



รายงานการวิจัย

การแยกและทำบริสุทธิ์กรดซักซินิกจากน้ำหมักโดยกระบวนการนาโนฟิวเตรชัน
(Separation and Purification of Succinic Acid from Fermentation Broth
by nanofiltration process)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร กาญจนทวี

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมวิททย์ จันท๊ะมา

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานนี้เป็นความรับผิดชอบของคณะผู้วิจัยแต่ผู้เดียว

พฤษภาคม 2557



รายงานการวิจัย

การแยกและทำบริสุทธิ์กรดซักซินิกจากน้ำหมักโดยกระบวนการนาโนฟิวเตรชัน
(Separation and Purification of Succinic Acid from Fermentation Broth
by nanofiltration process)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร กาญจนทวี

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมวิททย์ จันท๊ะมา

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานนี้เป็นความรับผิดชอบของคณะผู้วิจัยแต่ผู้เดียว

พฤษภาคม 2557

แบบสรุปผู้บริหาร
(Executive Summary)

1. รายละเอียดเกี่ยวกับงานวิจัย

1.1 รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย

ชื่อโครงการวิจัย:

(ภาษาไทย) การแยกและทำบริสุทธิ์กรดซัคซินิกจากน้ำหมักโดยกระบวนการนาโนฟิวเตรชัน

(ภาษาอังกฤษ) Separation and Purification of Succinic Acid from Fermentation Broth by nanofiltration process

1.2 หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนทร กาญจนทวี

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3 ผู้ร่วมงานวิจัย

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพพ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมวิทย์ จันทะมา

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 งบประมาณ และระยะเวลาทำวิจัย

ได้รับงบประมาณอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2555 ได้รับ 335,000 บาท (สามแสนสามหมื่นห้าพันบาทถ้วน) และงบประมาณอุดหนุนงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2556 ได้รับ 334,000 บาท (สามแสนสี่หมื่นบาทถ้วน) ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี

2. สรุปโครงการวิจัย

การแยกและทำบริสุทธิ์กรดซัคซินิกจากน้ำหมักเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ เนื่องจากต้นทุนในขั้นตอนนี้คิดเป็น 60% ของต้นทุนทั้งหมดของการกระบวนการผลิตกรดซัคซินิกด้วยวิธีการหมัก เนื่องจากน้ำหมักของกรดซัคซินิกที่ได้หลังการหมักนั้นมีสารเจือปนอยู่เป็นจำนวนมากของกรดอินทรีย์ที่เป็นสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ เช่น กรดแอสติค กรดมาลิก กรดไพรูวิก กรดแลคติก และกรดฟอร์มิก เป็นต้น ในขั้นตอนการขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพ เพื่อให้ชิ้นงานมีโครงสร้างที่เป็นผลึกและคุณสมบัติเชิงกลที่ดี จำเป็นต้องใช้กรดซัคซินิกที่มีความบริสุทธิ์สูง (ประมาณร้อยละ 95 ความบริสุทธิ์) ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิธีการแยกและทำบริสุทธิ์กรดซัคซินิกเป็นจำนวนมาก เช่น การแยกด้วยวิธีอิเล็กโตรไดอะไลซิส วิธีการตกตะกอน การแยกด้วยวิธีการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน การแยกด้วยแผ่นเยื่อบาง และการสกัดแบบมีปฏิกิริยา ในการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยสนใจศึกษาการแยกกรดซัคซินิกด้วยกระบวนการนาโนฟิวเตรชัน เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมของประเทศไทย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากน้ำหมักจริงเป็นของผสมที่มีองค์ประกอบหลากหลายชนิดจึงยากต่อการทำความเข้าใจกลไกในถ่ายโอนมวลสารและการแยก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการศึกษากลไกการถ่ายโอนมวลสารและการแยกโดยใช้ น้ำหมักจำลองที่มีองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ใกล้เคียงกับน้ำหมักจริงควบคู่กับการศึกษาในน้ำหมักจริง และศึกษาปัจจัยที่อาจมีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารและการแยกด้วยการกรองแบบนาโนฟิวเตรชันชนิดมีการไหลตายตัว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การกรองน้ำหมักที่มีความเข้มข้นของซัคซิเนต

สูง 0.7M ไพรูเวท 0.12M และแอสซิเตท 0.12M โดยตรงไม่สามารถทำให้เกิดการแยกได้ เนื่องจากขนาดรูพรุนของเยื่อเมมเบรนใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายทั้งสามชนิด จึงไม่สามารถกักกันตัวถูกละลายทั้งสามชนิดได้เลยและไม่ก่อให้เกิดการแยก สมมติฐานแรก คือ การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนให้กับระบบ ปรากฏว่า การเพิ่มความดันไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทมวลสารและการแยก สมมติฐานที่ 2 คือ การเจือจางน้ำหมัก พบว่า การเจือจางน้ำหมักให้ความเข้มข้นของซักซิเนตเหลือ 0.1M ไพรูเวทเหลือ 0.018M และแอสซิเตทเหลือ 0.018M สามารถทำให้เกิดการแยกได้ เนื่องจากซักซิเนตถูกกักกันไว้ในรีเทนเททมากขึ้น ขณะที่ไพรูเวทและแอสซิเตทมีการถ่ายโอนมวลสารไปยังเพอร์มิเอทมากขึ้น ความแตกต่างของการถ่ายโอนมวลสารของซักซิเนตกับไพรูเวทและแอสซิเตทที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการแยกขึ้น โดยหลังการกรองแยกด้วยนาโนฟิวเตรชัน ได้ซักซิเนตที่มีความบริสุทธิ์ 60.5 % และมีค่าร้อยละผลได้ มีค่าเท่ากับร้อยละ 48.4 (สำหรับน้ำหมักจริง)

3. บทคัดย่อ (Abstract)

บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการถ่ายโอนมวลสารและการแยกเกลือของกรดซักซิินิกจากน้ำหมักด้วยกระบวนการนาโนฟิวเตรชัน โดยใช้ชุดการทดลองการกรองแบบไหลตายตัวและเยื่อเมมเบรนชนิดนาโน รุ่น ESNA-1-4040 ซักซิเนตในน้ำหมักถูกผลิตโดยแบคทีเรียสายพันธุ์ *Escherichia coli* KJ122 น้ำหมักประกอบด้วยซักซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown อื่น ๆ การทดลองแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนในช่วง 40 – 60 psi ไม่ส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารของโพแทสเซียมซักซิเนต โพแทสเซียมไพรูเวท และโพแทสเซียมแอสซิเตท ใน Single-solute solution แต่การลดความเข้มข้นของน้ำหมักจำลองทำให้การถ่ายโอนมวลสารของตัวทำละลายทั้งสามชนิดลดลง ส่วนที่ 2 ผลการทดลองของ Binary-solute solution สอดคล้องกับ Single-solute solution ที่สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูง การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนไม่ส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารและการแยก แต่การลดความเข้มข้นของสารละลายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการถ่ายโอนมวลสาร ซักซิเนตถูกกักกันไว้ในรีเทนเทท (ซักซิเนตเข้มข้น 0.1M ไพรูเวทเข้มข้น 0.018M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.018M) มีเพียงไพรูเวทหรือแอสซิเตทที่เกิดการถ่ายโอนมวลสารเพิ่มขึ้น เนื่องจากซักซิเนต ไพรูเวท และแอสซิเตทมีการถ่ายโอนมวลสารที่แตกต่างกันจึงก่อให้เกิดการแยกขึ้น ส่วนที่ 3 ผลการทดลองของ Ternary-solute solution สอดคล้องกับ Single-solute solution และ Binary-solute solution การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนไม่ส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารและการแยก ในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ การถ่ายโอนมวลสารของซักซิเนตลดลง ขณะที่การถ่ายโอนมวลสารของไพรูเวทและแอสซิเตทเพิ่มขึ้น การแยกเกิดขึ้นได้ที่สภาวะที่มีความเข้มข้นต่ำเท่านั้น ส่วนสุดท้าย ผลการทดลองของน้ำหมักจริงสอดคล้องกับผลการทดลองของน้ำหมักจำลอง การแยกเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่น้ำหมักมีความเข้มข้นต่ำเท่านั้น และความบริสุทธิ์และผลได้ของซักซิเนตในน้ำหมักที่ผ่านการกรองมีค่าเท่ากับ 60.5% และ 48.4% ตามลำดับ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

This research aims to study mass transfer and separation of dissociated succinic acid from fermentation broths using nanofiltration process. Dead-end filtration unit and ESNA-1-4040 nanofilter membrane were used. The succinate in fermentation broth was

produced by *Escherichia coli* KJ122. The broth consists of 0.7M succinate, 0.12M pyruvate, 0.12M acetate and unknowns. The experiment was divided into 4 parts. First, increased of transmembrane pressure between 40 to 60 psi in single-solute solution did not affect the mass transfer whereas dilution of simulated fermentation broth increased mass transfer of the three solutes. Second, result in binary-solute solution conforms to those in single-solute solution. At high concentration, the increase of transmembrane pressure did not affect the mass transfer and the separation but decrease of the solute concentration (0.1M succinate, 0.018M pyruvate and 0.018M acetate) affects the mass transfer. It was found that only succinate was retained in retentate whereas pyruvate or acetate was only transferred. The difference in mass transfers resulted in separation to take place. Third, the result in ternary-solute solution was in accordance with those in single-solute solution and binary-solute solution. The increase in the transmembrane pressure did not affect the mass transfer and the separation. In diluted solution, the mass transfer of succinate was increased whereas those of pyruvate and acetate were decreased. The separation occurred only in diluted solution. Finally, the results of mass transfer and the separation in real fermentation broth were in accordance with those the simulated fermentation broths. The results showed that the mass transfer of succinate, pyruvate and acetate were only occurred by lowering the concentration of the solution and the separation occurred only at low concentration of the fermentation broth. The purity and yield of the filtrated fermentation broth were 60.5% and 48.4%, respectively.

การแยกและทำบริสุทธิ์กรดซัคซินิกจากน้ำหมักโดยกระบวนการนาโนฟิวเตรชัน
Separation and Purification of Succinic Acid from Fermentation Broth by
Nanofiltration process

สุนทร กาญจนทวี

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการถ่ายโอนมวลสารและการแยกเกลือของกรดซัคซินิกจากน้ำหมักด้วยกระบวนการนาโนฟิวเตรชัน โดยใช้ชุดการทดลองการกรองแบบไหลตายตัวและเยื่อเมมเบรนชนิดนาโนรู ESNA-1-4040 ซัคซิเนตในน้ำหมักถูกผลิตโดยแบคทีเรียสายพันธุ์ *Escherichia coli* KJ122 น้ำหมักประกอบด้วยซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown อื่น ๆ การทดลองแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก การเพิ่มความดันทรานสมเมเบรนในช่วง 40 – 60 psi ไม่ส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารของโพแทสเซียมซัคซิเนต โพแทสเซียมไพรูเวท และโพแทสเซียมแอสซิเตท ใน Single-solute solution แต่การลดความเข้มข้นของน้ำหมักจำลองทำให้การถ่ายโอนมวลสารของตัวทำละลายทั้งสามชนิดลดลง ส่วนที่ 2 ผลการทดลองของ Binary-solute solution สอดคล้องกับ Single-solute solution ที่สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูง การเพิ่มความดันทรานสมเมเบรนไม่ส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารและการแยก แต่การลดความเข้มข้นของสารละลายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการถ่ายโอนมวลสาร ซัคซิเนตถูกกักกันไว้ในรีเทนเนท (ซัคซิเนตเข้มข้น 0.1M ไพรูเวทเข้มข้น 0.018M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.018M) มีเพียงไพรูเวทหรือแอสซิเตทที่เกิดการถ่ายโอนมวลสารเพิ่มขึ้น เนื่องจากซัคซิเนต ไพรูเวท และแอสซิเตทมีการถ่ายโอนมวลสารที่แตกต่างกันจึงก่อให้เกิดการแยกขึ้น ส่วนที่ 3 ผลการทดลองของ Ternary-solute solution สอดคล้องกับ Single-solute solution และ Binary-solute solution การเพิ่มความดันทรานสมเมเบรนไม่ส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารและการแยก ในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ การถ่ายโอนมวลสารของซัคซิเนตลดลง ขณะที่การถ่ายโอนมวลสารของไพรูเวทและแอสซิเตทเพิ่มขึ้น การแยกเกิดขึ้นได้ที่สภาวะที่มีความเข้มข้นต่ำเท่านั้น ส่วนสุดท้าย ผลการทดลองของน้ำหมักจริงสอดคล้องกับผลการทดลองของน้ำหมักจำลอง การแยกเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่น้ำหมักมีความเข้มข้นต่ำเท่านั้น และความบริสุทธิ์และผลได้ของซัคซิเนตในน้ำหมักที่ผ่านการกรองมีค่าเท่ากับ 60.5% และ 48.4% ตามลำดับ

Separation and Purification of Succinic Acid from Fermentation Broth by

Nanofiltration process

Sunthorn Kanchanatawee

School of Biotechnology, Institute of Agricultural Technology,

Suranaree University of Technology

Abstract

This research aims to study mass transfer and separation of dissociated succinic acid from fermentation broths using nanofiltration process. Dead-end filtration unit and ESNA-1-4040 nanofilter membrane were used. The succinate in fermentation broth was produced by *Escherichia coli* KJ122. The broth consists of 0.7M succinate, 0.12M pyruvate, 0.12M acetate and unknowns. The experiment was divided into 4 parts. First, increased of transmembrane pressure between 40 to 60 psi in single-solute solution did not affect the mass transfer whereas dilution of simulated fermentation broth increased mass transfer of the three solutes. Second, result in binary-solute solution conforms to those in single-solute solution. At high concentration, the increase of transmembrane pressure did not affect the mass transfer and the separation but decrease of the solute concentration (0.1M succinate, 0.018M pyruvate and 0.018M acetate) affects the mass transfer. It was found that only succinate was retained in retentate whereas pyruvate or acetate was only transferred. The difference in mass transfers resulted in separation to take place. Third, the result in ternary-solute solution was in accordance with those in single-solute solution and binary-solute solution. The increase in the transmembrane pressure did not affect the mass transfer and the separation. In diluted solution, the mass transfer of succinate was increased whereas those of pyruvate and acetate were decreased. The separation occurred only in diluted solution. Finally, the results of mass transfer and the separation in real fermentation broth were in accordance with those the simulated fermentation broths. The results showed that the mass transfer of succinate, pyruvate and acetate were only occurred by lowering the

concentration of the solution and the separation occurred only at low concentration of the fermentation broth. The purity and yield of the filtrated fermentation broth were 60.5% and 48.4%, respectively.

Keywords: Nanofiltration, fermentation broth, Succinate, Pyruvate, Acetate



กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้รับทุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2555 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวกิตติยา ศรีบุตร นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ช่วยเหลือและเอื้ออำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ทำการวิจัยและเครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่ให้กำลังใจจนสามารถทำงานวิจัยนี้โดยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้วิจัย

พฤษภาคม 2557



สารบัญเรื่อง

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญเรื่อง.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐานการทดลอง.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กระบวนการผลิตกรดซัลฟอนิกทางชีวภาพ.....	3
2.2 กระบวนการแยกและทำบริสุทธิ์กรดซัลฟอนิกจากน้ำหมัก.....	4
2.3 นาโนฟิวเตรชัน.....	4
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	7

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

3.1 ขั้นตอนและกรอบการวิจัย	7
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	8
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	9
3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	10
3.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้.....	11
3.6 สถานที่ทำการทดลอง.....	13
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	14
4.1 การถ่ายโอนมวลสารใน single-solute solution.....	14
4.2 อิทธิพลของ ionic composition ต่อการถ่ายโอนมวลและการแยกใน binary-solute solution.....	23
4.3 อิทธิพลของ ionic composition ต่อการถ่ายโอนมวลและการแยกใน Ternary-solute solution.....	33
4.4 อิทธิพลของ ionic composition ต่อการถ่ายโอนมวลและการแยกในน้ำหมักจริง.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	45
บรรณานุกรม	47
ภาคผนวก.....	49
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน.....	50
ภาคผนวก ข กราฟโครมาโตแกรม.....	52
ภาคผนวก ค Water permeability.....	54

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการหมักกรดซัคซินิก.....	3
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำหมักจำลองและน้ำหมักจริงที่ใช้ศึกษา.....	8
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของกรดอินทรีย์ที่ใช้ศึกษา.....	9
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเมมเบรนนาโนฟิวเตรชั่นของ GE Power & Water รุ่น ESNA-1-4040.....	9



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนและกรอบการวิจัย	7
รูปที่ 3.2	แผนภาพชุดทดสอบระบบนาโนพิวเทรชันแบบตายตัว.....	10
รูปที่ 4.1	ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมซัลไฟต์ เข้มข้น 0.1M ใน Single-solute solution.....	15
รูปที่ 4.2	ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมซัลไฟต์ เข้มข้น 0.3M ใน Single-solute solution.....	16
รูปที่ 4.3	ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมซัลไฟต์ เข้มข้น 0.7M ใน Single-solute solution.....	17
รูปที่ 4.4	ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมไพรูเวท เข้มข้น 0.12M ใน Single-solute solution.....	18
รูปที่ 4.5	ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมไพรูเวท เข้มข้น 0.018M และ 0.12M ความดันของระบบ 60 psi ใน Single-solute solution.....	19
รูปที่ 4.6	ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมแอสซิเตท เข้มข้น 0.12M ใน Single-solute solution.....	20
รูปที่ 4.7	ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมแอสซิเตท เข้มข้น 0.018M และ 0.12M ความดันของระบบ 60 psi ใน Single-solute solution.....	21
รูปที่ 4.8	ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของ ซัลไฟต์ เข้มข้น 0.7M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M ใน Binary-solute solution.....	23
รูปที่ 4.9	ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Binary-solute solution ที่มีซัลไฟต์เข้มข้น 0.7M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M.....	24

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.10	ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Binary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตเข้มข้น 0.7M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M.....	25
รูปที่ 4.11	ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Binary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตเข้มข้น 0.7M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M.....	26
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนกับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตและไพรูเวท ที่มีความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน.....	27
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนกับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตและแอสซิเตท ที่มีความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน.....	29
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Separation factor กับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตและแอสซิเตท ที่มีความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน.....	30
รูปที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Separation factor กับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตและแอสซิเตท ที่มีความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน.....	31
รูปที่ 4.16	ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Ternary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวท 0.12M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M.....	33
รูปที่ 4.17	ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Ternary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวท 0.12M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M.....	34
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนกับเวลาใน Ternary-solute solution ที่มีซัลฟิเนต ไพรูเวท และแอสซิเตท.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Separation factor กับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซ้กซิเนตและแอสิตเตท ที่มีความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน.....	37
รูปที่ 4.20 ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของตัวถูกละลายในน้ำหมักจริง ที่มีซ้กซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M แอสิตเตทเข้มข้น 0.12M และสารอื่นๆ.....	39
รูปที่ 4.21 ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของตัวถูกละลายในน้ำหมักจริง ที่มีซ้กซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M แอสิตเตทเข้มข้น 0.12M และ สาร unknown อื่นๆ.....	40
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนกับเวลาของตัวถูกละลายในน้ำหมักจริง ที่มีซ้กซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M แอสิตเตทเข้มข้น 0.12M และ สาร unknown อื่นๆ.....	42
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Separation factor กับเวลาของตัวถูกละลายในน้ำหมักจริง ที่มีซ้กซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M แอสิตเตทเข้มข้น 0.12M และสารอื่นๆ.....	43
รูปที่ 1ก กราฟมาตรฐานของซ้กซิเนต.....	50
รูปที่ 2ก กราฟมาตรฐานของแอสิตเตท.....	50
รูปที่ 3ก กราฟมาตรฐานของไพรูเวท.....	51
รูปที่ 1ข กราฟโครมาโตรแกรมของน้ำหมักจริง.....	52
รูปที่ 2ข กราฟโครมาโตรแกรมของน้ำหมักจำลองใน Single-solute solution.....	52
รูปที่ 3ข กราฟโครมาโตรแกรมของน้ำหมักจำลองใน Binary-solute solution.....	53
รูปที่ 4ข กราฟโครมาโตรแกรมของน้ำหมักจำลองใน Ternary-solute solution	53
รูปที่ 1ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซ้กซิเนต เข้มข้น 0.1M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi.....	54

