละลายป้อนของกรดแลคติก ความเข้มข้น 0.1 mol/L ปริมาตร 3,000 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นเตรียมของเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่เป็นสารละลายผสมของสารสกัดไอออนิก ได้แก่ สารสกัดชนิดกรด (2-Ethylhexyl phosphate) และสารสกัดชนิดเบส (Aliquat 336, Alamine 336 และ Trioctylamine) ที่ความเข้มข้น 5–7% (v/v) ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน ปริมาตร 2,000 mL และเตรียมสารละลายนำกลับ ได้แก่ น้ำปราศจากไอออน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 mol/L ปริมาตร 3,000 mL ในการทดลองแต่ละปัจจัยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งขั้นตอนอย่างละเอียดของการสกัดด้วยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยของ อัจฉรา ไชยยา (2556) [37] ฑรรชนก ประภาสวัสดิ์ (2558) [9] และ พรหมมาศ โรจน์วีระพันธ์ และ พัชริดา แปลงไร่ (2559) [22]

การหาปริมาณกรดแลคติกในสารละลายป้อนขาออกและในสารละลายนำกลับขาออกจากมอดูลเส้นใยกลวงสามารถวิเคราะห์อย่างง่ายด้วยการไทเทรตโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 mol/L โดยทำการวิเคราะห์ซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง [22]

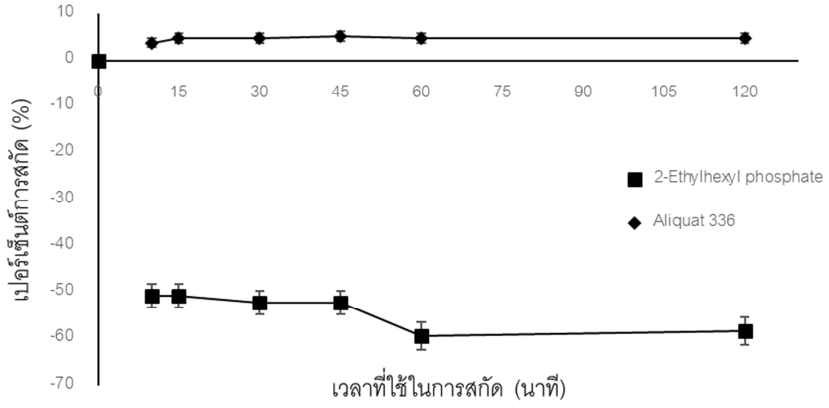
4. ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 การเลือกชนิดของสารสกัดไอออนิกต่อการสกัดกรดแลคติกด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ในการเลือกชนิดของสารสกัดไอออนิกศึกษาโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายก่อน เพื่อให้ทราบแนวโน้มของการสกัดกรดแลคติกและนำไปใช้ทดลองในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงในหัวข้อถัดไป จากการศึกษาชนิดของสารสกัดไอออนิกชนิดกรด 2-Ethylhexyl phosphate และสารสกัดไอออนิกชนิดเบส

Aliquat 336 ด้วยวิธีการสกัดตัวทำละลาย ที่ความเข้มข้น 5% (v/v) ในตัวทำละลายโทลูอีน โดยใช้ปริมาตรของสารสกัดไอออนิกชนิดละ 200 mL และสารละลายกรดแลคติกที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 mol/L ค่า pH เท่ากับ 1.95 ปริมาตร 200 mL [22] พบว่าสารสกัด Aliquat 336 ซึ่งเป็นสารสกัดไอออนิกชนิดเบสที่ประกอบด้วยเกลือของเอมีนชนิดจตุรภูมิเหมาะสมต่อการสกัดกรดแลคติก เพราะสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ และไม่สลายตัวเมื่อได้รับความร้อน [32]