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.1M ใน Single-solute solution ที่ 50 psi.....	54
รูปที่ 3ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.1M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi กลั่น.....	55
รูปที่ 4ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.3M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi.....	55
รูปที่ 5ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.3M ใน Single-solute solution ที่ 50 psi.....	56
รูปที่ 6ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.3M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi.....	56
รูปที่ 7ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi.....	57
รูปที่ 8ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M ใน Single-solute solution ที่ 50 psi.....	57
รูปที่ 9ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi.....	58
รูปที่ 10ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองไพรูเวท เข้มข้น 0.12M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi.....	58
รูปที่ 11ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองไพรูเวท เข้มข้น 0.12M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi.....	59
รูปที่ 12ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองไพรูเวท เข้มข้น 0.018 M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 13ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองแอสซิเตท เข้มข้น 0.018 M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi.....	60
รูปที่ 14ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองแอสซิเตท เข้มข้น 0.12 M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi.....	60
รูปที่ 15ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองแอสซิเตท เข้มข้น 0.018 M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi.....	61
รูปที่ 16ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซึกซิเนต เข้มข้น 0.7M และโพรูเวทเข้มข้น 0.12 M ใน Binary-solute solution ที่ 40 psi.....	61
รูปที่ 17ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซึกซิเนต เข้มข้น 0.7M และโพรูเวทเข้มข้น 0.12 M ใน Binary-solute solution ที่ 60 psi.....	62
รูปที่ 18ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซึกซิเนต เข้มข้น 0.1M และโพรูเวทเข้มข้น 0.018 M ใน Binary-solute solution ที่ 60 psi.....	62
รูปที่ 19ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซึกซิเนต เข้มข้น 0.7M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12 M ใน Binary-solute solution ที่ 40 psi.....	63
รูปที่ 20ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซึกซิเนต เข้มข้น 0.7M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12 M ใน Binary-solute solution ที่ 60 psi.....	63
รูปที่ 21ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซึกซิเนต เข้มข้น 0.1M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.018 M ใน Binary-solute solution ที่ 60 psi.....	64

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 22ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต	
เข้มข้น 0.7M ไพรรูเทเข้มข้น 0.12M และแอซิเตท เข้มข้น 0.12 M ใน	
Ternary-solute solution ที่ 40 psi.....	64
รูปที่ 23ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต	
เข้มข้น 0.7M ไพรรูเทเข้มข้น 0.12M และแอซิเตท เข้มข้น 0.12 M ใน	
Ternary-solute solution ที่ 60 psi.....	65
รูปที่ 24ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต	
เข้มข้น 0.1M ไพรรูเทเข้มข้น 0.018M และแอซิเตท เข้มข้น 0.018 M ใน	
Ternary-solute solution ที่ 60 psi.....	65
รูปที่ 25ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต	
เข้มข้น 0.7M ไพรรูเทเข้มข้น 0.12M และแอซิเตท เข้มข้น 0.12M ในน้ำหมักจริง ที่ 40 psi.....	66
รูปที่ 26ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต	
เข้มข้น 0.7M ไพรรูเทเข้มข้น 0.12M และแอซิเตท เข้มข้น 0.12M ในน้ำหมักจริง ที่ 60 psi.....	66
รูปที่ 27ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต	
เข้มข้น 0.1M ไพรรูเทเข้มข้น 0.018M และแอซิเตท เข้มข้น 0.018M ในน้ำหมักจริง ที่ 60 psi.....	67

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา

กรดซัคซินิกเป็นกรดอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ และอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น นอกจากนี้กรดซัคซินิกกำลังได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นมอนอเมอร์เพื่อผลิตพลาสติกชีวภาพ การผลิตกรดซัคซินิกสามารถทำได้สองวิธีได้แก่ การสังเคราะห์ทางเคมีจากปิโตรเลียมซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ได้มาจากการกลั่นน้ำมันดิบ และกรรมวิธีการหมักจากวัสดุทางการเกษตร ในอดีตกรดซัคซินิกนิยมผลิตจากการสังเคราะห์ทางเคมีแต่เนื่องจากในปัจจุบันน้ำมันมีราคาแพงและเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป ดังนั้นการผลิตกรดซัคซินิกด้วยกรรมวิธีการหมักจากวัสดุทางการเกษตร (เป็นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ของประเทศไทย) จึงได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น (Song และ Lee, 2006)

แต่อย่างไรก็ตาม กรรมวิธีการหมักมีข้อด้อยบางประการนั่นคือน้ำหมักกรดซัคซินิกที่ได้จะมีสารเจือปนหลายชนิดผสมอยู่ เช่น กรดไพรูวิก กรดแอสติค กรดฟอร์มิก และกรดแลคติก เป็นต้น ความบริสุทธิ์ของกรดซัคซินิกมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปเป็นพลาสติกชีวภาพ เช่น โพลีเอสเทอร์ โพลี-เอไมด์ และโพลีเอสเตอร์เอไมด์ ต้องใช้กรดซัคซินิกที่มีความบริสุทธิ์สูง เพราะความบริสุทธิ์จะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่แน่นและมีคุณสมบัติเชิงกลของพลาสติกที่ดี (Bechthold *et al.*, 2008) ในปัจจุบันการแยกและทำบริสุทธิ์กรดซัคซินิกจะอาศัยกระบวนการแยกต่างๆ เช่น กระบวนการอิเล็กโทรไดอะลิซิส (Electrodialysis) ซึ่งต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูง กระบวนการตกผลึก (Precipitation) ซึ่งมีข้อเสียที่มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตต่ำ (%yield) และเกิดของเสียที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น ยิปซัม กระบวนการสกัดเป็นกรรมวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากให้ความบริสุทธิ์ของกรดซัคซินิกสูง ในขั้นตอนของการแยกตัวถูกละลายที่เป็นกรดอินทรีย์หลายตัวออกจากกันนั้นในปัจจุบันมีเพียงวิธีการเดียวคือ การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและการกลั่นสุญญากาศ แล้วตามด้วยการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Joglekar *et al.*, 2006) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาทางเลือกใหม่ที่จะแยกกรดซัคซินิกออกจากกรดอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ โดยใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่นั้นคือ การกรองแบบนาโนฟิวเตรชั่น ซึ่งมีกระบวนการแยกที่ไม่ซับซ้อน ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ใช้สารเคมีน้อย และเป็นการผลิตกรดซัคซินิกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการถ่ายโอนมวลสารของเกลือของกรดซัคซินิก ไพรูวิก และแอสติคในน้ำหมักผ่านเยื่อเมมเบรนชนิดนาโน

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกและการทำบริสุทธิ์เกลือของกรดซัคซินิก ไพรูวิก และแอสติคในน้ำหมัก

1.3 สมมติฐานการทดลอง

เนื่องจากกระบวนการกรองแบบนาโนฟิลเตรชันสามารถแยกสารที่มีประจุหนึ่งลบ เช่น Cl^- และสารที่มีประจุสองลบ เช่น SO_4^{2-} ได้ดี ในสภาวะที่มี pH เป็นกลาง (6.8 – 7.0) ซึ่งในสภาวะที่มีค่า pH เป็นกลาง กรดอินทรีย์ส่วนใหญ่จะสูญเสียโปรตอน กลายเป็นสารละลายที่มีประจุลบภายในโมเลกุล กรดซัลฟอนิกจะกลายเป็นซัลโฟเนตซึ่งมีประจุเป็นสองลบ ส่วนสารอื่นๆ ได้แก่ กรดไพรูวิกและกรดแอสติคกลายเป็นไพรูเวทและอะซิเตทที่มีประจุหนึ่งลบ ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถแยกซัลโฟเนตออกจากเกลือของสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ในน้ำหมักได้ด้วยการกรองแบบนาโนฟิลเตรชัน นอกจากนี้ ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารและการแยกได้แก่ การเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมมเบรนและการเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำหมัก

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 หน่วยทดสอบที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ชุดการทดลองแบบไหลตายตัว (Dead – end unit cell) ขนาด 400 มิลลิลิตร มีใบพัดกวนแม่เหล็กที่ใช้ปรับความเร็วรอบ ทนแรงดันได้ 75 psi (บริษัท Merck ประเทศสหรัฐอเมริกา)

1.4.2 เยื่อเมมเบรนชนิดนาโนที่ใช้ในการศึกษาเป็นเยื่อกรอง รุ่น ESNA-1-4040 (บริษัท GE Water & Osmonic)

1.4.3 กรดอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ กรดซัลฟอนิก กรดไพรูวิก และกรดแอสติค

1.4.4 ชนิดของสารละลายที่ทำการทดลอง ได้แก่ Single solute solution Binary solute solution Ternary solute solution และน้ำหมักจริง

1.4.5 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบวัดได้จากอัตราการไหลของสารละลายอย่างผ่านเยื่อกรองต่อหน่วยพื้นที่ และความสามารถในการกักกันสารโดยนาโนฟิลเตรชันที่มีการดำเนินระบบในการไหลแบบตายตัว

1.4.6 ปัจจัยอิสระที่ทำการศึกษา ได้แก่ อิทธิพลของความดันทรานสมเมมเบรนและความเข้มข้นของสารละลาย และปัจจัยควบคุมได้แก่ รักษาค่า pH ของสารละลายไว้ที่ 7.0 และอุณหภูมิไว้ที่ 25 °C

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้ใหม่ถึงกรรมวิธีที่ใช้ในการแยกและทำบริสุทธิ์กรดซัลฟอนิกที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.5.2 ส่งเสริมและพัฒนาการผลิตพลาสติกชีวภาพจากกรดซัลฟอนิกที่มีประสิทธิภาพ จากกรรมวิธีหมักโดยใช้ผลผลิตทางการเกษตรที่มีภายในประเทศไทย

1.5.3 เป็นการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตรของไทยที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก และยังสามารถส่งผลกระทบต่อเกษตรกรของไทยมีรายได้เพิ่มมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตกรดซัคซินิกทางชีวภาพ

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวภาพประเภทกรดซัคซินิกด้วยกรรมวิธีการหมักจะประกอบด้วย การเลี้ยงเชื้อ (Seed cultivation) การหมัก (Fermentation) การแยกกรดอินทรีย์ออกจากสารเจือปน (Product recovery) การเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (Concentration) และการทำบริสุทธิ์ (Purification) โดยทั่วไปแล้วกระบวนการแยกและทำบริสุทธิ์ (downstream processing) จะมีต้นทุนคิดเป็นร้อยละ 60 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด (Wee *et al.*, 2006) ดังนั้นการพัฒนาเพื่อลดต้นทุนของกระบวนการแยกและทำบริสุทธิ์กรดอินทรีย์จึงมีความสำคัญมาก ในขั้นตอนของกระบวนการหมัก กรดซัคซินิกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าพีเอชของน้ำหมักลดต่ำลง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อจำนวนของแบคทีเรียที่ใช้หมัก จึงได้มีการเติมเกลือลงไปเพื่อรักษาระดับค่าพีเอชของน้ำหมักให้เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรีย ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการหมักจะประกอบไปด้วยเกลือของกรดอินทรีย์ เช่น ซัคซิเนต แอซิเตต ไพรูเวท และแลคเตท เป็นต้น ตัวอย่างขององค์ประกอบของน้ำหมักที่ได้หลังจากการหมักกรดซัคซินิกแสดงไว้ในตารางที่ 1 พบว่า องค์ประกอบของน้ำหมักที่ได้หลังการหมัก นอกจากจะมีเกลือซัคซิเนตแล้ว ยังมี Residue sugar เช่น กุลโคส และ By-product เช่น มาเลต ไพรูเวท แอซิเตต เป็นต้น ผสมอยู่ นี้แสดงให้เห็นว่า สิ่งที่สำคัญที่สุดในการแยกและทำบริสุทธิ์เกลือของกรดซัคซินิก คือ การกำจัดเกลือของกรดอินทรีย์ที่เป็น By-product ชนิดอื่น ๆ ออกไป

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการหมักกรดซัคซินิก

จุลินทรีย์	ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (g L ⁻¹)							ที่มา
	ซัคซิเนต	มาเลต	ไพรูเวท	แอซิเตต	ฟอร์มेट	แลคเตท	กุลโคส	
1 ^a	82.66	54.94	5.20	6.67	-	-	0.045	Jantama <i>et al.</i> , 2008
2 ^b	39.4	-	-	4.4	1.5	-	0.3	Liu <i>et al.</i> , 2008
3 ^c	8.815	-	-	3.573	3.950	0.960	0.29	Song <i>et al.</i> , 2007
4 ^d	13.64	-	4.820	0.372	-	-	0.02	Song <i>et al.</i> , 2007
5 ^e	22.3	16.0	7.0	1.8	0.8	-	34.2	Huh <i>et al.</i> , 2006

หมายเหตุ ^a*Escherichia Coli* KJ122, ^b*Actinobacillus succinogenes*, ^c*Mannheimia succiniciproducens* MBEL55E, ^d*M. succiniciproducens* LPK.7 และ ^e*M. Succiniciproducens*

2.2 กระบวนการแยกและทำบริสุทธิ์กรดซัลฟิวริกจากน้ำหมัก

ได้มีการรายงานว่าการแยกตัวถูกละลายที่เป็นกรดอินทรีย์หลายชนิดผสมกัน สามารถกระทำได้เพียงแค่วิธีการเดียว คือ การนำสารละลายไปทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันร่วมกับการกลั่นสุญญากาศ ซึ่งกรดอินทรีย์จะถูกนำไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์กลายเป็นเอสเทอร์ หลังจากนั้นจึงนำไปทำการกลั่นแยก อย่างไรก็ตาม การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันและการกลั่นสุญญากาศสามารถกระทำได้พร้อมกัน ซึ่งจะเรียกเทคนิคนี้ว่า “Reactive distillation” (Joglekar *et al.*, 2006) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นจะถูกนำไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อเปลี่ยนเอสเทอร์กลับมาเป็นกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์ และทำการเพิ่มความเข้มข้นของกรดอินทรีย์โดยวิธีการตกผลึก

2.3 นาโนฟิวเตรชัน

ได้มีการรายงานจากหลายกลุ่มงานวิจัยว่า การกรองแบบนาโนฟิวเตรชันมีความสามารถในการคัดกรองให้อิออนลบที่มีประจุหนึ่งลบ (Monovalent anion) เคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางไปได้ง่ายกว่าอิออนที่มีประจุสองลบ (Divalent anion) ความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางจะนิยามอธิบายโดยอาศัยค่ารีเทนชัน (Retention) ค่ารีเทนชันที่มีค่าเท่ากับหนึ่งหมายถึงตัวถูกละลายชนิดนั้น ๆ ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางไปได้และค่ารีเทนชันเท่ากับศูนย์หมายถึงตัวถูกละลายชนิดนั้น ๆ สามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางไปได้ทั้งหมด ตัวอย่างเช่น การกรองเกลือ NaCl , MgCl_2 , Mg_2SO_4 , Na_2SO_4 ผ่านเยื่อบางชนิดนาโนชนิด NF45 จะมีค่ารีเทนชันเท่ากับ 0.396, 0.917, 0.983, 0.985 ตามลำดับ (Kang และ Chang, 2005) นี่แสดงให้เห็นว่า เกลือที่มีอิออนโมเลกุลเป็นหนึ่งบวกและหนึ่งลบเช่น NaCl จะมีค่ารีเทนชันต่ำ ซึ่งสามารถจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางชนิด NF45 ได้ดี แต่เมื่ออิออนบวก (Na^+) ของเกลือเปลี่ยนไปเป็นอิออนสองบวก (Mg^{2+}) เช่น MgCl_2 ค่ารีเทนชันมีค่าสูงเข้าใกล้หนึ่งชี้ให้เห็นว่าเกลือชนิดนี้เคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางได้ยาก ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอิออนลบของเกลือจากอิออนหนึ่งลบ (Cl^-) ไปเป็นอิออนสองลบ (SO_4^{2-}) ค่ารีเทนชันของเกลือชนิดนี้เพิ่มสูงขึ้นและเข้าใกล้หนึ่งเช่นกัน ดังนั้นในกรณีที่เกลือมีอิออนเป็นทั้งสองบวกและสองลบ เช่น Mg_2SO_4 จึงมีค่ารีเทนชันสูงมากใกล้เคียงหนึ่ง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ค่ารีเทนชันของเกลือจะขึ้นอยู่กับชนิดของอิออนบวกและอิออนลบภายในโมเลกุล ถ้าเป็นอิออนสองบวกหรือสองลบจะเป็นตัวกำหนดค่ารีเทนชัน ความแตกต่างของค่ารีเทนชันจะขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางชนิดนาโน

กลไกในการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายผ่านเยื่อบางชนิดนาโนนั้นประกอบไปด้วยสองกลไกหลัก ๆ ได้แก่ อิทธิพลของขนาด (Size effect) และอิทธิพลของแรงกระทำระหว่างประจุ (Electrostatic repulsion) กลไกทั้งสองนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวถูกละลายและคุณสมบัติของเยื่อบางแต่ละชนิด กลไกแรกอิทธิพลของขนาด กลไกนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายต่อขนาดรูพรุนของเยื่อบาง ได้มีการรายงานแล้วว่า เยื่อบางชนิดนาโนมีรูพรุน (Bargeman *et al.*, 2005) ซึ่งอิทธิพลของขนาดนี้จะสามารถนำไปใช้อธิบายกลไกการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางของโมเลกุลที่ไม่มีประจุ เช่น เยื่อบางชนิดนาโน Desal 5DL มีค่ารีเทนชันของน้ำตาลกลูโคสเท่ากับ 0.8 และน้ำตาลไซโลสเท่ากับ 0.5 การที่ค่ารีเทนชันของกลูโคสมีค่าสูงเนื่องมาจากขนาดรูพรุนของเยื่อบางส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าขนาดโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส จึงทำให้น้ำตาลกลูโคสเคลื่อนที่ผ่านเยื่อบางได้เพียงบางส่วน และการที่ Desal 5DL มีค่ารีเทนชันของน้ำตาลกลูโคสสูงกว่าน้ำตาลไซโลสเนื่องมาจากการที่น้ำตาลกลูโคสมี

ขนาดของโมเลกุลใหญ่กว่าน้ำตาลไซโลส จึงเคลื่อนผ่านแผ่นเยื่อบางได้น้อยกว่าน้ำตาลไซโลส (Sjoman *et al.*, 2007) กลไกที่สองอิทธิพลของแรงกระทำระหว่างประจุ กลไกนี้จะขึ้นอยู่กับประจุของตัวถูกละลาย และประจุของพื้นผิวของแผ่นเยื่อบาง ตัวอย่างเช่น NF45 จะมีประจุบนพื้นผิวของแผ่นเยื่อบางเป็นประจุลบ (ที่ค่าพีเอชมากกว่า 4) ประจุลบเหล่านี้จะผลักไอออนที่มีประจุลบของตัวถูกละลาย ทำให้ตัวถูกละลายไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเยื่อบางไปได้ ตัวอย่างเช่น คาร์โบเนตของ Na_2SO_4 เท่ากับ 0.985 (Kang และ Chang, 2005) แม้ว่า Na^+ เป็นไอออนบวกที่มีขนาดเล็กและไม่ถูกผลักด้วยประจุลบของแผ่นเยื่อบาง แต่ SO_4^{2-} จะถูกผลักและไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเยื่อบางไปได้ ทำไมคาร์โบเนตของ Na_2SO_4 มีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของสภาพความสมดุลทางไฟฟ้าของประจุ (Electroneutrality) ประจุบวกและประจุลบในสารละลายไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตามลำพังได้ ต้องเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน ดังนั้นจึงทำให้มีคาร์โบเนตชั้นสูง (ถูกกำหนดโดย SO_4^{2-}) อย่างไรก็ตาม ได้มีการพยายามอธิบายกลไกการเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเยื่อบางของตัวถูกละลายที่มีประจุด้วยกลไกอิทธิพลของแรงกระทำระหว่างประจุอย่างเดียว แต่ไม่ประสบความสำเร็จ จำเป็นต้องอาศัยกลไกทั้งสองข้างต้นมาอธิบายร่วมกัน (Scheap *et al.*, 2006)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

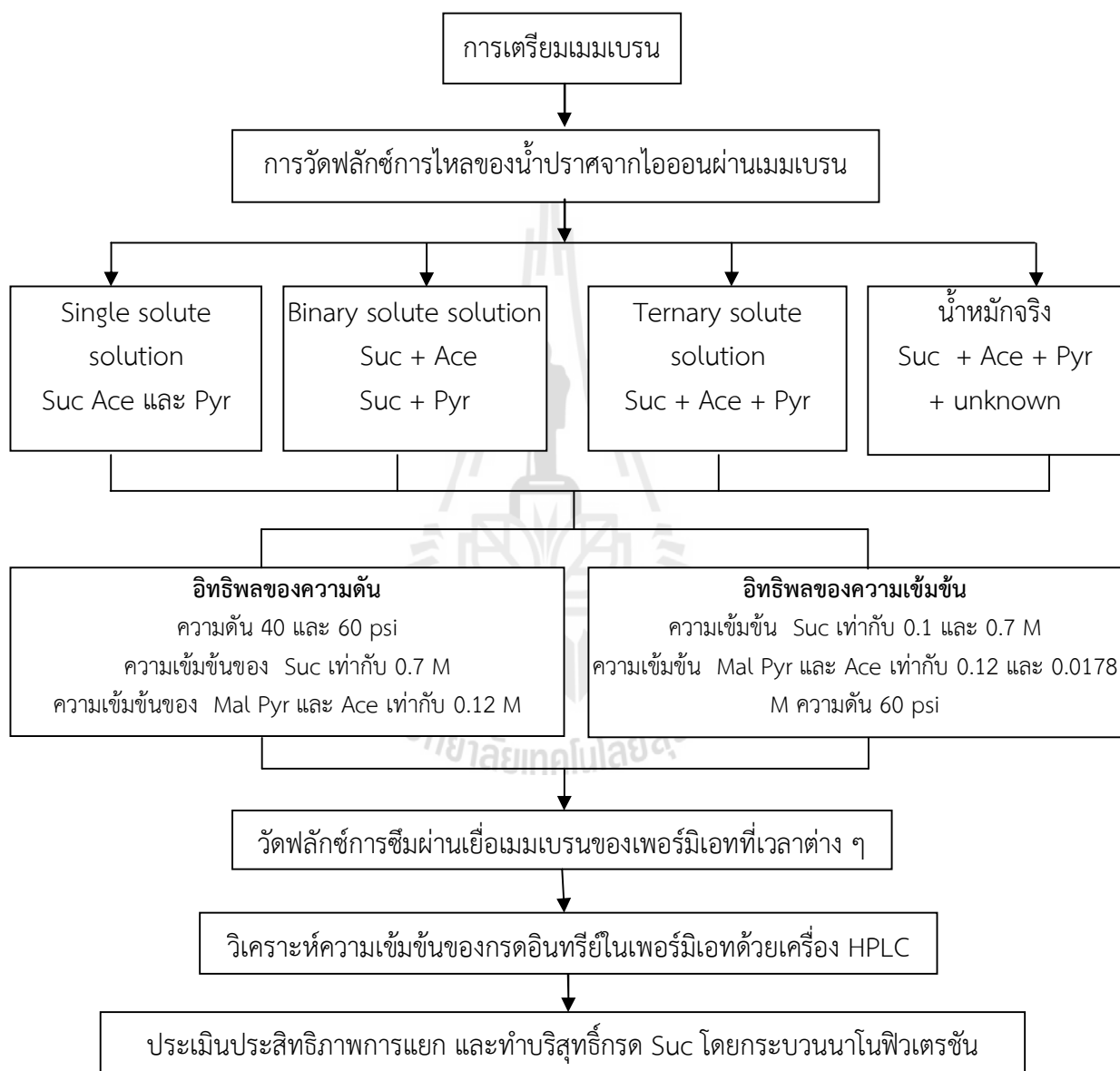
เนื่องจากในน้ำหมักนั้นประกอบไปด้วยตัวถูกละลายหลากหลายชนิด ทั้งที่เป็นตัวถูกละลายที่เป็นกลาง และตัวถูกละลายที่มีประจุ ดังนั้นนอกจากจะมีการศึกษาแรงกระทำระหว่างตัวถูกละลายกับแผ่นเยื่อบางชนิดนาโนแล้ว ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงแรงกระทำระหว่างตัวถูกละลายด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาอิทธิพลระหว่างตัวถูกละลายที่มีประจุกับตัวถูกละลายที่ไม่มีประจุ และอิทธิพลระหว่างตัวถูกละลายที่มีประจุด้วยกันเอง ในกรณีของแรงกระทำระหว่างตัวถูกละลายที่เป็นกลางกับตัวถูกละลายที่มีประจุ Bouchoux *et al.* (2005) ได้มีการศึกษาการแยกน้ำตาลกลูโคสกับเกลือแลคเตต ด้วยใช้แผ่นเยื่อนาโนชนิด Desal 5DK พบว่า ในระบบสารละลายเดี่ยวคาร์โบเนตชั้นของกลูโคสมีค่าสูงและไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น ขณะที่แลคเตตมีคาร์โบเนตชั้นสูงที่ความเข้มข้นน้อย ๆ และมีคาร์โบเนตชั้นต่ำที่ความเข้มข้นสูง ๆ จึงทำให้พวกเขาคาดหวังว่าจะสามารถแยกกลูโคสออกจากเกลือแลคเตตได้เมื่อผสมตัวถูกละลายทั้งสองเข้าด้วยกัน แต่ปรากฏว่าคาร์โบเนตชั้นของกลูโคสลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแลคเตต ทำให้มีคาร์โบเนตชั้นของทั้งสองเหมือนกันทำให้ไม่สามารถแยกตัวถูกละลายทั้งสองออกจากกันได้ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายด้วยการขยายตัวของรูพรุนเมื่อมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่มีประจุเพิ่มมากขึ้นและ/หรือมีการลดลงของขนาดโมเลกุลของกลูโคสเนื่องจากอิทธิพลของแลคเตต แต่อย่างไรก็ตามการแยกน้ำตาลโมเลกุลคู่กับแลคเตตกลับประสบความสำเร็จเนื่องจากแลคเตตส่งผลกระทบต่อน้ำตาลโมเลกุลคู่ได้น้อย (Bouchoux *et al.*, 2006) ในกรณีของแรงกระทำระหว่างตัวถูกละลายที่มีประจุด้วยกันเอง ได้มีการรายงานว่คาร์โบเนตชั้นของไอออนในสารละลายที่มีตัวถูกละลายเพียงชนิดเดียว จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มไอออนที่มีประจุเหมือนกันอีกชนิดลงไป ตัวอย่างเช่น สารละลายระหว่าง Na_2SO_4 และ NaCl ในสารละลายที่มีตัวถูกละลายชนิดเดียว คาร์โบเนตชั้นของ Cl^- จะน้อยกว่าคาร์โบเนตชั้นของ SO_4^{2-} แต่เมื่อนำเอาตัวถูกละลายทั้งสองมาผสมกัน ปรากฏว่า คาร์โบเนตชั้นของ Cl^- กลับลดลงจนกระทั่งได้คาร์โบเนตชั้นที่เป็นลบขณะที่คาร์โบเนตชั้นของ SO_4^{2-} ยังเป็นเหมือนเดิม ได้มีการรายงานเป็นจำนวนมากว่าคาร์โบเนตชั้นสามารถเป็นลบได้ (Krieg *et al.*, 2004) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่มีคาร์โบเนตชั้นสูงกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่มีคาร์โบเนตชั้นต่ำ จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า “Pumping effect”

(Kang *et al.*, 2005) จึงทำให้สามารถสรุปได้ ในระบบสารละลายที่มีเกลือสองชนิด ตัวถูกละลายที่มีค่ารีเทนชันสูงกว่าจะส่งผลกระทบต่อค่ารีเทนชันของตัวถูกละลายที่มีค่ารีเทนชันต่ำกว่าลดลง ทำให้มีค่ารีเทนชันแตกต่างกันมากขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อการแยกตัวถูกละลายทั้งสองชนิดนี้ เนื่องจากการแยกจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีค่ารีเทนชันแตกต่างกันมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการแยกและทำบริสุทธิ์เกลือซัคซินเนตออกจากน้ำหมักที่มีเกลือของกรดอินทรีย์ที่เป็น By-product ด้วยใช้เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบางชนิดนาโน โดยทำการศึกษาในระบบสารละลายที่มีตัวถูกละลายชนิดเดียว และสารละลายที่มีตัวถูกละลายหลายชนิด



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนและกรอบการวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนและกรอบการวิจัย (Suc: กรดซัคซินิก Mal: กรดมาลิก Ace: กรดแอสติค Pyr: กรดไพรูวิก)

ขั้นตอนและกรอบการวิจัยแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบกรขั้นตอนการเตรียมเมมเบรน การวัดฟลักซ์การไหลของน้ำปราศจากไอออน การทดสอบระบบด้วยสารละลายกรดอินทรีย์ตัวอย่าง การศึกษาอิทธิพล

ของความดันและความเข้มข้น การวัดค่าฟลักซ์ การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ และประเมินประสิทธิภาพการแยกของระบบ

3.2 รูปแบบวิธีการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 น้ำหมักจำลอง

กรดอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองด้วยสารละลายน้ำหมักจำลอง ได้แก่ กรดซัคซินิก (Fluka 14080, USA, 99.0%) กรดไพรูวิก (Merck, Germany, 95%) และกรดแอซิติก (RCL Labscan, Thailand, 99.7%) ซึ่งเตรียมเป็นสารละลายกรดอินทรีย์เริ่มต้น (Stock Solution) ด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นของกรดซัคซินิกเท่ากับ 0.7 M และความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่เป็นสารพลอยได้เท่ากับ 0.2 M ซึ่งสารละลายตั้งต้นจะประกอบไปด้วยสารละลาย single-solute solution, binary-solute solution, ternary-solute solution (ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำหมักจำลองจะถูกกำหนดให้สอดคล้องกับความเข้มข้นของน้ำหมักที่ได้จากการหมักกลูโคสด้วยเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์ *Escherichia coli* KJ122 (Jatama et al., 2008)) สารละลายกรดอินทรีย์ทั้งหมดจะถูกปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7.0 โดยใช้สารละลาย KOH เข้มข้น 6 N ก่อนป้อนเข้าสู่ชุดการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของกรดอินทรีย์ที่ศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำหมักจำลองและน้ำหมักจริงที่ใช้ศึกษา

ชนิดของสารละลาย	องค์ประกอบ
Single-solute solution	0.1 และ 0.7 M KSuc 0.018 และ 0.12 KAce 0.018 และ 0.12 KPyr
Binary-solute solution	0.1 M KSuc + 0.018 M KAce 0.7 M KSuc + 0.12 M KAce 0.1 M KSuc + 0.018 M KPyr 0.7 M KSuc + 0.12 M KPyr
Ternary-solute solution	0.1 M KSuc + 0.018 M KAce + 0.018 M KPyr 0.7 M KSuc + 0.12 M KAce + 0.12 M KPyr
น้ำหมักจริง	0.1 M KSuc + 0.018 M KAce + 0.018 M KPyr + unknown 0.7 M KSuc + 0.12 M KAce + 0.12 M KPyr + unknown

หมายเหตุ สัญลักษณ์ KSuc คือ โพแทสเซียมซัคซิเนต KAce คือ โพแทสเซียมแอซิเตท และ KPyr คือ โพแทสเซียมไพรูเวท

3.2.2 น้ำหมักจริง

น้ำหมักจริงที่ใช้ศึกษาได้มาจากการหมักกลูโคสด้วยสายพันธุ์ *Escherichia coli* KJ122 (Jatama et al., 2008) โดยหมักบ่มไว้ที่ 37 °C ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และกวนด้วยความเร็วรอบ 100 rpm อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้เป็น AM1 mineral salts medium (Martinez et al., 2007) ซึ่งประกอบไปด้วย กลูโคส 10% โดยมวล

ต่อปริมาตร สาร KHCO_3 ที่มีความเข้มข้น 100 mM และสาร Betaine HCl เข้มข้น 1 mM โดยที่ของผสม K_2CO_3 และ KOH 6 N จะใช้เพื่อทำการรักษาค่า pH ให้คงที่ที่ 7.0 และเพิ่มปริมาณ CO_2 ในน้ำหมัก จะทำการหมักที่มีปริมาตร 350 ml โดยใช้เวลาในการหมักเท่ากับ 96 ชั่วโมง องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ที่ได้หลังจากการหมัก ในน้ำหมักจริงนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของกรดอินทรีย์ที่ใช้ศึกษา

คุณสมบัติ	องค์ประกอบ		
	กรดซักซินิก	กรดแอสติติก	กรดไพรูวิก
สูตรโมเลกุล	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$	$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$
มวลโมเลกุล ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	118.09	60.05	88.06
ความหนาแน่น ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.560	1.049	1.250
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	184	16-17	11.8
จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	235	118 - 119	165
ความสามารถในการละลายน้ำ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) ที่ 20°C	58	ไม่ละลายน้ำ	-
pKa_1	4.20	4.79	2.50
pKa_2	5.60	-	-

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เยื่อเมมเบรน

เยื่อเมมเบรนที่ใช้ศึกษาเป็นเยื่อเมมเบรนชนิดนาโน มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (Flat sheet) ผลิตโดยบริษัท GE Power & Water รุ่น ESNA-1-4040 ประเทศสหรัฐอเมริกา สามารถใช้ได้ในช่วง pH 3.0 – 9.0 ค่าการกำจัดสูงสุดของสาร MgSO_4 เท่ากับ 98 % ภายใต้สภาวะที่มีการกวน 2,000 rpm และความดัน 110 psi หมู่ฟังก์ชันนอลที่อยู่บนพื้นผิวของเยื่อเมมเบรนจะแตกตัวได้สมบูรณ์หรือมีการเปลี่ยนแปลงจะประจุบนพื้นผิวจากบวกเป็นลบ เมื่อค่า pH มากกว่า 4.0 คุณสมบัติของเยื่อเมมเบรนที่ศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

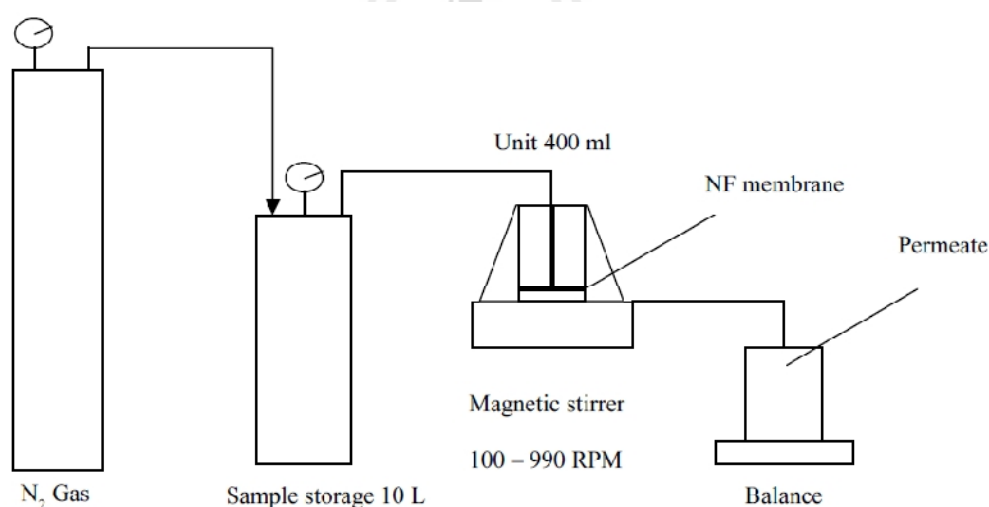
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเมมเบรนนาโนฟิวเตรชั่นของ GE Power & Water รุ่น ESNA-1-4040

คุณลักษณะ	ค่าที่ได้
ประเภทของเมมเบรน	Composition membrane
วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน	Polyamide
ขนาดรูพรุน	150 – 300 ดาลตัน
ค่าการกำจัดเกลือ MgSO_4	98% ที่ 100 psi (690 kPa)
ช่วงพีเอชของการดำเนินระบบ	3-9
ช่วงพีเอชของการทำความสะอาด	1-10
ความทนทานต่อคลอรีน	< 0.1 ppm
ความดันของการดำเนินระบบ	10-300 psi (483 – 2069 kPa)
ค่าความต้านทานแรงดันสูงสุด	400 psi (2,758 kPa)

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้

ชุดทดสอบการกรองที่ศึกษา ได้แก่ ชุดทดสอบระบบนาโนฟิวเตรชันแบบตายตัว (Dead-end filtration) รุ่น Model 8400 Amicon @ Milipore (Merck, USA) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ชุดเมมเบรนเซลล์ (Dead-end unit cell) โดยมีปริมาตรเท่ากับ 400 ml ซึ่งสามารถทนแรงดันได้สูงสุด 75 psi ภายในบรรจุใบกวน โดยจะใช้แม่เหล็กในการขับเคลื่อน Stirrer unit hot plate and Magnetic stirrer (PNP model HS-2, 100-990 RPM, USA) โดยที่หน่วยทดสอบจะเชื่อมต่อเข้ากับท่อพีอี (Polyethylene tube) เพื่อเชื่อมต่อกับถังสแตนเลสขนาด 10 ลิตร (สามารถทนความดันสูงสุดได้ 80 psi) มีเกจวัดความดันที่สามารถวัดความดันได้ตั้งแต่ 5-90 psi ต่อเข้ากับถังแก๊สไนโตรเจนที่สามารถสร้างแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 100 psi เพื่อให้แรงดันกับชุดทดสอบขณะที่ดำเนินระบบ ตัวถูกละลายและตัวทำละลายจะซึมผ่านเยื่อเมมเบรนจากรีเทนเททไปยังภาชนะเก็บตัวอย่างหรือเพอร์มิเอท โดยใช้ปิ๊กเกอร์ขนาด 500 ml ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Metler Teledo รุ่น ML3002E ประเทศสหรัฐอเมริกา พิกัด 3,200 กรัม อ่านละเอียด 0.01 กรัม จานชั่งขนาด 17.0x19.0 ซม.