นอกจากนี้ จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดด้วยการใช้สารสกัดไอออนิกชนิดกรด 2-Ethylhexyl phosphate มีค่าติดลบเนื่องจากความเข้มข้นของกรดในวัฏภาคของสารละลายน้ำหลังจากการทดลองเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีสาเหตุจากปัจจัย 3 ประการ ดังนี้ 1.สารสกัด 2-Ethylhexyl phosphate เป็นสารสกัดชนิดกรด ซึ่งสารสกัดชนิดนี้เมื่อละลายในตัวทำละลายจะแตกตัวให้ไอออนที่มีประจุลบเช่นเดียวกับกรดแลคติก ดังนั้นจึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนได้ 2.โครงสร้างของสารสกัด 2-Ethylhexyl phosphate มีหมู่ไฮดรอกซิล 2 ตำแหน่ง จึงทำให้สารสกัด 2-Ethylhexyl phosphate บางส่วนละลายเข้าสู่วัฏภาคของสารละลายน้ำ 3.การปั่นกวนในขณะทำการทดลองเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์กับวัฏภาคของสารละลายน้ำทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลของสารสกัดไปยังวัฏภาคของสารละลายน้ำ ดังนั้นสารสกัด 2-Ethylhexyl phosphate ซึ่งเป็นสารสกัดชนิดกรดไม่เหมาะสำหรับการสกัดกรดแลคติก ขณะที่การสกัดกรดแลคติกด้วยสารสกัดชนิดเบส Aliquat 336 สามารถสกัดไอออนของกรดแลคติกได้ดีกว่า เนื่องจากสารสกัด Aliquat 336 เป็นสารสกัดชนิดเบสของเกลือเอมีนชนิดจตุรภูมิ จึงสามารถทำปฏิกิริยากับกรดแลคติกที่ไม่แตกตัว (Undissociated lactic acid) ด้วยการสร้างพันธะไฮโดรเจน และยังทำปฏิกิริยากับกรดแลคติกแตกตัว (Dissociated lactic acid) ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนลบและไอออนคลอไรด์ได้อีก [9, 33–35]

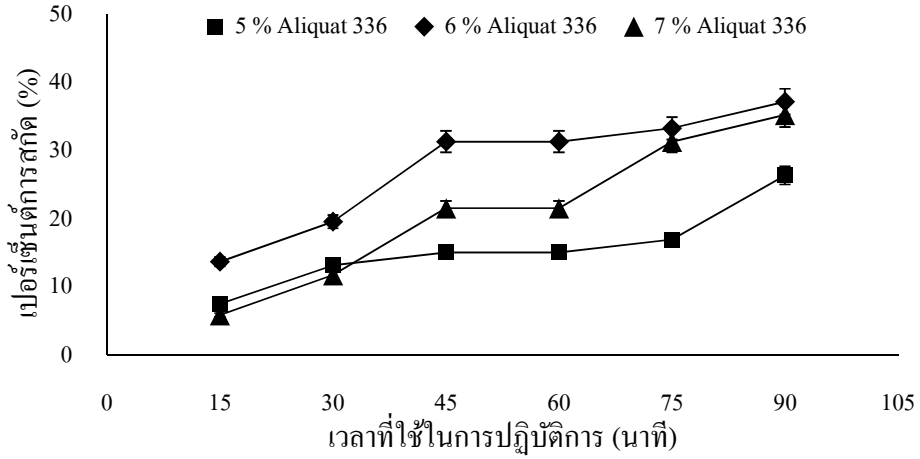


รูปที่ 4. การสกัดกรดแลคติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดแลคติก 0.1 mol/L โดยใช้สารสกัดชนิดกรด 2-Ethylhexyl phosphate และสารสกัดชนิดเบส Aliquat 336 ที่ความเข้มข้น 5 % (v/v) ในตัวทำละลายโทลูอีน และเวลาการสกัด 0 – 120 นาที

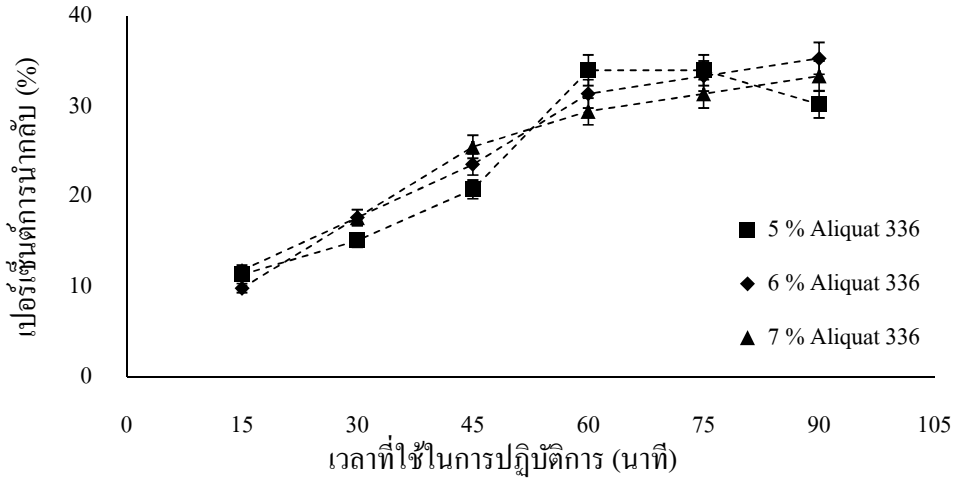
4.2 ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในตัวทำละลายโทลูอีน

จากการศึกษาชนิดของสารสกัดไอออนิกด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายในหัวข้อ 3.1 พบว่าสารสกัด Aliquat 336 ในตัวทำละลายโทลูอีนสามารถกรดแลคติกได้ ดังนั้น ในหัวข้อนี้และหัวข้อถัดไปจะศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดกรดแลคติกด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงต่อไป

สำหรับการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสกัดไอออนิก Aliquat 336 ในตัวทำละลายโทลูอีนต่อการสกัดกรดแลคติกด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนของกรดแลคติกกับ 0.1 mol/L ค่า pH เท่ากับ 1.95 และใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายนำกลับ จากรูปที่ 5 – 6 พบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดและเปอร์เซ็นต์การนำกลับกรดแลคติกโดยรวมแปรผันตามความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ ที่อธิบายว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด ปฏิกิริยาจะไปข้างหน้ามากขึ้น [36–37] และสังเกตได้ว่าที่ความเข้มข้นของ Aliquat 336 เท่ากับ 6% (v/v) สามารถสกัดกรดแลคติกได้สูงสุดเท่ากับ 35.29% และนำกลับกรดแลคติกได้สูงสุดเท่ากับ 33.33% และเมื่อความเข้มข้นของ Aliquat 336 สูงกว่า 6% (v/v) การสกัดและนำกลับกรดแลคติกจะลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดสูงขึ้น ความหนืดของเยื่อแผ่นเหลวจะสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Stokes-Einstein [38] จึงทำให้เกิดความต้านทานการแพร่ของไอออนเชิงซ้อนระหว่างกรดแลคติกและ Aliquat 336 ที่จะผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สัมประสิทธิ์การแพร่จึงลดลงเพราะเป็นส่วนกลับกับความหนืด



รูปที่ 5 ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในตัวทำละลายโทลูอีนต่อการสกัดกรดแลคติก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดแลคติก 0.1 mol/L โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายนำกลับ และเวลาในการสกัด 0 – 90 นาที



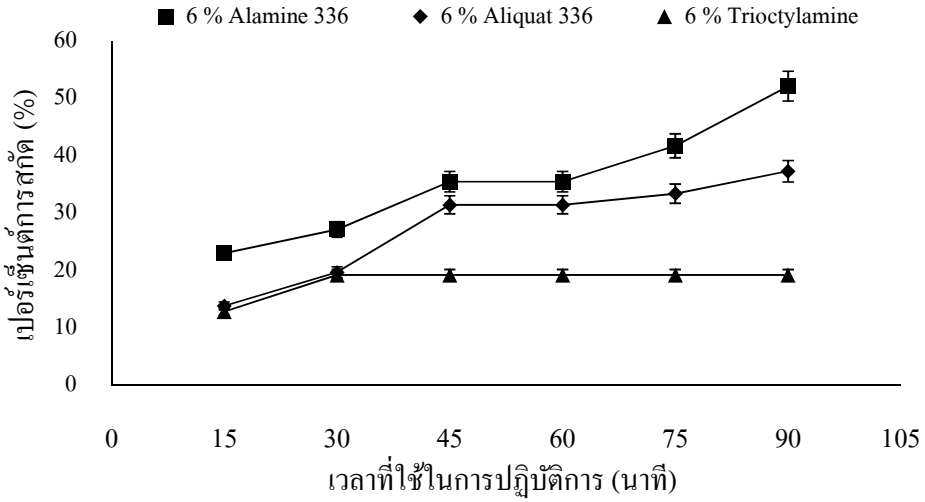
รูปที่ 6 ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในตัวทำละลายโทลูอีน ต่อการนำกลับกรดแลคติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 mol/L โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายนำกลับ และเวลาในการปฏิบัติการ 0 – 90 นาที