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในสารละลายทำโดยใช้เครื่อง HPLC (High Performance Liquid Chromatography) โดยใช้ UV-VIS Detector (Shimadzu รุ่น SPD-10A VP, Japan) ด้วยคอลัมน์ VertiSep™ OA (VERTICAL, Thailand) ใช้กรด 0.003 N H₂SO₄ เป็นตัวพา (Mobile phase) ด้วยอัตราการไหล 0.4 mL/min และวัดค่า pH ด้วย Benchtop pH Meter รุ่น pH 700 บริษัท EUTECH สิงคโปร์ ช่วงที่สามารถทำการวัดได้คือ pH 2.00 ถึง 16.00



รูปที่ 3.2 แผนภาพชุดทดสอบระบบนาโนฟิวเตรชันแบบตายตัว

3.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมเยื่อเมมเบรน

นำแผ่นเยื่อเมมเบรนมาตัดให้เป็นแผ่นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร เพื่อให้ได้ขนาดพอเหมาะพื้นที่การกรองที่ชุดการทดลองเยื่อกรองแบบแนวตั้งรับรองได้ จากนั้นนำเยื่อเมมเบรนมาแช่ไว้

ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ (Sodium-metabisulphite) เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แช่ไว้ในตู้เย็นที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส

3.4.2 การทำความสะอาดเยื่อเมมเบรน

3.4.2.1 ก่อนดำเนินการระบบ

นำเยื่อเมมเบรนที่เก็บรักษาสภาพโดยการแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่า pH เท่ากับ 10.0 เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน หลังจากนั้น นำเยื่อเมมเบรนไปแช่ในสารละลายกรดซิตริก ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$) ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.0 เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง นำแผ่นเยื่อเมมเบรนไปติดตั้งในชุดการทดลองเยื่อกรองแบบแนวตั้ง เพื่อทำการทดลองต่อไป

3.4.2.2 หลังดำเนินการระบบ

เมื่อดำเนินการระบบด้วยสารละลายตัวอย่างเสร็จสิ้นแล้ว จะทำความสะอาดเยื่อกรองแบบนาโน โดยใช้ น้ำปราศจากไอออน กรองผ่านชุดการทดลองอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการวัดฟลักซ์ที่ความดันแตกต่างกัน ได้แก่ 0 12 20 30 40 50 และ 60 psi ตามลำดับ

3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบ

นำเยื่อเมมเบรนที่ผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดมาติดตั้งในชุดการทดลอง เริ่มดำเนินการระบบด้วยการกรองน้ำปราศจากไอออนผ่านเยื่อเมมเบรนเป็นเวลา 30 นาที วัดฟลักซ์การซึมผ่านของน้ำปราศจากไอออนที่ความดัน 0 10 20 30 40 50 และ 60 psi เพื่อตรวจสอบการอุดตันของเยื่อเมมเบรน ดำเนินการระบบโดยการกรองสารละลายกรดอินทรีย์และควบคุมสภาวะตามปัจจัยการศึกษา โดยเริ่มจับเวลาและวัดฟลักซ์ที่เวลา 1 5 10 15 30 45 90 120 180 และ 240 นาที ตามลำดับ เก็บตัวอย่างน้ำเพอร์มิเอทจำนวนทั้งหมด 10 ตัวอย่างนำไปวิเคราะห์ค่าตามพารามิเตอร์การทดสอบที่กำหนด ตามวิธีมาตรฐาน เมื่อดำเนินการระบบด้วยสารละลายตัวอย่างครบ 240 นาที ทำการกรองน้ำปราศจากไอออนผ่านเยื่อเมมเบรนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำความสะอาดกรดอินทรีย์ที่อยู่บนเยื่อกรอง และวัดฟลักซ์ที่ความดัน 0 10 20 30 40 50 และ 60 psi นำน้ำเพอร์มิเอทที่ได้ไปวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ค่า pH ด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ และวัดความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในเพอร์มิเอทด้วยเครื่อง HPLC นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้

3.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้

3.5.1 ค่าการกักกันสาร (Observed retention, R_{obs})

ค่าการกักกันสารเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการกักกันตัวถูกละลายของเยื่อเมมเบรน หรือการแยกสาร (Selectivity) ของเยื่อกรองในการกรองแบบนาโนฟิวเตรชันตัวถูกละลายมักเป็นไอออนและสารโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำกร่อย สารละลายโปรตีน ไฮโดรไลเสต สารละลายน้ำตาล น้ำผลไม้ เป็นต้น ตัวถูกละลายบางชนิดไม่สามารถผ่านเยื่อเมมเบรนไปได้ หรือถูกเก็บกักไว้ในรีเทนเทท ขณะที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายผ่านเยื่อ

กรองอย่างอิสระ ค่าการกักกันของตัวถูกละลายต่างๆ ที่อยู่ในสารป้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) ค่าการกักกันของสารหาได้จาก

$$R_{obs} = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (3.1)$$

โดยที่ C_p และ C_f คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อยู่ในเพอร์มิเอท และสารป้อน ตามลำดับ ค่า R_{obs} ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดของรูพรุน สภาวะการดำเนินงาน การเกิดฟาวลิง และคุณสมบัติสารป้อน เป็นต้น ถ้าตัวถูกละลายไม่สามารถผ่านเยื่อเมมเบรนได้เลย ($C_p = 0$) R_{obs} มีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้าตัวถูกละลายไหลผ่านเยื่อเมมเบรนได้อย่างอิสระความเข้มข้นของตัวถูกละลายในรีเทนเทท และในเพอร์มิเอทจะมีค่าเท่ากัน กรณีนี้ R_{obs} จะมีค่าเท่ากับ 0

3.5.2 ค่าปัจจัยการแยก (Separation factor, SF)

ค่า Separation factor เป็นอัตราส่วนระหว่าง ผลหารของความเข้มข้นของกรดซัคซินิกต่อกรดอินทรีย์พลอยได้ในเพอร์มิเอท กับผลหารของความเข้มข้นของกรดซัคซินิกต่อกรดอินทรีย์พลอยได้ในรีเทนเทท ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.2 โดยค่า C_{Suc} คือ ความเข้มข้นของกรดซัคซินิก ค่า C_{Ace} คือ ความเข้มข้นของกรดแอสติติก และ C_{Pyr} คือความเข้มข้นของกรดไพรูวิก

$$SF = \frac{(C_{Suc}/C_{Ace \text{ or } Pyr})_{permeate}}{(C_{Suc}/C_{Ace \text{ or } Pyr})_{retentate}} = \frac{1-R_{Suc}}{1-R_{Ace \text{ or } Pyr}} \quad (3.2)$$

ค่า SF ที่มีค่าแตกต่างจาก 1 หมายถึงการแยกสามารถเกิดขึ้นได้ ค่า $SF < 1$ หมายถึง ความเข้มข้นของกรดซัคซินิกจะเพิ่มขึ้นในรีเทนเททมากกว่าในเพอร์มิเอท ในทางตรงกันข้ามกัน ค่า $SF > 1$ หมายถึง ความเข้มข้นของกรดซัคซินิกจะเพิ่มขึ้นในเพอร์มิเอทมากกว่ารีเทนเทท

3.5.3 ค่าความเบี่ยงเบน (Deviation, α_j)

ค่า α_j เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า Retention ของสารละลาย Single-solute solution กับสารละลาย Mixed-solute solution แสดงถึง ความเบี่ยงเบนของค่า Retention ของกรดอินทรีย์ในสารละลาย single-solute solutions เทียบกับค่า Retention ของกรดอินทรีย์ใน mixed-solute solution และค่า R' คือ ค่า Retention ของกรดอินทรีย์ในสารละลาย Single-solute solution

$$\alpha_j = 1 - \frac{R'_{obs}}{R_{obs}} \quad (3.3)$$

ค่า α เท่ากับ 0 หมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่า retention ของ single-solute solution (R_{obs}) และ mixed-solute solution (R'_{obs}) ค่า α ที่แตกต่างจาก 0 มาก ๆ จะแสดงถึง ความเบี่ยงของค่า Retention ใน single-solute solution และ mixed-solute solution สูง

3.6 สถานที่ทำการทดลอง

3.6.1 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 ถ.สถลมารค ต.เมืองศรีโค ไค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

3.6.2 สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การถ่ายโอนมวลสารใน Single-solute solution

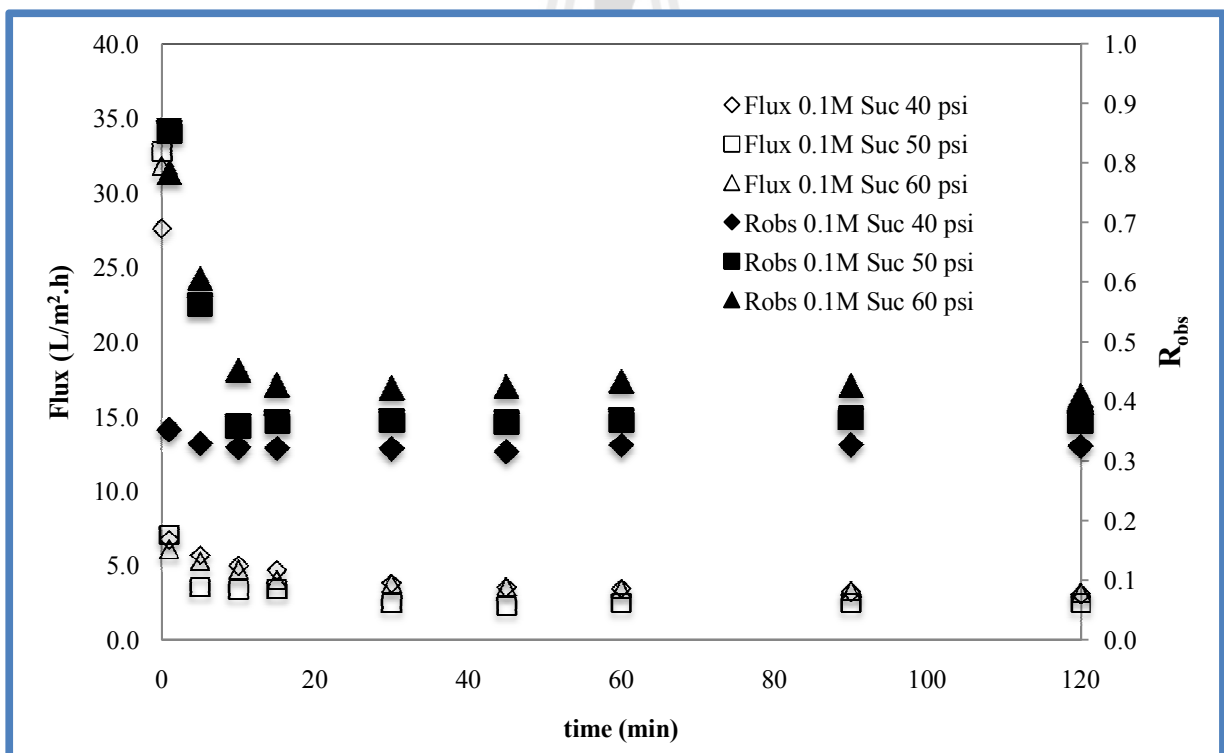
4.1.1 สารละลายโพแทสเซียมซัคซิเนต

4.1.1.1 อิทธิพลของความดัน

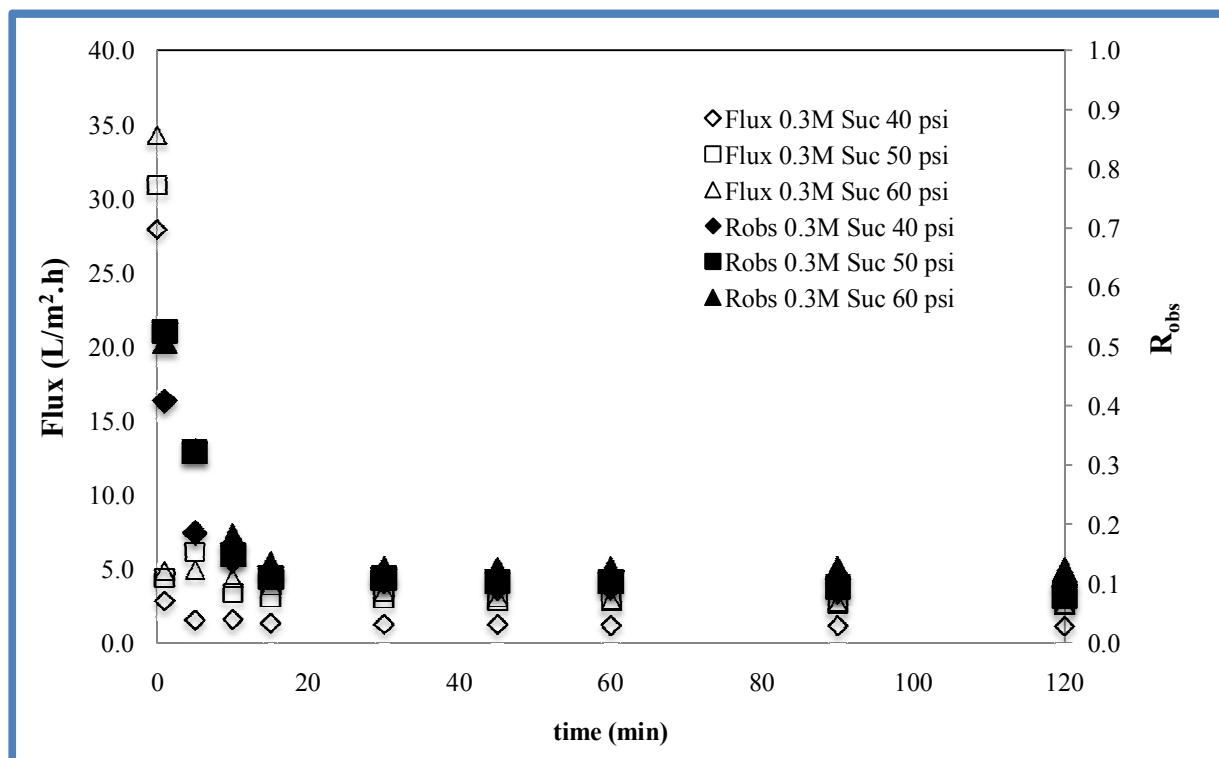
รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเพอร์มิเอทฟลักซ์ (Permeate flux) และค่าการกักกัน (Observed retention) ของสารโพแทสเซียมซัคซิเนต (Potassium succinate) ที่มีความเข้มข้น 0.1M ในช่วงเวลา 0 - 120 นาที ภายใต้สภาวะที่มีความดันทรานสมเมมเบรน (Transmembrane pressure) แตกต่างกัน พบว่า ในช่วง 15 นาทีแรก ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันมีค่าลดลงอย่างมาก หลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าคงที่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในช่วงแรกเกิดการสะสมของสารโพแทสเซียมซัคซิเนตที่พื้นผิวของเยื่อเมมเบรนกลายเป็นชั้นฟิล์มบาง ๆ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเป็นจะถูกรเรียกว่า "Concentration polarization" ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมซัคซิเนตที่ผิวหน้าเยื่อเมมเบรนสูงขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างรีเทนเททกับเพอร์มิเอทมากขึ้น ทำให้สารโพแทสเซียมซัคซิเนตถ่ายโอนมวลไปยังเพอร์มิเอทได้มากขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ค่าการกักกันลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมซัคซิเนตเพิ่มขึ้นในรีเทนเททจะส่งผลให้มีแรงดันออสโมติกในรีเทนเททเพิ่มขึ้น แรงดันออสโมติกจะต้านทานอิทธิพลของความดันทรานสมเมมเบรน (แรงขับเคลื่อน) ทำให้ฟลักซ์การซึมผ่านของของเหลวจากรีเทนเททไปยังเพอร์มิเอทลดลง การคงที่ของเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันแสดงให้เห็นว่า การเกิด Concentration polarization บนพื้นผิวของเยื่อเมมเบรนโดยสมบูรณ์แล้ว การเปลี่ยนแปลงของเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันเทียบกับเวลาในผลการทดลองอื่น ๆ ในงานวิจัยนี้ มีแนวโน้มเป็นลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นผู้วิจัยจึงขออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันเทียบกับเวลาไว้เฉพาะในหัวข้อ 4.1.1.1 นี้เท่านั้น แต่จะไปเน้นอธิบายอิทธิพลของความดันและความเข้มข้นที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารและความสามารถในแยกของเยื่อเมมเบรน

ผลการทดลองอิทธิพลของความดันที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสารของโพแทสเซียมที่ความเข้มข้น 0.1M 0.3M และ 0.7M ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความดันส่งผลให้ค่าการกักกันเพิ่มขึ้นแต่ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย การเพิ่มความดันทรานสมเมม

เบรนให้แก่ระบบจะทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน (Driving force) มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารจากรีเทนเททไปยังเพอร์มิเอทสูงขึ้น เนื่องจากตัวทำละลาย (น้ำปราศจากไอออน) สามารถซึมผ่านเยื่อเมมเบรนได้มากกว่าตัวถูกละลาย (สารโพแทสเซียมซัลเฟต) ดังนั้นเมื่อแรงขับเคลื่อนสูงขึ้นตัวทำละลายจึงซึมผ่านเยื่อเมมเบรนได้มากขึ้น แต่การซึมผ่านของตัวถูกละลายจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ Diffusion-solution model (Bouchoux *et al.*, 2005) เมื่อสารโพแทสเซียมซัลเฟตถูกกักกันไว้ในรีเทนเททมากขึ้นจึงทำให้ค่าการกักกันสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของเพอร์มิเอทฟลักซ์สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มความดันทรานสมเมเบรนเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนของระบบให้สูงขึ้นทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารผ่านเยื่อเมมเบรนสูงขึ้น ลักษณะเช่นนี้ส่งผลให้มีค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์สูงขึ้น ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมซัลเฟตสูง (0.3 และ 0.7 M) การเพิ่มความดันมีผลต่อเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันมีผลกระทบน้อยมาก เนื่องจากความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมซัลเฟตสูงส่งผลให้มีแรงดันออสโมติกในรีเทนเททสูง แรงดันออสโมติกจะต้านทานอิทธิพลของแรงดันทรานสมเมเบรน เมื่อแรงดันออสโมติกสูงมาก การเพิ่มแรงดันทรานสมเมเบรนเพียงเล็กน้อยจึงไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายโอนมวลสารของสารโพแทสเซียมซัลเฟต ลักษณะเช่นนี้จะทำให้เพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



รูปที่ 4.1 ผลของความดันค่าต่อเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมซัลเฟต เข้มข้น 0.1M ใน Single-solute solution



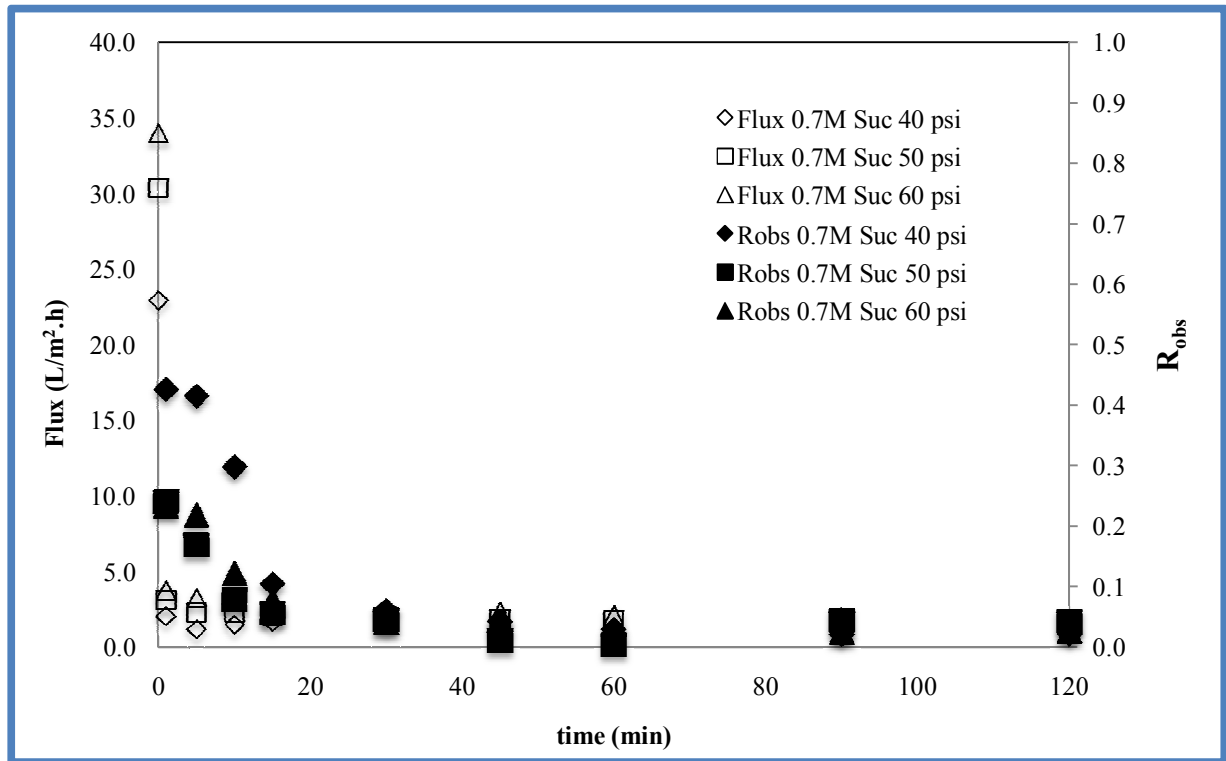
รูปที่ 4.2 ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมซึกซิเนต เข้มข้น 0.3M ใน Single-solute solution

4.1.1.2 อิทธิพลของความเข้มข้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าเพอร์มิเอทพลักซ์และค่าการกักกันของสารโพแทสเซียมซึกซิเนตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (ดูรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 เปรียบเทียบกัน) พบว่า ค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น และค่าการกักกันลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมซึกซิเนต การลดลงของค่าเพอร์มิเอทพลักซ์เมื่อความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมซึกซิเนตสูงขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า ที่ความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมซึกซิเนตสูงขึ้นไปจะทำให้แรงดันออสโมติกในรีเทนเทตสูงขึ้นไปด้วย แรงดันออสโมติกจะไปต้านทานแรงดันทรานสมเยนเบรนทำให้การถ่ายโอนมวลสารข้ามผ่านเยื่อเมมเบรนเกิดขึ้นน้อยลง ลักษณะเช่นนี้ทำให้ค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ลดลง