4.3 ชนิดของสารสกัดไอออนิกชนิดเบส

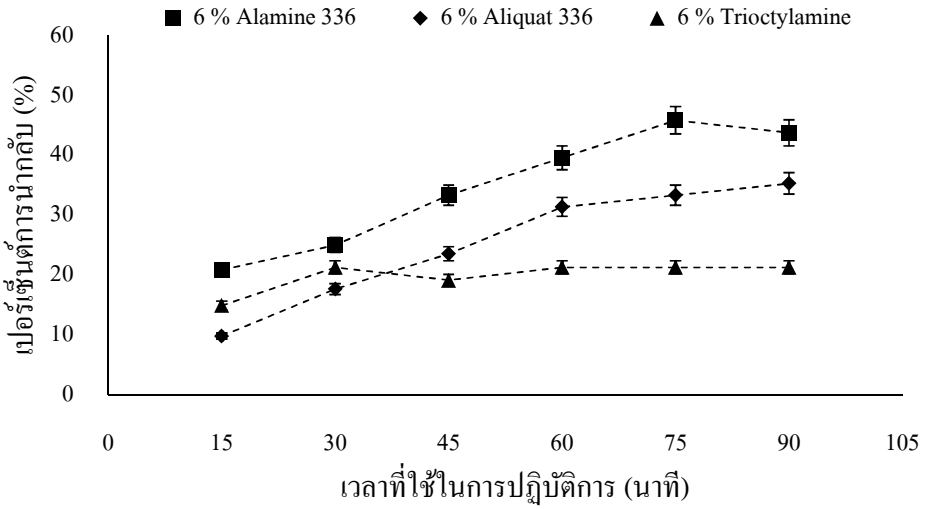
การศึกษาการสกัดกรดแลคติกด้วยสารสกัดไอออนิกชนิดเบส ได้แก่ สารสกัดเบสชนิดตติยภูมิ คือ สารสกัด Alamine 336 และสารสกัด Trioctylamine และสารสกัดเบสชนิดจตุรภูมิ คือ Aliquat 336 ที่ความเข้มข้นที่เท่ากันเท่ากับ 6% (v/v) กำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนของกรดแลคติกกับ 0.1 mol/L ค่า pH เท่ากับ 1.95 และใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายนำกลับ จากรูปที่ 7–8 พบว่าที่เวลา 90 นาที การใช้สารสกัด Alamine 336 ในตัวทำละลายโทลูอีน สามารถสกัดกรดแลคติกได้สูงกว่าสารสกัดไอออนิก Aliquat 336 และสารสกัด Trioctylamine โดยมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเท่ากับ 52.08, 37.25 และ 25.92 ตามลำดับ เช่นเดียวกับการสกัดสารสกัด Alamine 336 สามารถทำให้เปอร์เซ็นต์การนำกลับกรดแลคติกสูงกว่าสารสกัด Aliquat 336 และสารสกัด Trioctylamine ที่เวลาในการปฏิบัติการ 75 นาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับเท่ากับ 45.83, 31.37 และ 21.28 ตามลำดับ

เนื่องจากสารละลายป้อนของกรดแลคติดมีค่า pH เท่ากับ 1.95 ซึ่งน้อยกว่าค่าการแตกตัวของกรดแลคติก คือที่ pK_a เท่ากับ 3.86 ที่อุณหภูมิ 25°C จึงทำให้สารละลายกรดแลคติกอยู่ในรูปของกรดแลคติกที่ไม่แตกตัว (Undissociated lactic acid) ทำให้สารสกัด Alamine 336 ซึ่งเป็นสารสกัดเบสชนิดตติยภูมิสามารถสกัดกรดแลคติกได้ด้วยการการสร้างพันธะไฮโดรเจน [9] นอกจากนี้ยังพบว่า TOA ซึ่งเป็นสารสกัดเบสชนิดตติยภูมิให้เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับน้อยที่สุดเนื่องจากโครงสร้างมีสายโซ่ตรงสั้นที่สุดซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Y. K. Hong และ W. H. Hong (1999) ที่ศึกษาการสกัดกรดคาร์บอกซิลิกด้วยสารสกัดผสมของสารสกัดเอมีนตติยภูมิโดยวิธีการสกัดแบบตัวทำละลายที่กล่าวว่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวจะสูงขึ้นตามความยาวของโซ่ตรงของสารสกัด

เอมีน [39] ซึ่งในการศึกษาของบทความนี้สามารถเรียงความยาวของโซ่ตรงของสารสกัดเอมีน ได้ดังนี้ Alamine 336 > Aliquat 336 > TOA



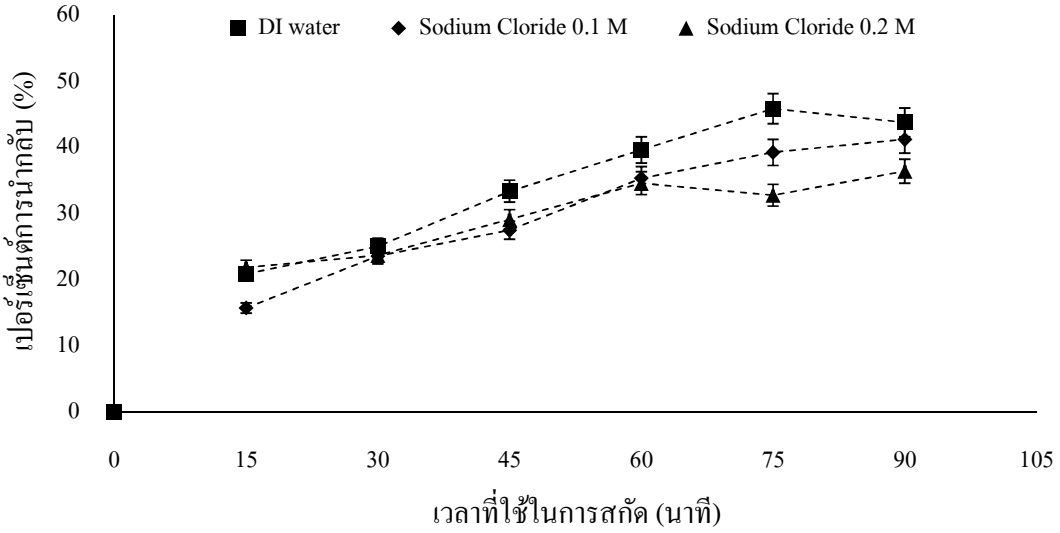
รูปที่ 7 ชนิดของสารสกัดที่ความเข้มข้นของสารสกัด 6% (v/v) ในตัวทำละลายโทลูอีนต่อการสกัดกรดแลคติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 mol/L โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายนำกลับ และเวลาในการปฏิบัติการ 0 - 90 นาที