การลดลงของค่าการกักกันเมื่อความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมซึกซิเนตเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มขึ้นความเข้มข้นโพแทสเซียมซึกซิเนตเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออน (K^+) โดยไอออนบวกดังกล่าวจะไปยึดจับกับประจุลบบนพื้นผิวของเยื่อเมมเบรนด้วยแรงยึดเหนี่ยวไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) ทำให้อำนาจของประจุลบของเยื่อเมมเบรนที่จะผลักประจุลบของซึกซิเนตลดลง ลักษณะเช่นนี้จะทำให้อิทธิพลของ Charge effect (Bouchoux *et al.*, 2006) ลดลง ปรากฏการณ์นี้เป็นที่รู้จักในชื่อ “Screening

effect” (Bargeman *et al.*, 2005) นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนมากพอ หรือเท่ากับ 0.7M จะทำให้ Charge effect ไม่มีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารผ่านเยื่อเมมเบรนอีกต่อไป จึงทำให้ค่าการกักกันลดลงเข้าสู่ศูนย์ และการถ่ายโอนมวลสารจะขึ้นอยู่กับ size effect (Bechthold *et al.*, 2008) เท่านั้น

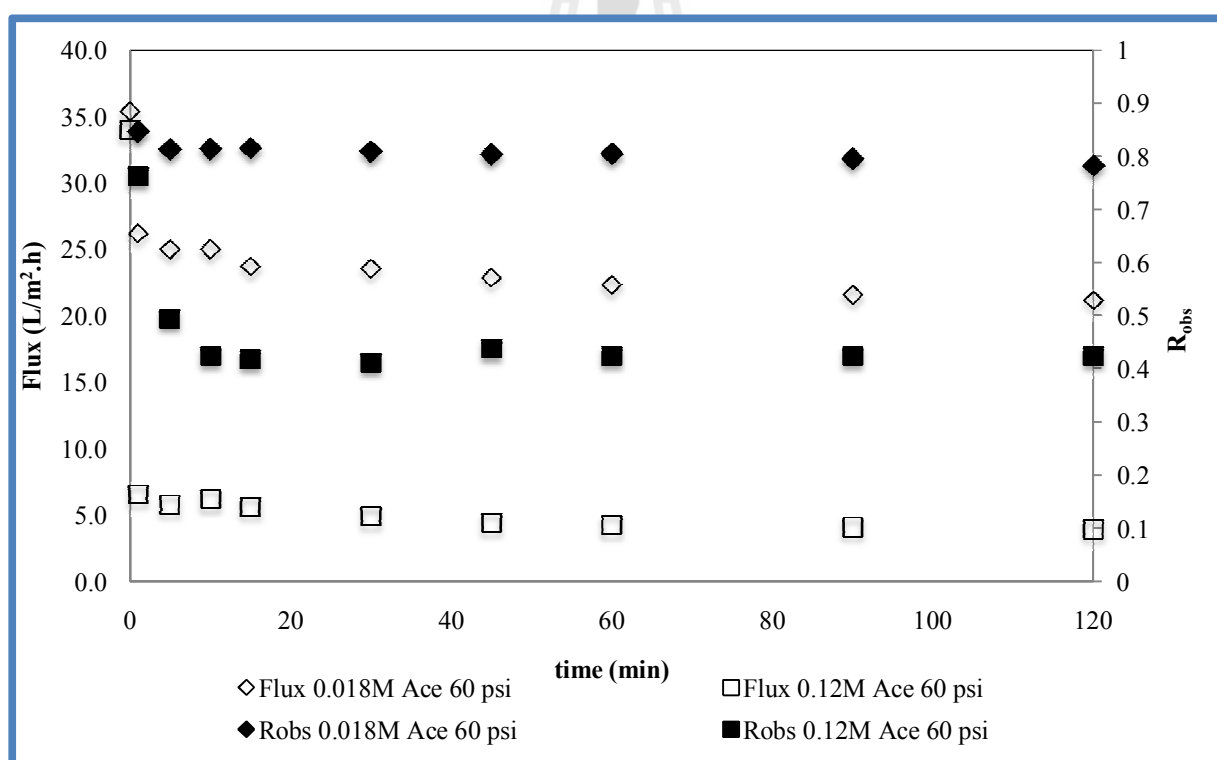


รูปที่ 4.3 ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมซัคซิเนต เข้มข้น 0.7M ใน Single-solute solution

4.1.2 สารละลายโพแทสเซียมไพรูเวท

4.1.2.1 อิทธิพลของความดัน

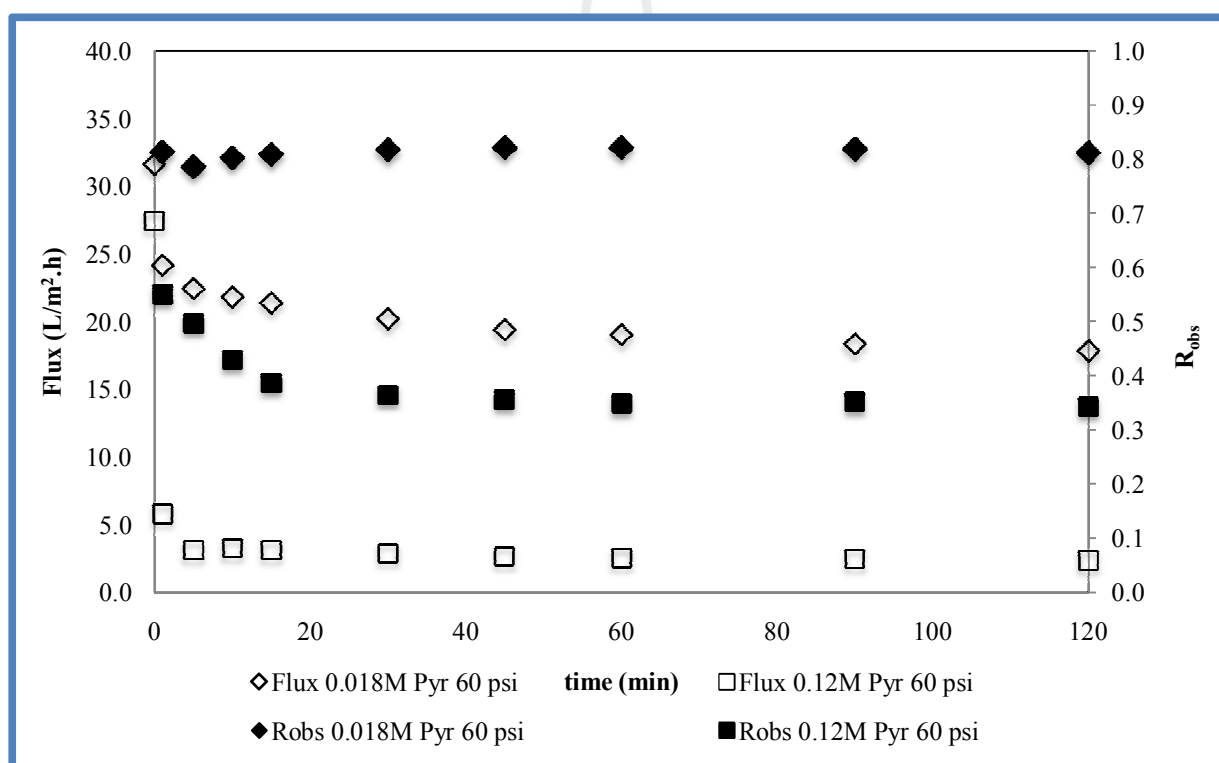
รูปที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์และค่าการกักกันของสารโพแทสเซียมไพรูเวทเข้มข้น 0.12M พบว่า ค่าเพอร์มิเอทพลักซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการกักกันของสารโพแทสเซียมไพรูเวทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น การที่ค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ไม่เป็นฟังก์ชันกับความดันทรานสมเมเบรนนที่เพิ่มขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับแนวโน้มของค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ของสารโพแทสเซียมซัคซิเนต ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าการกักกันเมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มความดันทรานสมเมเบรนจะทำให้การถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายผ่านเยื่อเมมเบรนสูงขึ้น แต่เนื่องจากการถ่ายโอนมวลสารของตัวทำละลาย (น้ำปราศจากไอออน) เกิดขึ้นได้มากกว่าตัวถูกละลาย (โพแทสเซียมไพรูเวท) จึงทำให้ตัวทำละลายซึมผ่านเยื่อเมมเบรนได้มากขึ้น แต่กลับทำให้ตัวถูกละลายซึมผ่านเมมเบรนได้น้อยลง ซึ่งเป็นไปตาม Diffusion-solution model จึงทำให้ค่าการกักกันเพิ่มขึ้นเมื่อความดันทรานสมเมเบรนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมไพรูเวทเข้มข้น 0.12M ใน Single-solute solution

4.1.2.2 อิทธิพลของความเข้มข้น

รูปที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันของสารโพแทสเซียมไพรูเวท ที่ความดันทรานสมเมเบรน 60 psi พบว่า ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมไพรูเวทเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์เมื่อความเข้มข้นของโพแทสเซียมไพรูเวทลดลง เนื่องมาจากการลดความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมไพรูเวทลงจะทำให้แรงดันออสโมติกในรีเทนเททลดลง จึงส่งผลให้มีการถ่ายโอนมวลสารของโพแทสเซียมไพรูเวทจากรีเทนเททไปยังเพอร์มิเอทเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าการกักกันเมื่อความเข้มข้นของโพแทสเซียมไพรูเวทน้อยลง สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมไพรูเวทลดลงทำให้ปริมาณของโพแทสเซียมไอออน (K^+) ในสารละลายลดลงด้วย จึงทำให้มีไอออนบวกไปจับกับประจุลบบนพื้นผิวของเยื่อเมมเบรนน้อยลง ส่งผลให้อำนาจประจุลบของเยื่อเมมเบรนเพิ่มสูงขึ้นและสามารถผลักประจุลบของไพรูเวทได้มากขึ้น หรือทำให้เกิด Donan effect สูงขึ้น ลักษณะเช่นนี้จะทำให้การถ่ายโอนมวลของโพแทสเซียมไพรูเวทผ่านเยื่อเมมเบรนได้น้อยลง ดังนั้นค่าการกักกันจึงสูงขึ้น

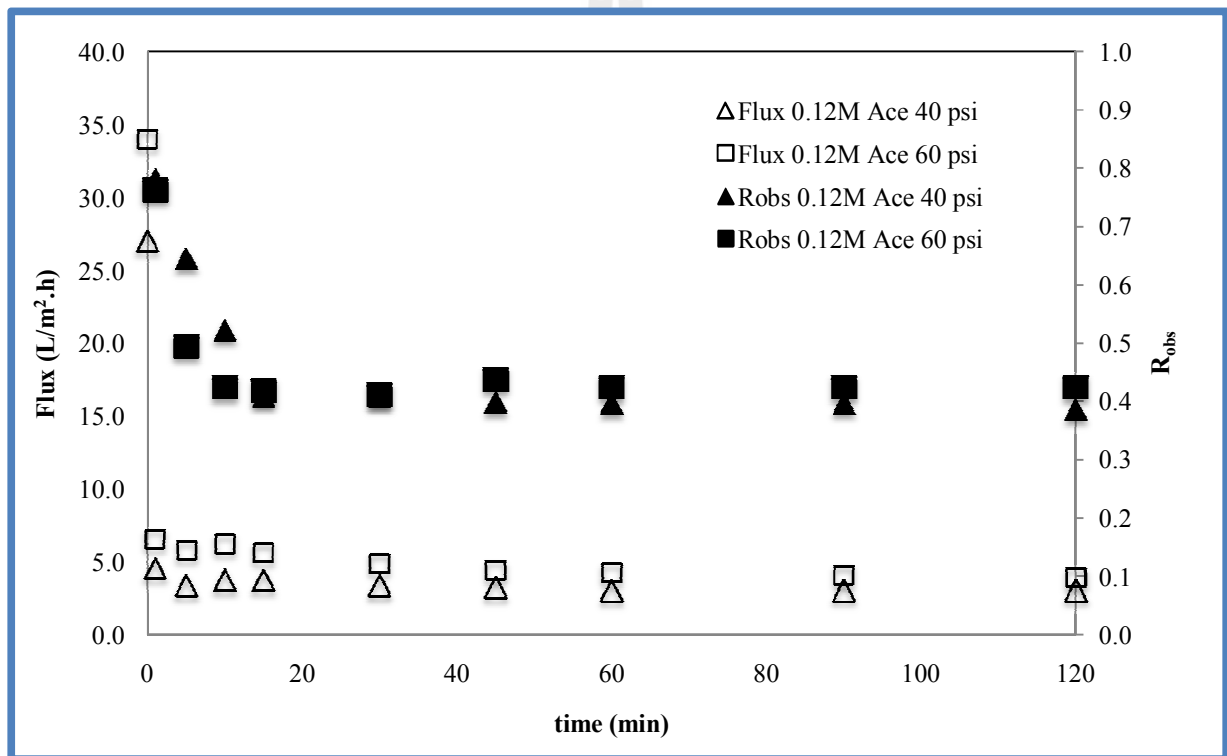


รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมไพรูเวท เข้มข้น 0.018M และ 0.12M ความดันของระบบ 60 psi ใน Single-solute solution

4.1.3 สารละลายโพแทสเซียมแอซิเตต

4.1.3.1 อิทธิพลของความดัน

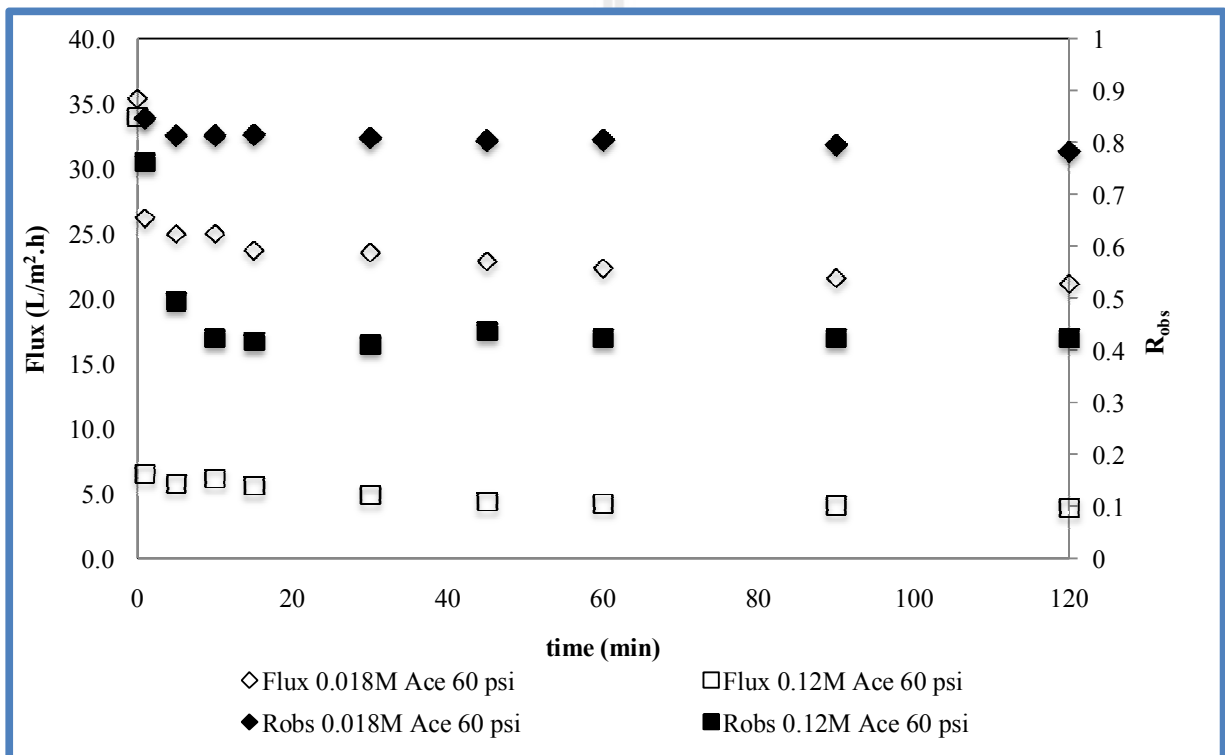
รูปที่ 4.6 แสดงอิทธิพลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันของสารโพแทสเซียมแอซิเตต เข้มข้น 0.12M พบว่า ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการกักกันของสารโพแทสเซียมแอซิเตตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น การที่ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ไม่เป็นฟังก์ชันกับความดันทรานสมเมเบรอนที่เพิ่มขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับแนวโน้มของค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ของโพแทสเซียมซัลไฟด์ ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าการกักกันเมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของค่าการกักกันของโพแทสเซียมไพรูเวตเมื่อความดันทรานสมเมเบรอนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมแอซิเตต เข้มข้น 0.12M ใน Single-solute solution

4.1.3.2 อิทธิพลของความเข้มข้น

รูปที่ 4.7 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันของสารโพแทสเซียมแอสซิเตท ที่ความดันทรานสมเมเบรน 60 psi พบว่า ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโพแทสเซียมแอสซิเตทเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์เมื่อความเข้มข้นของโพแทสเซียมแอสซิเตทลดลง เนื่องมาจากการลดความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมแอสซิเตทลงจะทำให้แรงดันออสโมติกในรีเทนเททลดลง จึงส่งผลให้มีการถ่ายโอนมวลสารของโพแทสเซียมแอสซิเตทจากรีเทนเททไปยังเพอร์มิเอทเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าการกักกันเมื่อความเข้มข้นของโพแทสเซียมแอสซิเตทลดลง สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของค่าการกักกันของสารละลายโพแทสเซียมไพรูเวท



รูปที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของโพแทสเซียมแอสซิเตท เข้มข้น 0.018M และ 0.12M ที่ความดันของระบบ 60 psi ใน Single-solute solution

4.1.4 สรุป

สำหรับสารละลายโพแทสเซียมซัคซิเนต การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนส่งผลให้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันของโพแทสเซียมซัคซิเนตเฉพาะในกรณีที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมซัคซิเนตน้อย (0.1M) เท่านั้น เนื่องจากที่สภาวะนี้ยังคงหลงเหลืออิทธิพลของ Donan effect อยู่ การเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมมเบรนจึงส่งผลให้ Donan effect มีอิทธิพลเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ แต่ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น (0.7M) ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันมีค่าน้อยลง เนื่องจากไม่หลงเหลืออิทธิพลของ Donan effect เมื่อปราศจากอิทธิพลของ Donan effect การเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมมเบรนจึงไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายโอนมวลสารในระบบ

สำหรับสารละลายโพแทสเซียมไพรูเวต และสารละลายโพแทสเซียมแอสซิเตต การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนส่งผลให้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันของตัวถูกละลายทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายทั้งสองชนิดมีความเข้มข้นน้อย (0.12M) การเปลี่ยนแปลงความดันจึงสามารถส่งผลกระทบต่อ Donan effect ได้ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายต่ำ (0.018M) ส่งผลให้อิทธิพลของ Donan effect สูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงความดันจึงสามารถส่งผลกระทบต่อระบบเพิ่มสูงขึ้น

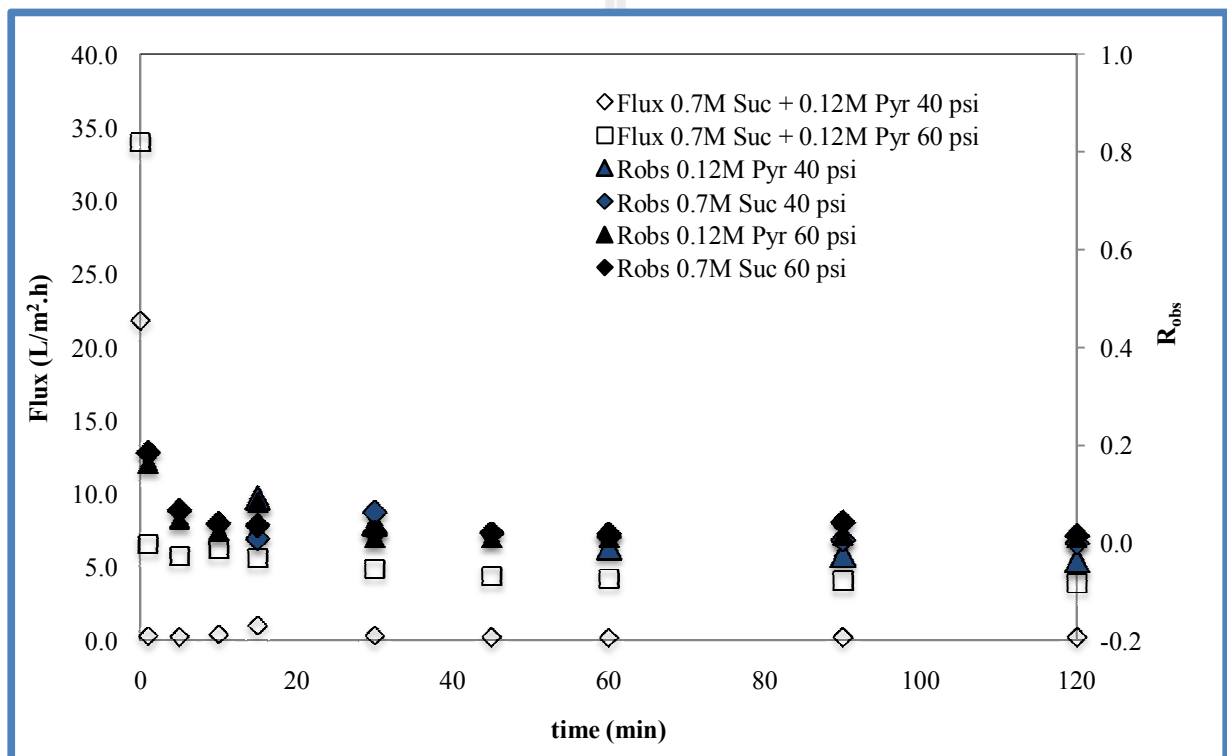
จากผลการทดลองข้างต้น การเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมมเบรนมีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารของเกลือของกรดอินทรีย์ทั้งสามชนิดน้อยมาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมมเบรนอาจจะไม่ส่งผลต่อการแยกได้ด้วยเช่นกัน แต่การเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นน้อยลง สามารถรบกวนการถ่ายโอนมวลสารผ่านเยื่อเมมเบรนได้มากกว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน ดังนั้นการเจือจางสารละลายอาจจะส่งผลให้การแยกสูงขึ้นหรือลดลงได้

4.2 อิทธิพลของ ionic composition ต่อการถ่ายโอนมวลสารและการแยกใน Binary-solute solution

4.2.1 สารละลายผสมระหว่างซัคซิเนตและไพรูเวต

4.2.1.1 อิทธิพลของความดัน

รูปที่ 4.8 แสดงอิทธิพลของความดันทรานสมเมมเบรนต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันของซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M พบว่า ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความดันทรานสมเมมเบรน ขณะที่ค่าการกักกันของซัคซิเนตและไพรูเวตมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าการกักกันของไพรูเวต มีค่าติดลบในช่วงเวลาตั้งแต่ 90 – 120 นาที



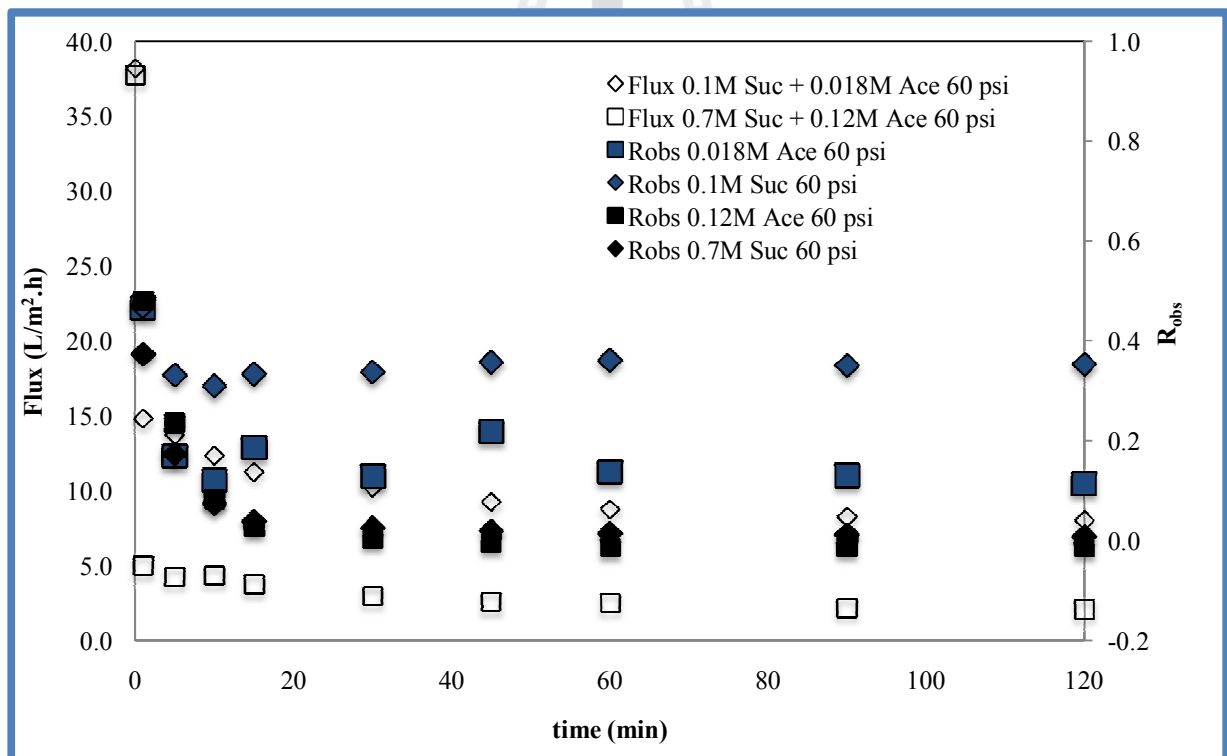
รูปที่ 4.8 ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของ ซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M ใน Binary-solute solution

การเพิ่มขึ้นของเพอร์มิเอทฟลักซ์เมื่อความดันทรานสมเมมเบรนเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีของโพแทสเซียมซัคซิเนตใน Single-solute solution ส่วนค่าการกักกันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความดันทรานสมเมมเบรนเพิ่มขึ้นนั้น เนื่องมาจากการความเข้มข้นของสารละลายสูงจะมีแรงดันออสโมติกสูง การเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมมเบรนในช่วง 40 – 60 psi (เล็กน้อย) จึงไม่สามารถส่งผลกระทบต่อค่าการกักกันของซัคซิเนตและไพรูเวต ค่าการกักกันที่ติดลบสามารถอธิบายโดย เพอร์มิเอทและรีเทนเททที่อยู่ในแต่ละด้านของ

เยื่อเมมเบรนต้องมีสภาพทางไฟฟ้าเท่ากัน (Electroneutrality) ซักซิเนตมีการถ่ายโอนมวลข้ามผ่านเมมเบรนน้อย แต่โพรวูเวทมีการถ่ายโอนมวลมากกว่า โพรวูเวทจึงถ่ายโอนมวลไปยังเพอร์มิเอทได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับใน single-solute solution เพื่อทำให้ประจุลบในเพอร์มิเอทเท่ากันกับประจุลบในรีเทนเทท ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ความเข้มข้นของโพรวูเวทในเพอร์มิเอทสูงกว่าในรีเทนเทท จึงส่งผลให้ค่าการกักกันของโพรวูเวทติดลบ (Kang and Chang, 2005)

4.2.1.2 อิทธิพลของความเข้มข้น

รูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันของซักซิเนตและโพรวูเวท ที่ความดันคงที่ 60 psi พบว่า เมื่อทำการเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นน้อยลงส่งผลให้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของซักซิเนตและโพรวูเวทเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับกรณีของโพแทสเซียมซักซิเนตใน Single-solute solution นอกจากนี้ เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลาย พบว่า ค่าการกักกันของซักซิเนตสูงกว่าค่าการกักกันของโพรวูเวท อาจเนื่องมาจากซักซิเนตไอออนมีประจุเป็นสองลบแต่โพรวูเวทมีประจุเป็นหนึ่งลบ ซักซิเนตไอออนจึงถูกผลักด้วยแรง Electrostatic repulsion มากกว่าโพรวูเวทไอออน ดังนั้นค่าการกักกันของซักซิเนตไอออนจึงสูงกว่า

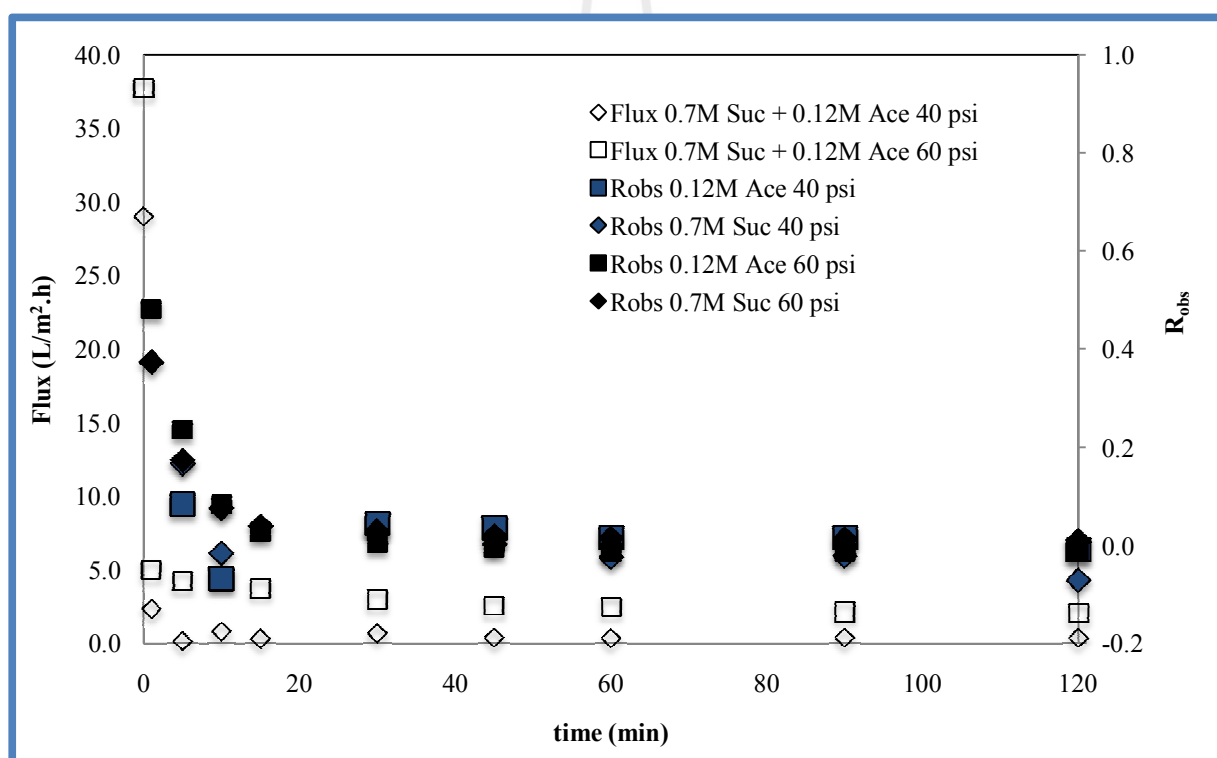


รูปที่ 4.9 ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Binary-solute solution ที่มีซักซิเนตเข้มข้น 0.7M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M

4.2.2 สารละลายผสมระหว่างซัคซิเนตและแอซิเตท

4.2.2.1 อิทธิพลของความดัน

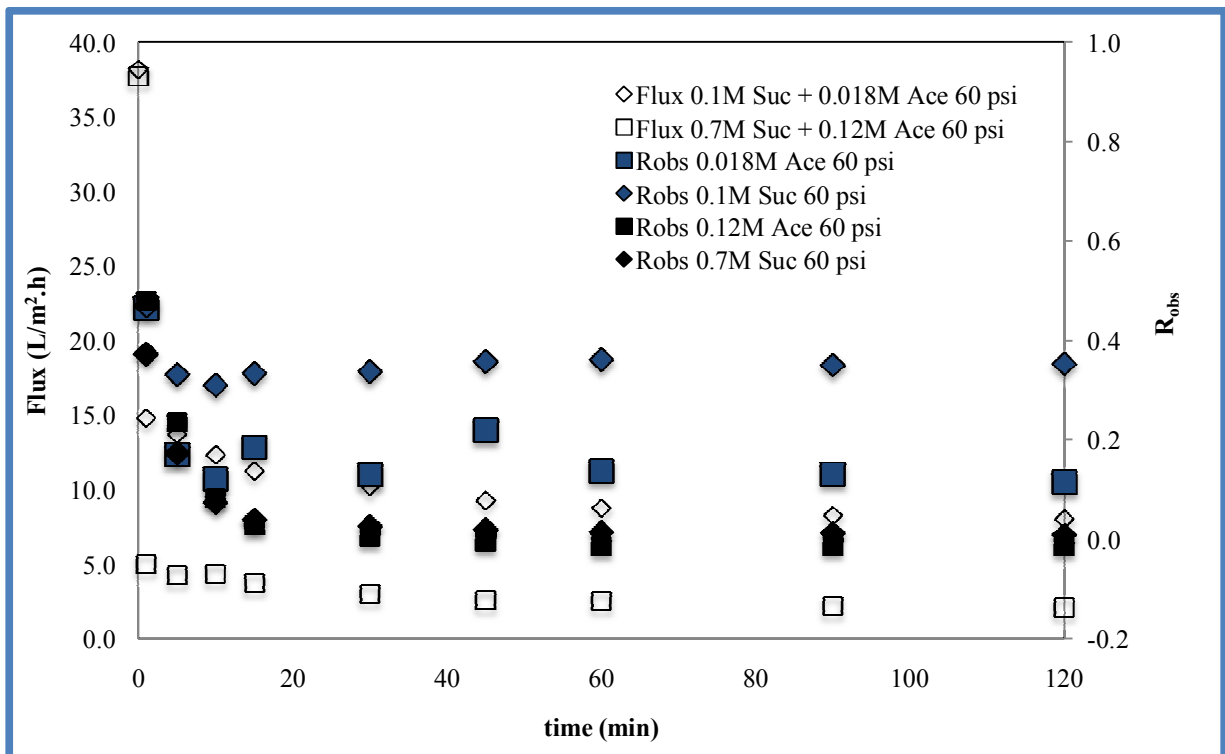
รูปที่ 4.10 แสดงอิทธิพลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์และค่าการกักกันของซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M พบว่า ค่าเพอร์มิเอทพลักซ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของความดันทรานสมเมเบรน ในขณะที่ค่าการกักกันของซัคซิเนตและไพรูเวทมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของเพอร์มิเอทพลักซ์สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับกรณีของโพแทสเซียมซัคซิเนตใน Single-solute solution ส่วนค่าการกักกันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยนั้น เนื่องมาจากการความเข้มข้นของสารละลายสูงจะมีแรงดันออสโมติกในรีเทนเทตสูง การเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมเบรนในช่วง 40 – 60 psi ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันออสโมติก จึงไม่สามารถส่งผลกระทบต่อค่าการกักกันของซัคซิเนตและไพรูเวท



รูปที่ 4.10 ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอทพลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M

4.2.2.2 อิทธิพลของความเข้มข้น

รูปที่ 4.11 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันของซัคซิเนตและแอซิเตต ที่ความดันทรานสมเมเบรน 60 psi พบว่า ที่ความเข้มข้นของซัคซิเนตและแอซิเตตสูง ค่าการกักกันของซัคซิเนตและแอซิเตตมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อความเข้มข้นของสารโพแทสเซียมแอซิเตตลดลง ค่าการกักกันของซัคซิเนตและแอซิเตตมีค่าสูงขึ้น โดยค่าการกักกันของแอซิเตตจะสูงกว่าค่าการกักกันของซัคซิเนต ผลการทดลองในส่วนนี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองใน Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนตและไพรูเวท

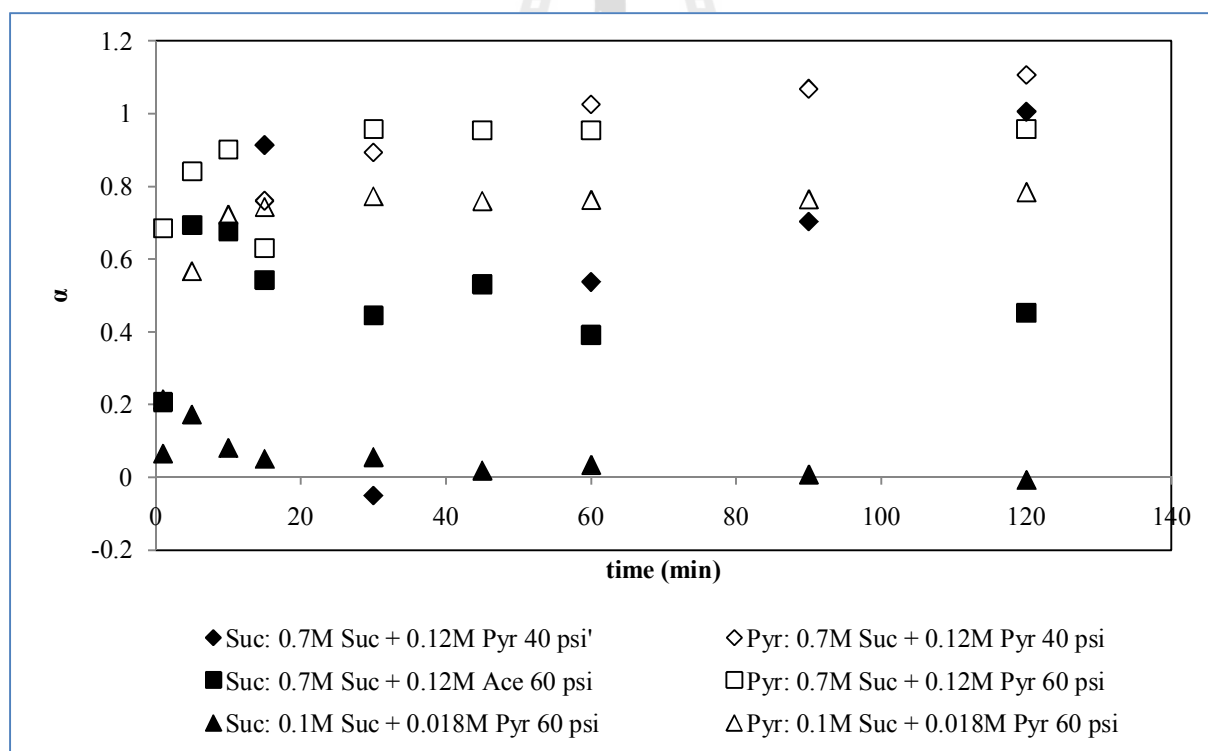


รูปที่ 4.11 ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M และแอซิเตตเข้มข้น 0.12M

4.2.4 การเบี่ยงเบนของค่าการกักกันใน Binary-solute solution

4.2.4.1 สารละลายผสมระหว่างซัคซิเนตและไพรูเวท

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ค่าเบี่ยงเบน (α) ของซัคซิเนตและไพรูเวทมีการเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นและความดันทรานสมเมเบรน (Bouchoux *et al.*, 2006) เมื่อพิจารณาค่าการเบี่ยงเบนของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนตที่สภาวะ 0.1M Suc และ 0.018M Pyr ที่ความดัน 60 psi มีค่าเข้าสู่ศูนย์ แสดงว่า ค่าการกักกันของซัคซิเนตใน Binary-solute solution ไม่แตกต่างจากค่าการกักกันใน Single-solute solution หรือการเติมไพรูเวทเข้าไปในระบบ ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการถ่ายโอนมวลของซัคซิเนต แต่ค่าเบี่ยงเบนของไพรูเวทมีค่าเข้าสู่ 0.78 แสดงว่า การถ่ายโอนมวลสารของไพรูเวทผ่านเยื่อเมมเบรนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมซัคซิเนตเข้าไปในระบบ จากผลการทดลอง พบว่า การถ่ายโอนมวลสารของซัคซิเนตไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นหรือความดันทรานสมเมเบรน ในขณะที่ไพรูเวทมีการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของไพรูเวทสามารถอธิบายได้โดย Pumping effect (Kang and chang, 2005) นั่นคือ ซัคซิเนตไอออนซึ่งเป็นตัวถูกละลายที่มีประจุสองลบและไพรูเวทซึ่งเป็นตัวถูกละลายที่มีประจุหนึ่งลบ ซัคซิเนตไอออนจะผลักไพรูเวทไอออนไปอยู่ในเพอร์มิเอทและส่งผลให้ความเข้มข้นของไพรูเวทในเพอร์มิเอทสูงขึ้นนั่นเอง