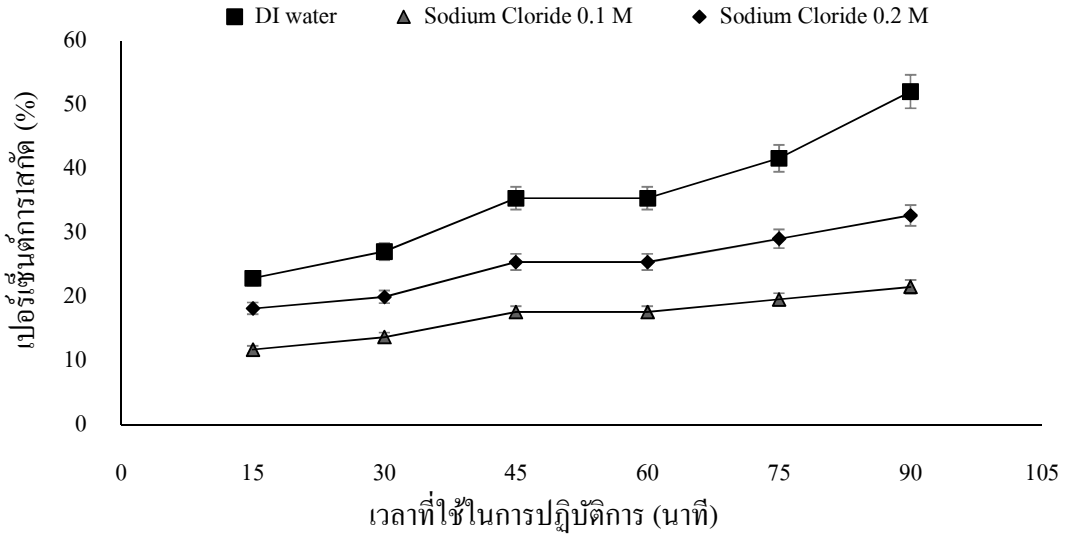
รูปที่ 8 ชนิดของสารสกัดที่ความเข้มข้นของสารสกัด 6% (v/v) ในตัวทำละลายโทลูอีนต่อการนำกลับกรดแลคติกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 mol/L โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายนำกลับ และเวลาในการปฏิบัติการ 0 - 90 นาที

4.4 ชนิดของสารละลายนำกลับ

ชนิดของสารละลายนำกลับที่ศึกษา ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (ความเข้มข้น 0.1 และ 0.2 mol/L) และน้ำปราศจากไอออน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายกรดแลคติก 0.1 mol/L โดยใช้สารสกัด Alamine 336 ที่ความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรละลายในตัวทำละลายโทลูอีน และใช้เวลาในการปฏิบัติการ 0 – 90 นาที พบว่าโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 และความเข้มข้น 0.2 mol/L และน้ำปราศจากไอออนสามารถนำกลับกรดแลคติกได้ 41.18, 36.36 และ 43.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 9 ซึ่งอธิบายได้ว่า โซเดียมคลอไรด์เมื่ออยู่ในสารละลายจะแตกตัวจะได้ Na^+ และ Cl^- โดยที่ Cl^- ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับกรดแลคติกได้ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน แต่จะทำปฏิกิริยากับสารสกัด Alamine 336 ซึ่งเป็นสารประกอบเอมีนชนิดตติยภูมิ กลายเป็นสารสกัดของเกลือเอมีนชนิดจตุรภูมิซึ่งทำให้เยื่อแผ่นเหลวมีความเสถียรมากขึ้น จึงทำให้นำกลับกรดแลคติกได้น้อย นอกจากนี้ชนิดของสารละลายนำกลับยังส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดด้วย ซึ่งจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดกรดแลคติกที่ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารละลายนำกลับนั้นมีเปอร์เซ็นต์ในการสกัดกรดแลคติกสูงกว่าการใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายนำกลับ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับกรดแลคติก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 mol/L โดยใช้สารสกัด Alamine 336 ที่ความเข้มข้น 6% (v/v) ในตัวทำละลายโทลูอีนและเวลาในการปฏิบัติการ 0 - 90 นาที