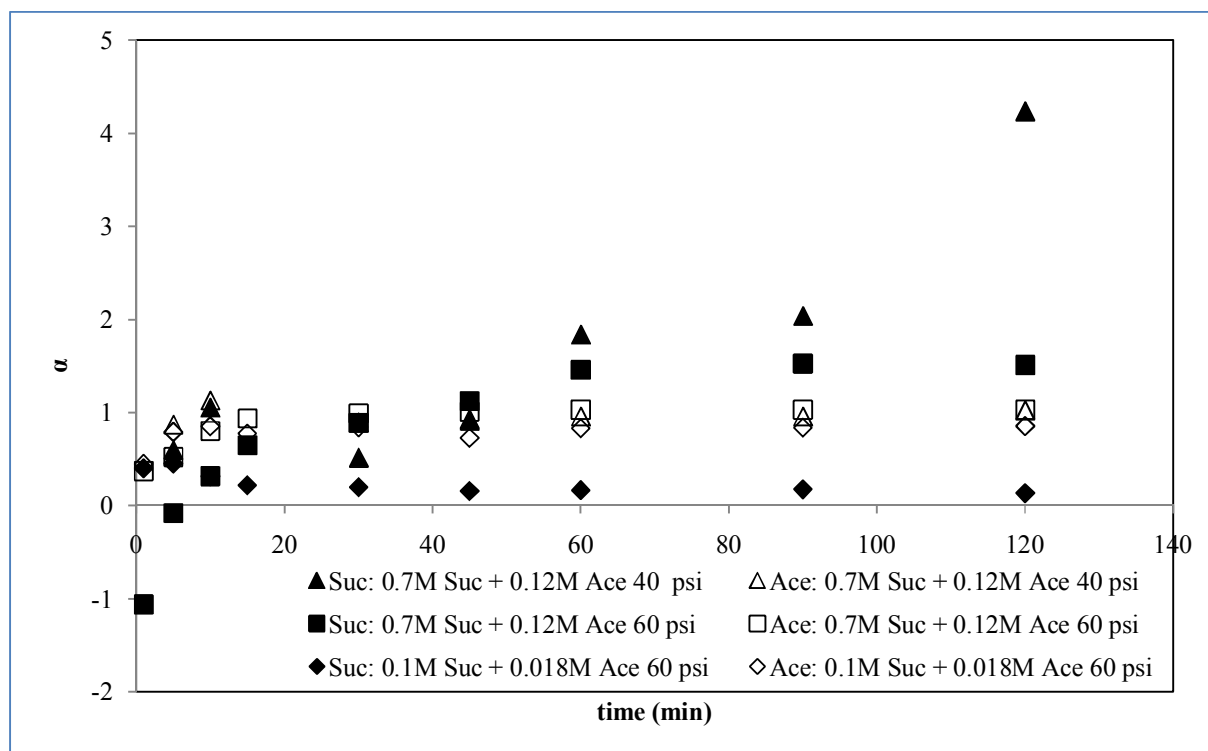
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนกับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนตและไพรูเวท ที่มีความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของทั้งซัคซิเนตและไพรูเวท มีค่าห่างจากศูนย์และมีแนวโน้มเป็นบวก แสดงว่า การถ่ายโอนมวลของทั้งแอซิเตทและไพรูเวทไปยังเพอร์มิเอท เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมแอซิเตทหรือไพรูเวทเข้าไปในระบบเป็นการเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมไอออน ซึ่งจะเข้าไปยึดจับกับประจุบนพื้นผิวของเยื่อเมมเบรน หรือเกิดปรากฏการณ์ Screening effect ส่งผลให้สูญเสียอิทธิพลของ Donan effect และการถ่ายโอนมวลสารของซัคซิเนตและไพรูเวทขึ้นอยู่กับ Size effect เท่านั้น ดังนั้น ค่าการกักกันของตัวถูกละลายทั้งสองชนิดจะลดลงเมื่อมีการเติมหรือเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลายชนิดใดชนิดหนึ่งเพิ่มเข้าไปในระบบ

4.2.4.2 สารละลายผสมระหว่างซัคซิเนตและแอซิเตท

จากรูปที่ 4.13 พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนตและแอซิเตทเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและความดันทรานสมเมมเบรน เมื่อพิจารณาค่าการเบี่ยงเบนของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนตและแอซิเตทภายใต้สภาวะ 0.1M Suc และ 0.018M Ace ที่ความดัน 60 psi มีค่าใกล้เคียงศูนย์ แสดงว่า ค่าการกักกันของซัคซิเนตใน Binary-solute solution แตกต่างจากค่าการกักกันใน Single-solute solution เพียงเล็กน้อย หรือการเติมแอซิเตทเข้าไปในระบบส่งผลกระทบต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารของซัคซิเนตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าการกักกันของแอซิเตทมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมซัคซิเนตเข้าไปในระบบ ผลการทดลองที่พบมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของสารละลายผสมระหว่างซัคซิเนตและไพรูเวท และสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกัน

เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของทั้งซัคซิเนตและแอซิเตท มีค่าห่างจากศูนย์และมีแนวโน้มเป็นบวก แสดงว่า การถ่ายโอนมวลสารของทั้งแอซิเตทและไพรูเวทไปยังเพอร์มิเอทเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมแอซิเตทหรือไพรูเวทเข้าไปในระบบ เป็นการเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมไอออน ซึ่งจะเข้าไปยึดจับกับประจุบนพื้นผิวของเยื่อเมมเบรน ผลการทดลองที่พบมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในสารละลายผสมระหว่างซัคซิเนตและไพรูเวท และสามารถอธิบายผลการทดลองได้ในลักษณะเดียวกัน



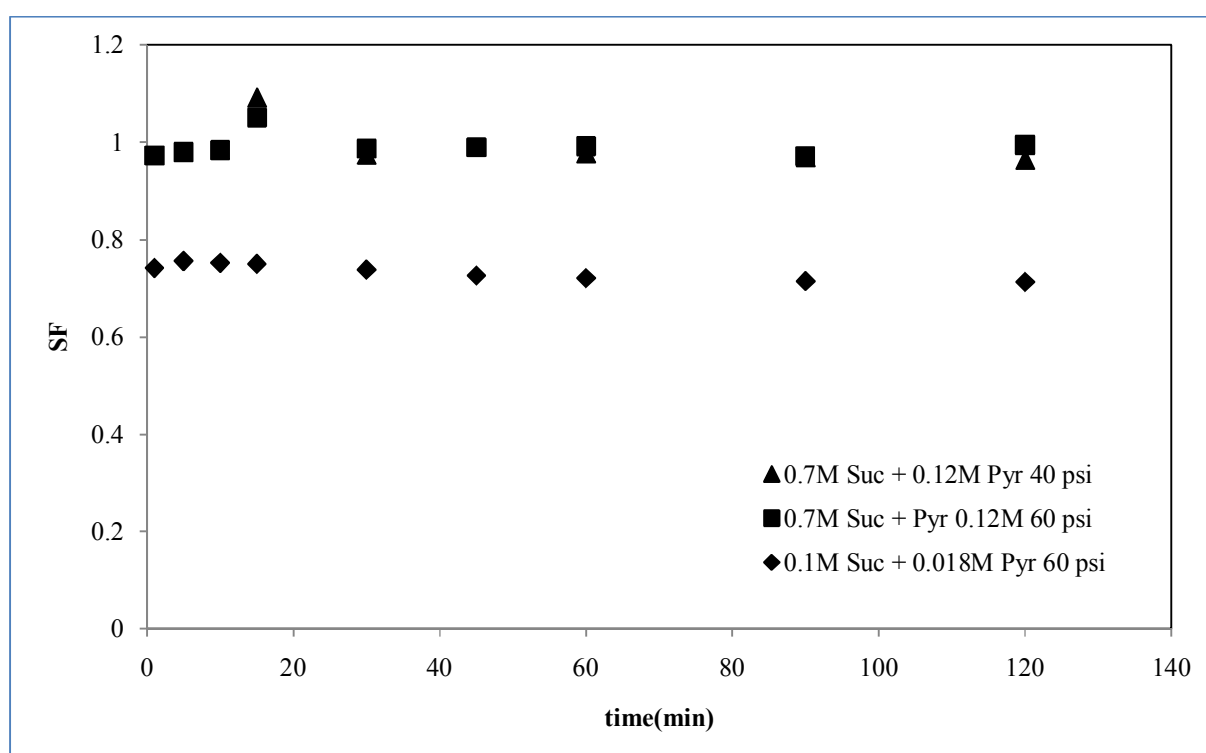
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนกับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนตและแอซิเตต ที่มี ความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน

4.2.5 ความสามารถในการแยก

4.2.5.1 สารละลายผสมระหว่างซัคซิเนตและไพรูเวท

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ค่า Separation factor ใน Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนต 0.7M และไพรูเวท 0.12M ที่ความดัน 40 psi และ 60 psi มีค่าใกล้เคียงกับหนึ่ง แสดงว่า ค่าการกักกันของซัคซิเนตและไพรูเวท ที่สภาวะการทดลองทั้ง 2 กรณีมีค่าใกล้เคียงกันและไม่เกิดการแยกขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายทั้งสองกรณีมีค่าสูง ส่งผลให้อธิพล Donan effect หดไป กลไกในการถ่ายโอนมวลสารจึงขึ้นอยู่กับ Size effect เท่านั้น เนื่องจากซัคซิเนตไอออนและไพรูเวทมีน้ำหนักโมเลกุลหรือมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเยื่อเมมเบรน จึงทำให้เยื่อเมมเบรนไม่สามารถกักกันตัวถูกละลายทั้งสองชนิดไว้ได้ ค่าการกักกันของตัวถูกละลายทั้งสองมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ดังนั้น การเพิ่มหรือลดความดันจึงไม่มีผลต่อการแยก

ส่วนที่สภาวะการทดลอง สารละลายผสมระหว่างซัคซิเนต 0.1M และไพรูเวต 0.018M ที่ความดัน 60 psi มีค่าแตกต่างจากหนึ่ง โดยมีค่าเท่ากับ 0.71 แสดงว่าเกิดการแยกชั้น ณ สภาวะนี้ นอกจากนี้ ค่า Separation factor ที่น้อยกว่าหนึ่ง แสดงให้เห็นว่า ซัคซิเนตถูกกักกันไว้ในรีเทนเทท ขณะที่ไพรูเวตซึมผ่านไปยังเพอร์มิเอทได้มากกว่าซัคซิเนต เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายในกรณีนี้มีค่าต่ำ จึงยังหลงเหลืออิทธิพลของ Donan effect กลไกในการถ่ายเทมวลสารจึงขึ้นอยู่กับ ทั้ง Charge effect และ Size effect ทำให้เยื่อเมมเบรนสามารถกักกันตัวถูกละลายทั้งสองชนิดได้ แต่ตัวถูกละลายทั้งสองชนิดมีค่าการกักกันแตกต่างกัน นั่นคือซัคซิเนตถูกกักกันได้มากกว่าไพรูเวตจึงทำให้ค่า Separation factor แตกต่างจากหนึ่ง ดังนั้น การเจือจางสารละลาย Binary-solute solution ให้มีความเข้มข้นน้อยลงส่งผลให้เกิดการแยก

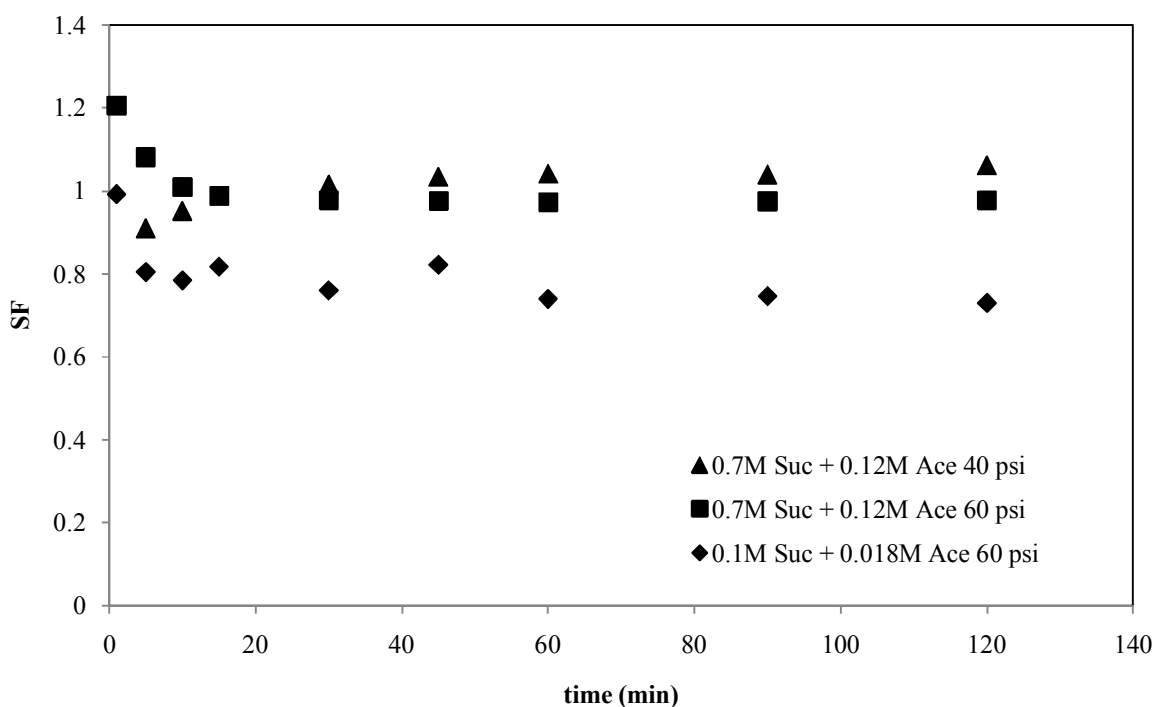


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Separation factor กับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนตและแอซิเตท ที่มีความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน

4.2.5.2 สารละลายผสมระหว่างซัคซิเนตและแอซิเตท

จากรูปที่ 4.15 พบว่า ค่า Separation factor ใน Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนต 0.7M และแอซิเตท 0.12M ที่ความดัน 40 psi และ 60 psi มีค่าใกล้เคียงกับหนึ่ง แสดงว่า ค่าการกักกันของซัคซิเนตและแอซิเตทที่สภาวะการทดลองทั้ง 2 กรณีมีค่าใกล้เคียงกันและไม่เกิดการแยกชั้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองในสาร Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนต 0.7M และไพรูเวท 0.12M

ส่วนที่สภาวะที่มีซัคซิเนต 0.1M และแอซิเตท 0.018M ที่ความดัน 60 psi มีค่าแตกต่างจากหนึ่ง โดยมีค่าเท่ากับ 0.73 แสดงว่าเกิดการแยกชั้น ณ สภาวะนี้ นอกจากนี้ ค่า Separation factor ที่น้อยกว่าหนึ่ง แสดงให้เห็นว่า ซัคซิเนตถูกกักกันไว้ในรีเทนเทท ขณะที่แอซิเตทซึมผ่านไปยังเพอร์มิเอทได้มากกว่าซัคซิเนต ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองในสาร Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนต 0.7M และไพรูเวท 0.12M



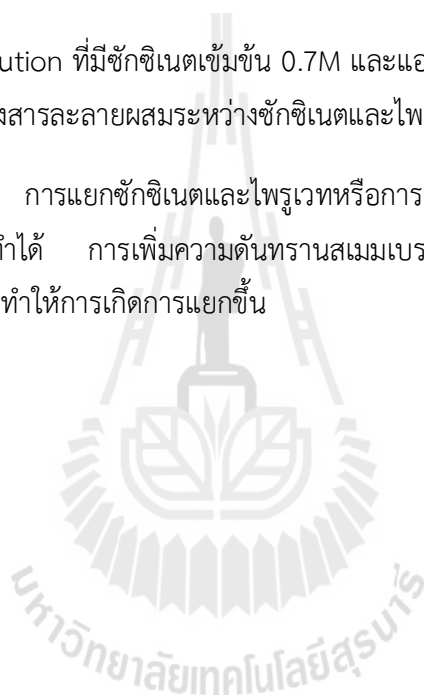
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Separation factor กับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนตและแอซิเตท ที่มีความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน

4.2.6 สรุป

สำหรับ Binary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตเข้มข้น 0.7M และโพรุเวทเข้มข้น 0.12M การแยกซัลฟิเนตและโพรุเวทด้วยเยื่อเมมเบรนชนิดนาโนไม่สามารถก่อให้เกิดการแยกได้ ส่วนการเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนไม่ส่งผลต่อการแยก เนื่องจาก สารละลายมีความเข้มข้นสูงทำให้ไม่มีอิทธิพลของ Donan effect การเพิ่มหรือลดความดันจึงไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสอง ดังนั้น ความสามารถในการแยกไม่ขึ้นกับความดันทรานสมเมมเบรน อย่างไรก็ตาม การเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นน้อยลงทำให้เกิดการแยกขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำระบบได้รับอิทธิพลของ Donan effect และซัลฟิเนตและโพรุเวทมีการถ่ายโอนมวลสารผ่านเมมเบรนที่แตกต่างกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดการแยกขึ้น

สำหรับ Binary-solute solution ที่มีซัลฟิเนตเข้มข้น 0.7M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของสารละลายผสมระหว่างซัลฟิเนตและโพรุเวท

จากผลการทดลองข้างต้น การแยกซัลฟิเนตและโพรุเวทหรือการแยกซัลฟิเนตและแอสซิเตทด้วยเยื่อเมมเบรนนาโนพิวเตรชันไม่สามารถกระทำได้ การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนไม่สามารถก่อให้เกิดการแยกเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การเจือจางสารละลายทำให้การเกิดการแยกขึ้น

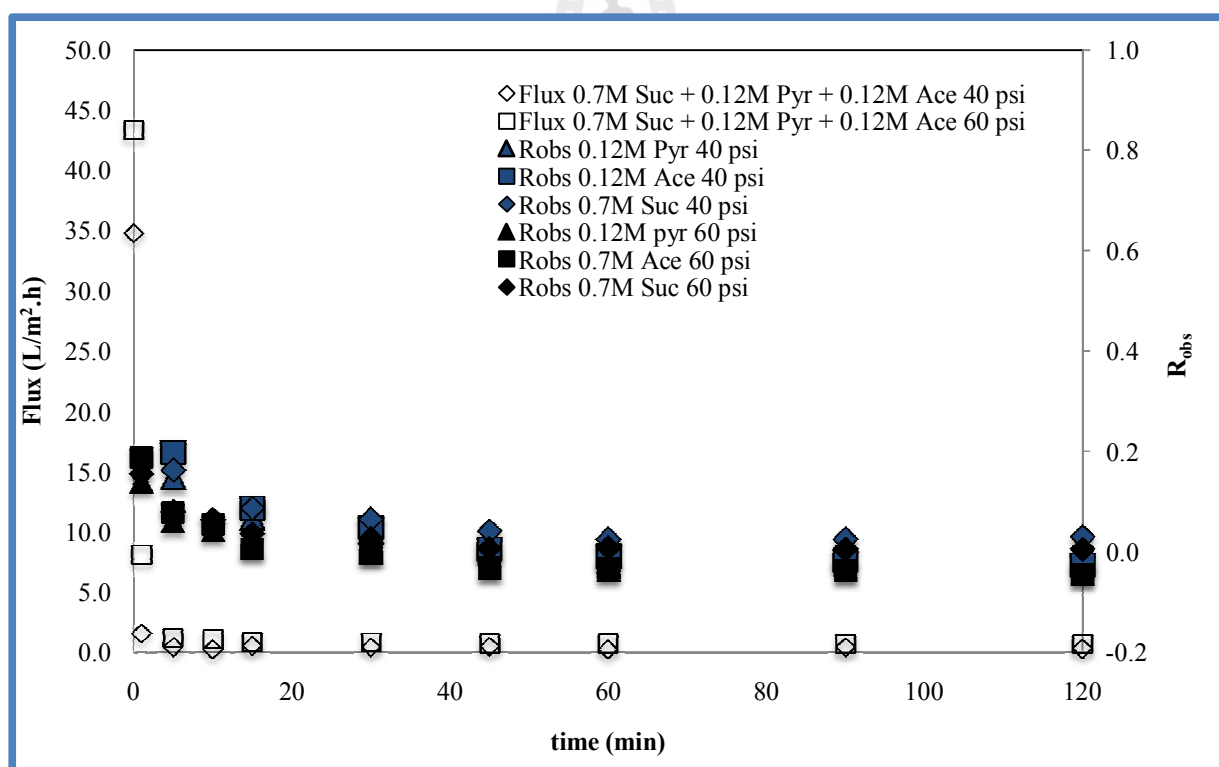


4.3 อิทธิพลของ Ionic composition ต่อการถ่ายโอนมวลและการแยกใน Ternary-solute solution