รูปที่ 10 ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการสกัดกรดแลคติก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 mol/L โดยใช้สารสกัด Alamine 336 ที่ความเข้มข้น 6% (v/v) ในตัวทำละลายโทลูอีน และเวลาในการปฏิบัติการ 0 - 90 นาที

4.5 ค่าคงที่เกี่ยวกับการถ่ายโอนมวลของไอออนกรดแลคติก

ค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวกับการถ่ายโอนมวลของการสกัดไอออนกรดแลคติกผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวกับการถ่ายโอนมวลของไอออนกรดแลคติก

ค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล	ค่าที่ได้	หน่วย
สัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลายป้อน (D_f)	3.64×10^{-5}	cm^2/s
สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนเชิงซ้อนในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (D_m)	7.43×10^{-5}	cm^2/s
สัมประสิทธิ์การแพร่ในสารละลายนำกลับ (D_s)	4.26×10^{-5}	cm^2/s
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคสารละลายป้อน (k_f)	1.27×10^{-4}	cm/s
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอออนเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (k_m)	3.20×10^{-3}	cm/s
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในวัฏภาคสารละลายนำกลับ (k_s)	2.22×10^{-3}	cm/s

จากตารางที่ 1 สรุปได้ว่าการแพร่ของไอออนกรดแลคติกผ่านวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนควบคุมการถ่ายโอนมวล (Mass transfer controlling step) ของการสกัดและนำกลับกรดแลคติกผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลใน

วัฏภาคสารละลายป้อน เท่ากับ 1.27×10^{-4} cm/s เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่มีการถ่ายโอนมวลช้าที่สุดเมื่อเทียบกับการถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนผ่านชั้นฟิล์มของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และการถ่ายเทมวลของไอออนกรดแลคติกเข้าสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับ และใช้ความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration gradient) ที่สภาวะก่อนสิ้นสุดกระบวนการเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force)

5. สรุป

การศึกษาการสกัดกรดแลคติกผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง ที่กำหนดรูปแบบการปฏิบัติการเป็นแบบไหลวนและให้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกันที่อัตราการไหล 100 mL/min สรุปได้ว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสังเคราะห์ของกรดแลคติกในสารละลายป้อน 0.1 mol/L โดยใช้สารสกัด Alamine 336 ที่ความเข้มข้น 6% (v/v) ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน ใช้สารละลายนำกลับคือ น้ำปราศจากไอออนและใช้เวลาในการปฏิบัติการ 90 นาที เป็นภาวะเหมาะสมที่สามารถสกัดกรดแลคติกจากสารละลายป้อนกรดแลคติกสังเคราะห์ได้ประมาณ 52% และสามารถนำกลับกรดแลคติกได้ประมาณ 44% นอกจากนี้การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของกรดแลคติกในวัฏภาคสารละลายป้อน (k_f) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของไอออนเชิงซ้อนกรดแลคติกในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (k_m) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของกรดแลคติกในวัฏภาคสารละลายนำกลับ (k_s) มีค่าเท่ากับ 1.27×10^{-4}, 3.20×10^{-3} และ 2.22×10^{-3} cm/s ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าการแพร่ของกรดแลคติกผ่านวัฏภาคสารละลายป้อนเป็นขั้นตอนควบคุมการถ่ายโอนมวล (Mass transfer controlling step) ของการสกัดและนำกลับกรดแลคติก

แม้ว่าผลที่ได้จากการศึกษานี้ยังให้การสกัดและการนำกลับน้อยกว่างานวิจัยอื่นแต่สามารถพัฒนาต่อยอดการสกัดกรดแลคติกด้วยการใช้เยื่อแผ่นเหลวไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงได้ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดไอออนิก หรือการใช้สารสกัดผสมตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป (การสกัดแบบเสริมฤทธิ์, Synergistic extractant) เป็นต้น และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแยกอื่น ๆ กระบวนการนี้ใช้สารเคมีและพลังงานน้อย สามารถสกัดและนำกลับได้พร้อมกันในขั้นตอนเดียวเมื่อเทียบกับวิธีการแยกด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange resin) ในงานวิจัยของ X. Cao และคณะ (2002) ที่ให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ (Yield) เท่ากับ 86.2 แต่ต้องปรับสภาพของสารละลายป้อนด้วยเบสให้มีค่า pH เท่ากับ 5 และต้องใช้สารละลายกรดเข้มข้นในการล้างกรดแลคติกออกหลังการแยก [8] หรือการสกัดด้วยวิธีตัวทำละลายที่ต้องใช้ปริมาณสารเคมีมากและไม่สามารถสกัดและนำกลับได้พร้อมกัน หรือการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นแบบอิมัลชัน ที่ต้องใช้สารเคมีหลายชนิด เช่น สารอิมัลซิไฟเออร์ สารละลายบัฟเฟอร์ เพื่อเพิ่มความเป็นอิมัลชันให้กับสารละลายเยื่อแผ่น [40] เป็นต้น

นอกจากนี้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงสามารถประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมอาหารและยาได้โดย 1) เพิ่มจำนวนของมอดูลเส้นใยกลวงโดยการต่อแบบอนุกรมหรือแบบขนานเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการแยก และ 2) เพิ่มจำนวนรอบของการไหลวนเพื่อเพิ่มเวลาสัมผัส (Resident time) [9, 37]

เอกสารอ้างอิง

[1] L.B. Lockwook, "Lactic acid," Annals of the New York Academy of Science, Vol. 119, 1965, pp. 354-867.

[2] J.H. Litchfield, "Microbiological production of lactic acid," Advances in Applied Microbiology, Vol. 42, 1996, pp. 45-95.

[3] J. Yang, J.N. Tan and Y. Gu, "Lactic acid as an invaluable bio-based solvent for organic reactions," Green Chemistry, Vol. 14, 2012, pp. 3304-3317.

[4] R. Datta, S.P. Tsai, P. Bonsignor, S. Moon and J. Frank, "Technological and economical potential of polylactic acid and lactic acid derivatives," FEMS Microbiology Reviews, Vol. 16, 1995, pp. 221-231.

[5] I.S. Udachan and A.K. Sahoo, "A study of parameters affecting the solvent extraction of lactic acid from fermentation broth," Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 31, No. 03, 2014, pp. 821-827.

[6] R. Kumar, S.M. Mahajani, H. Nanavati and S.B. Noronha, "Recovery of lactic acid by batch reactive distillation," Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Vol. 81, 2006, pp. 1141-1150.

[7] M. Hongo, Y. Nomua and M. Iwahara, "Novel method of lactic acid production by electrodialysis fermentation," Applied and Environmental Microbiology Journal, Vol. 52, 1986, pp. 314-319.

[8] X. Cao, H.S. Yun and Y.M. Koo, "Recovery of L-(+)-lactic acid by anion exchange resin Amberlite IRA-400," Biochemical Engineering Journal, Vol. 11, 2002, pp.189-196.

[9] ฑรรชนก ประภาสวัสดิ์, "การแยกอิแนนทิโอเมอร์และการถ่ายเทมวลของกรดแลคติกและฟีนิลอะลานีนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ประเทศไทย, 2558.

[10] R. Abejón, J. Rabadán, S. Lanza, A. Abejón, A. Garea and A. Irabien, "Supported ionic liquid membranes for separation of lignin aqueous solutions," Processes, Vol. 6, No. 143, 2018, pp. 1-18.

[11] M. Freemantle, An introduction to ionic liquids, RSC Pub, Cambridge, 2010.

[12] T. Welton, "Room-temperature ionic liquids, solvents for synthesis and catalysis," Chemical Reviews, Vol. 99, No. 8, 1999, pp. 2071-2083.

[13] N.L. Mai and Y.M. Koo, "Computer-aided design of ionic liquids for high cellulose dissolution," ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Vol. 4, No. 2, 2016, pp. 541-547.

[14] เปรียว เอี่ยมละมัย, "มาทำความรู้จักกับของเหลวไอออนิกกันเถอะ," วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 79, 2558, หน้า 71-77.

[15] Z.F. Cui and H.S. Muralidhara, Membrane technology: A Practical Guide to Membrane Technology and Applications in Food and Bioprocessing, 1 st edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2010.

[16] P. Dzygiel and P.P. Wieczorek, "Supported Liquid Membranes and Their Modifications: Definition, Classification, Theory, Stability, Application and Perspectives," In Liquid Membrane: Principles & Applications in Chemical Separation & Wastewater Treatment, V.S. Kislik (Ed.), Elsevier, Oxford, 2010, pp. 73-140.

[17] L.J. Lozano, C. Godínez, A.P. de los Ríos, F.J. Hernández-Fernández, S. Sánchez-Segado and F.J. Alguacil, "Recent advances in supported ionic liquid membrane technology," Journal of Membrane Science, Vol. 376, No. 1-2, 2011, pp. 1-14.

[18] A.W. Lothongkum, U. Pancharoen and T. Prapasawat, "Treatment of Heavy Metals from Industrial Wastewaters Using Hollow Fiber Supported Liquid Membrane," In Water Treatment Processes, K. Demadis (Ed.), Nova Science Publishers, Inc., New York, 2011, pp. 1-34.

[19] A.W. Lothongkum, U. Pancharoen and T. Prapasawat, "Roles of Facilitated Transport Through HFSLM in Engineering Applications," In Mass Transfer in Chemical Engineering Processes, J. Markoš (Ed.), InTech Publisher, Rijeka, 2011, pp. 177-204.

[20] U. Pancharoen, S. Somboonpanya, S. Chaturabul and A.W. Lothongkum, "Selective removal of mercury as $HgCl_4^{2-}$ from natural gas well produced water by TOA via HFSLM," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 489, No. 1, 2010, pp. 72-79.

[21] T. Prapasawat, P. Ramakul, C. Satayaprasert, U. Pancharoen and A.W. Lothongkum, "Separation of As(III) and As(V) by hollow fiber supported liquid membrane based on the mass transfer theory," Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 25, No. 1, 2008, pp. 158-163.

[22] พรหมมาศ โรจน์วีระพันธ์ และ พัชริดา แปลงไร่, "การสกัดกรดแลคติกผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบไอออนิกที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง," ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน, ประเทศไทย, 2559.

[23] N.M. Kocherginsky, Q. Yang and L. Seelam, "Recent advances in supported liquid membrane technology," Separation and Purification Technology, Vol. 53, No. 2, 2007, pp. 171-177.

[24] M.A. Lévêque "Les lois de la transmission de chaleur par convection," Annales des Mines, Vol. 13, No. 12, 1928, pp. 201-362.

[25] S.R Wickramasinghe, M.J. Semmens and E.L. Cussler, "Mass-transfer in various hollow fiber geometries," Journal of Membrane Science, Vol. 69, No. 3, 1992, pp. 235-250.

[26] G.R.M. Breembroek, A.V. Straalen, G.J. Witkamp and G.M.V. Rosmalen, "Extraction of cadmium and copper using hollow fiber supported liquid membranes," Journal of Membrane Science, Vol. 146, No. 2, 1998, pp. 85-195.

[27] A. Gabelman and S.T. Hwang, "Hollow fiber membrane contactors," Journal of Membrane Science, Vol. 159, No. 1-2, 1999, pp. 61-106.

[28] C.R. Wilke and P. Chang, "Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions," AIChE, Vol. 1, 1955, pp. 264-270.

[29] V.S. Kislik, "Carrier-Facilitated Coupled Transport through Liquid Membranes: General Theoretical Considerations and Influencing Parameters," In Liquid Membranes Principles and Applications in Chemical Separations and Wastewater Treatment, V.S. Kislik (Ed.), Elsevier, Oxford, 2010, pp. 1-15.

[30] P.Kittisupakorn, W. Weerachaipichaskul and P. Thitiyasook, "Modeling and simulation of copper-ion extraction with hollow fiber supported liquid membrane," Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 13, No. 6, 2007, pp. 903-910.

[31] P. Schöner, P. Plucinski, W. Nitsch and U. Daiminger, "Mass transfer in the shell side of cross flow hollow fiber modules," Chemical Engineering Science, Vol. 53, No. 13, 1998, pp. 2319-2326.

[32] Z. Lazarova and L. Peeva, "Solvent extraction of lactic acid from aqueous solution," Journal of Biotechnology, Vol. 32, No. 1, 1994, pp. 75-82.

[33] S.T. Yang, S.A. White and S.T. Hsu, "Extraction of carboxylic acids with tertiary and quaternary amines: effect of pH," Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 30, No. 6, 1991, pp. 1335-1342.

[34] G. Kyuchoukov, M. Marinova, J. Albet and J. Molinier, "New method for the extraction of lactic acid by means of a modified extractant (Aliquat 336)," Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 43, No. 5, 2004, pp. 1179-1184.

[35] G. Kyuchoukov, D. Yankov, J. Albet and J. Molinier, "Mechanism of lactic acid extraction with quaternary ammonium chloride (Aliquat 336)," Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 44, No. 15, 2005, pp. 5733-5739.

[36] G.D. Kenneth, The Principles of Chemical Equilibrium, 4th edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1981.

[37] อัจฉรา ไชยยา, "การสกัดและนำกลับแอมพิซิลลินโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวง," ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ประเทศไทย, 2556.

[38] M.D. Luccio, B.D. Smith, T. Kida, C.P. Borges and T.L.M. Alves, "Separation of fructose from a mixture of sugars using supported liquid membranes," Journal of Membrane Science, Vol. 174, No. 2, 2000, pp. 217-224.

[39] Y.K. Hong and W.H. Hong, “Reactive extraction of lactic acid with mixed tertiary amine extractants,” Biotechnology Techniques, Vol. 13, No. 12, 1999, pp. 915-918.

[40] F. Garavand, S.H. Razavi and I. Cacciotti, “Synchronized extraction and purification of L-lactic acid from fermentation broth by emulsion liquid membrane technique,” Journal of Dispersion Science and Technology, Vol. 39, No. 9, 2018, pp. 1291-1299.