4.3.1 ปัจจัยที่มีต่อการถ่ายโอนมวลสาร

4.3.1.1 อิทธิพลของความดัน

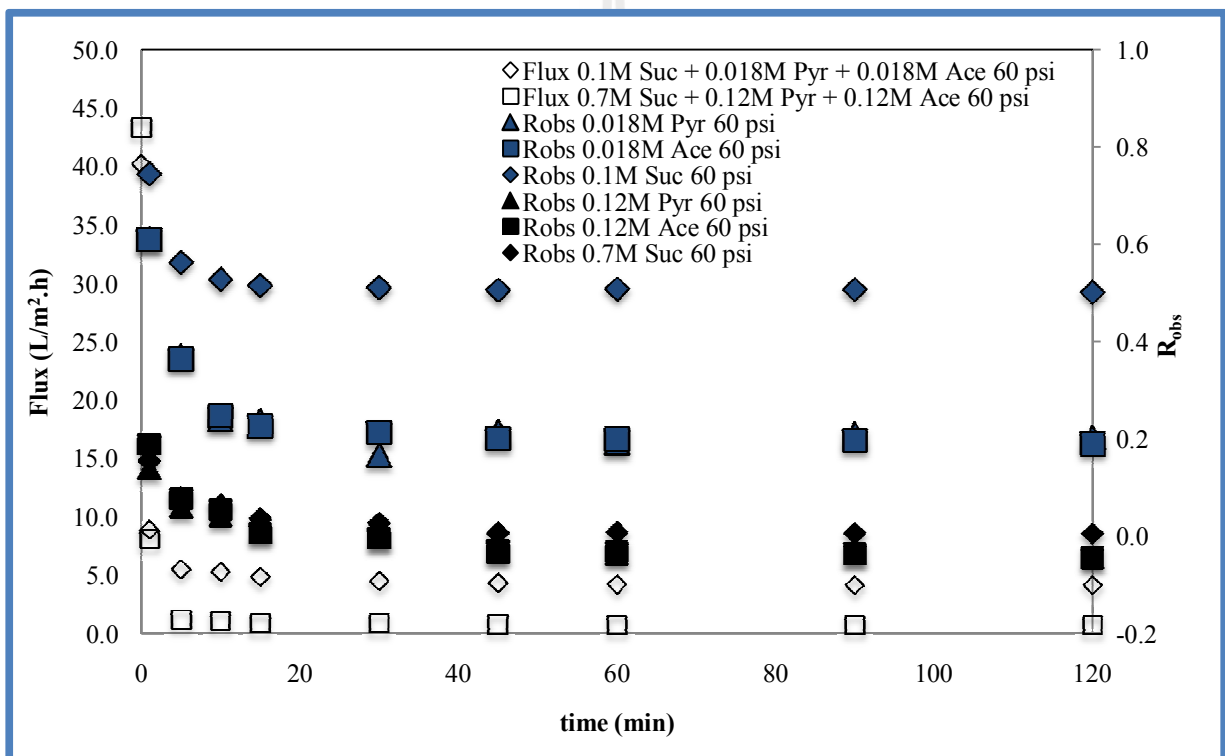
รูปที่ 4.16 แสดงอิทธิพลของความดันต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์และค่าการกักกันของซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวตเข้มข้น 0.12M และแอซิเตตเข้มข้น 0.12M ในสารละลาย Ternary-solute solution พบว่า การเปลี่ยนแปลงความดันมีผลต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์และค่าการกักกันน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายสูงมีความดันออสโมติกไนรีเทนเทตสูง การเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมมเบรนเพียงเล็กน้อยจึงไม่อาจส่งผลกระทบต่อ ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ ค่าการกักกันที่เข้าสู่ศูนย์นั้น แสดงให้เห็นถึงการอ้อมตัวของ Screening effect นั่นคือ ไม่มีแรงผลัก Electrostatic repulsion เกิดขึ้นอีกต่อไป และ Selectivity ของเมมเบรนจะขึ้นกับ Size effect เท่านั้น เนื่องจากโมเลกุลของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าขนาดของรูพรุนจึงทำให้เยื่อเมมเบรนไม่สามารถกักกันตัวถูกละลายทั้งสามชนิดได้จึงทำให้ค่าการกักกันเป็นศูนย์



รูปที่ 4.16 ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Ternary-solute solution ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวต 0.2M และแอซิเตตเข้มข้น 0.12M

4.3.1.2 อิทธิพลของความเข้มข้น

รูปที่ 4.17 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นต่อเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันของซัคซีนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M พบว่า การลดความเข้มข้นของสารละลายลงจะทำให้ค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์และค่าการกักกันเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการลดความเข้มข้นของสารละลายลงเป็นการลดแรงดันออสโมติกในรีเทนเททจึงทำให้ระบบมีแรงขับเคลื่อนสูงขึ้นเพอร์มิเอทฟลักซ์จึงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การลดความเข้มข้นของสารละลายเป็นการเพิ่มอิทธิพลของ Charge effect ทำให้เมมเบรนมีแรงผลั Electrostatic repulsion เพิ่มขึ้นลักษณะเช่นนี้จะทำให้ค่าการกักกันเพิ่มสูงขึ้น ค่าการกักกันของซัคซีนตมีค่าสูงกว่าค่าการกักกันของทั้งไพรูเวทและแอซิเตท เนื่องมาจากซัคซีนตไอออนมีประจุเป็นสองลบขณะที่ไพรูเวทไอออนและแอซิเตทไอออนมีประจุหนึ่งลบ ดังนั้นประจุลบบนเยื่อเมมเบรนจึงแรงผลัซัคซีนตได้มากกว่าไพรูเวทและแอซิเตท



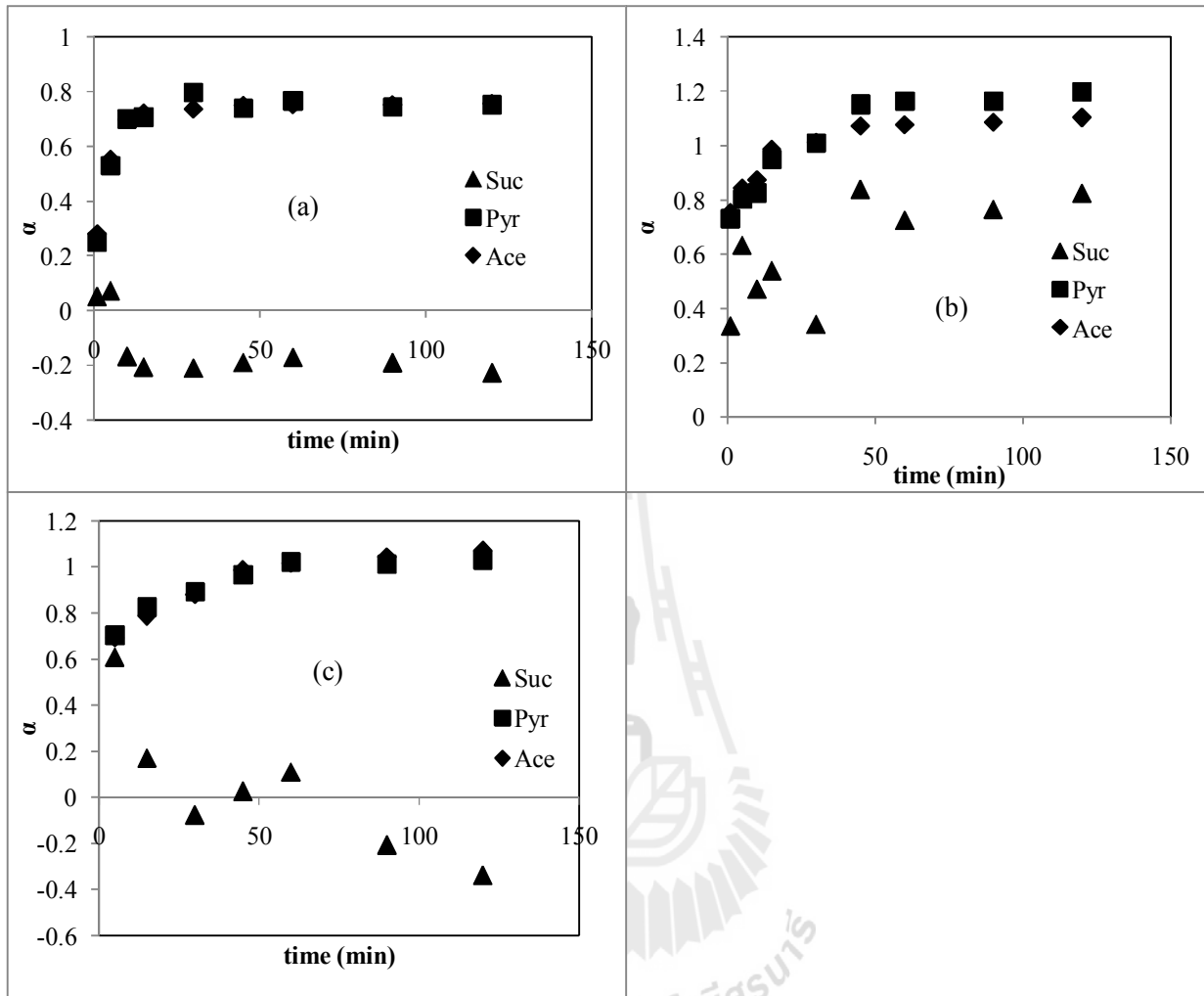
รูปที่ 4.17 ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทฟลักซ์ และค่าการกักกันของสารละลาย Ternary-solute solution ที่มีซัคซีนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวท 0.12M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M

4.3.2 การเบี่ยงเบนของค่าการกักกันในสาร Ternary-solute solution

รูปที่ 4.18a แสดงค่าเบี่ยงเบน (α) ของซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตท ใน Ternary-solute solution ที่มี ซัคซิเนตเข้มข้น 0.1M ไพรูเวท เข้มข้น 0.018M และแอซิเตทเข้มข้น 0.018M ที่ความดัน 60 psi ที่สถานะที่มี สารละลายมีความเข้มข้นต่ำ พบว่า ในระบบที่มีไพรูเวทและแอซิเตทผสมอยู่กับซัคซิเนตนั้น ค่าเบี่ยงเบนของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีค่าห่างจากศูนย์แสดงว่า การเพิ่ม ion composition ทำให้ตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีการถ่ายโอนมวลสารเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนตมีค่าเป็นลบแสดงว่าซัคซิเนตไอออนมีการถ่ายโอนมวลสารผ่านเยื่อเมมเบรนน้อยลง ส่วนค่าเบี่ยงเบนของไพรูเวทและแอซิเตทมีค่าเป็นบวกและมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการถ่ายโอนมวลสารของไพรูเวทและแอซิเตทมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีซัคซิเนตปรากฏอยู่ในระบบ ลักษณะเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า ระบบมีการพยายามรักษาสมดุลของประจุในรีเทนเททและเพอร์มิเอท (Electroneutrality) การที่ไพรูเวทและแอซิเตทถ่ายโอนมวลสารไปยังเพอร์มิเอทมากขึ้น ซัคซิเนตจึงต้องอยู่ในรีเทนเททให้มากขึ้นเพื่อให้สภาพไฟฟ้าทั้งรีเทนเททและเพอร์มิเอทเท่ากัน

รูปที่ 4.18b แสดงค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตท ใน Ternary-solute solution ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวท เข้มข้น 0.12M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M ความดัน 60 psi ที่สถานะที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูง พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดห่างจากศูนย์และมีแนวโน้มเป็นค่าบวก แสดงว่าการถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีค่าสูงขึ้น การปรากฏอยู่ของซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตทในสารละลายทำให้มีปริมาณของโพแทสเซียมไอออนในระบบสูง จึงทำให้ Charge effect มีอิทธิพลน้อยลงโดยทำให้แรงผลัก Electrostatic interaction ลดลง ดังนั้นการถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดจึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การถ่ายโอนมวลสารใน Single-solute solution

รูปที่ 4.18c แสดงค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตท ใน Ternary-solute solution ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวท เข้มข้น 0.12M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M ความดัน 40 psi จากผลการทดลองของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตทปรากฏอยู่ในสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความดัน 40 psi มีค่าเบี่ยงเบนเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนที่ความดัน 60 psi แสดงว่า การถ่ายโอนมวลสารทั้งสามชนิดจะได้รับอิทธิพลน้อยกว่าเมื่อมีการป้อนแรงขับเคลื่อนให้กับระบบน้อยลง ดังนั้น ที่สถานะที่มีความดันสูงจะทำให้การถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่ความดันต่ำกว่า

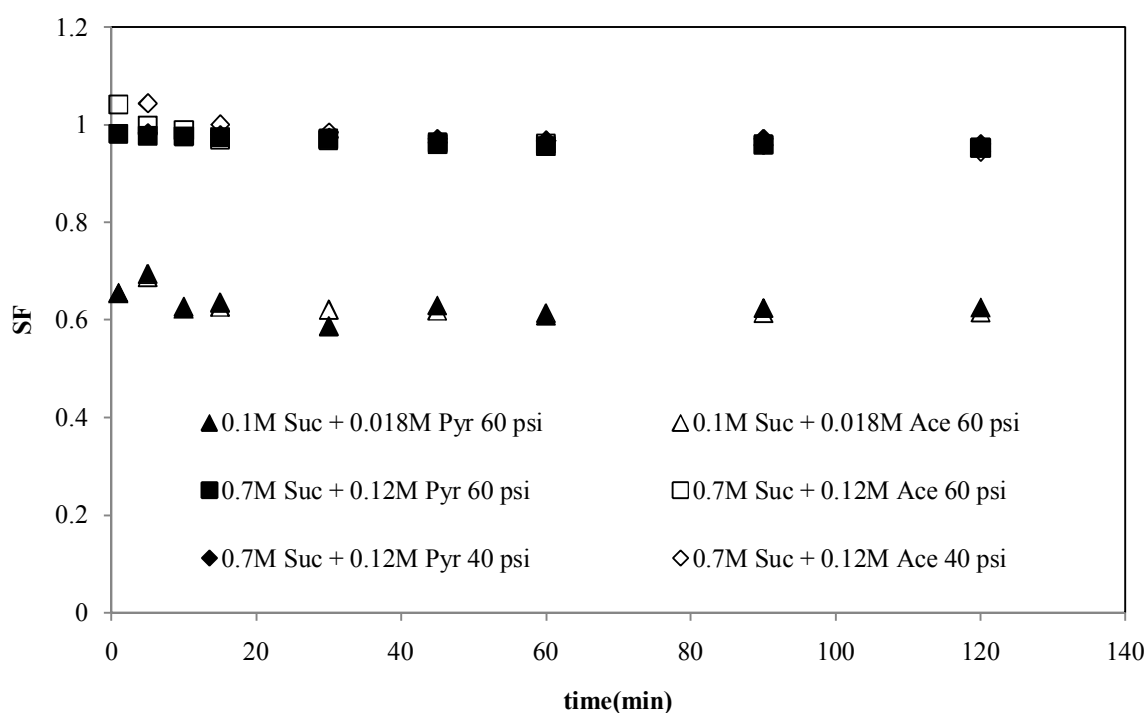


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนกับเวลาใน Ternary-solute solution ที่มีซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตท (a) 0.1M Suc + 0.018M Pyr + 0.018M Ace 60psi (b) 0.7M Suc + 0.12M Pyr + 0.12M Ace 60 psi และ (c) 0.7M Suc + 0.12M Pyr + 0.12M Ace 40 psi

4.3.3 ความสามารถในการแยก

จากรูปที่ 4.19 พบว่า ค่า Separation factor ใน Ternary-solute solution ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวตเข้มข้น 0.12M และแอซิเตตเข้มข้น 0.12M ที่ความดัน 40 psi และ 60 psi มีค่าใกล้เคียงกับ 1.0 แสดงว่าที่สภาวะความดันทั้ง 2 ค่านี้ไม่เกิดการแยกขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองในสาร Binary-solute solution

ส่วนที่สภาวะที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.1M ไพรูเวตเข้มข้น 0.018M และแอซิเตตเข้มข้น 0.018M ในสารละลาย ที่ความดัน 60 psi มีค่าแตกต่างจากหนึ่ง โดยมีค่า Separation factor ของซัคซิเนต/ไพรูเวต เท่ากับ 0.61 และค่า Separation factor ของซัคซิเนต/แอซิเตต เท่ากับ 0.62 แสดงว่าเกิดการแยกขึ้น ณ สภาวะนี้ นอกจากนี้ ค่า Separation factor ที่น้อยกว่าหนึ่ง แสดงให้เห็นว่า ซัคซิเนตถูกกักกันไว้ในรีเทนเทท ขณะที่ไพรูเวตหรือแอซิเตตซึมผ่านไปยังเพอร์มิเอทได้มากกว่าซัคซิเนต ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองในสาร Binary-solute solution นอกจากนี้ ที่สภาวะการทดลองนี้ค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์และเปอร์เซ็นต์ผลได้ของซัคซิเนตในรีเทนเทตมีค่าเท่ากับ 63.57% และ 49.90% ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Separation factor กับเวลา ใน Binary-solute solution ที่มีซัคซิเนตและแอซิเตต ที่มีความเข้มข้นและความดันแตกต่างกัน

ค่า Separation factor ที่พบใน Ternary-solute solution มีค่าแตกต่างจากหนึ่งมากกว่าค่า Separation factor ที่พบใน Binary-solute solution นั่นคือ ความสามารถในการแยกของเยื่อเมมเบรนสูงขึ้น เมื่อในสารละลายมีจำนวนของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากในระบบมีปริมาณของโพแทสเซียมไอออนเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้จะทำให้อิทธิพลของ Donan effect น้อยลง การถ่ายโอนมวลสารของโพรูเวทและแอซิเตทเพิ่มขึ้น แต่การถ่ายโอนมวลสารของซัคซิเนตได้รับผลกระทบจากการมีโพแทสเซียมไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้นน้อยกว่า เมื่อซัคซิเนต โพรูเวท และแอซิเตท ได้รับผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของโพแทสเซียมไอออนไม่เท่ากัน จึงทำให้การแยกเกิดขึ้นได้สูงขึ้น

4.3.4 สรุป

สำหรับ Ternary-solute solution ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M โพรูเวทเข้มข้น 0.12M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M ที่สภาวะที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูงการใช้เยื่อเมมเบรนชนิดนาโนไม่สามารถทำการแยกตัวถูกละลายทั้งสามชนิดออกจากกันได้ ส่วนการเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนไม่ส่งผลต่อการแยกด้วยเช่นกัน ดังนั้นความสามารถในการแยกไม่ขึ้นกับความดันทรานสมเมมเบรน ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองใน Binary-solute solution

การเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นน้อยลงก่อให้เกิดการแยกขึ้นได้ ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำระบบได้รับอิทธิพลของ Donan effect และซัคซิเนตและโพรูเวทหรือแอซิเตทมีการถ่ายโอนมวลสารผ่านเมมเบรนที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการแยกของ Ternary-solute solution สูงกว่าความสามารถในการแยกของ Binary-solute solution และยังพบว่า เพอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์และเปอร์เซ็นต์ผลได้ของซัคซิเนตในรีเทนเทตมีค่าเท่ากับ 63.57% และ 49.90% ตามลำดับ

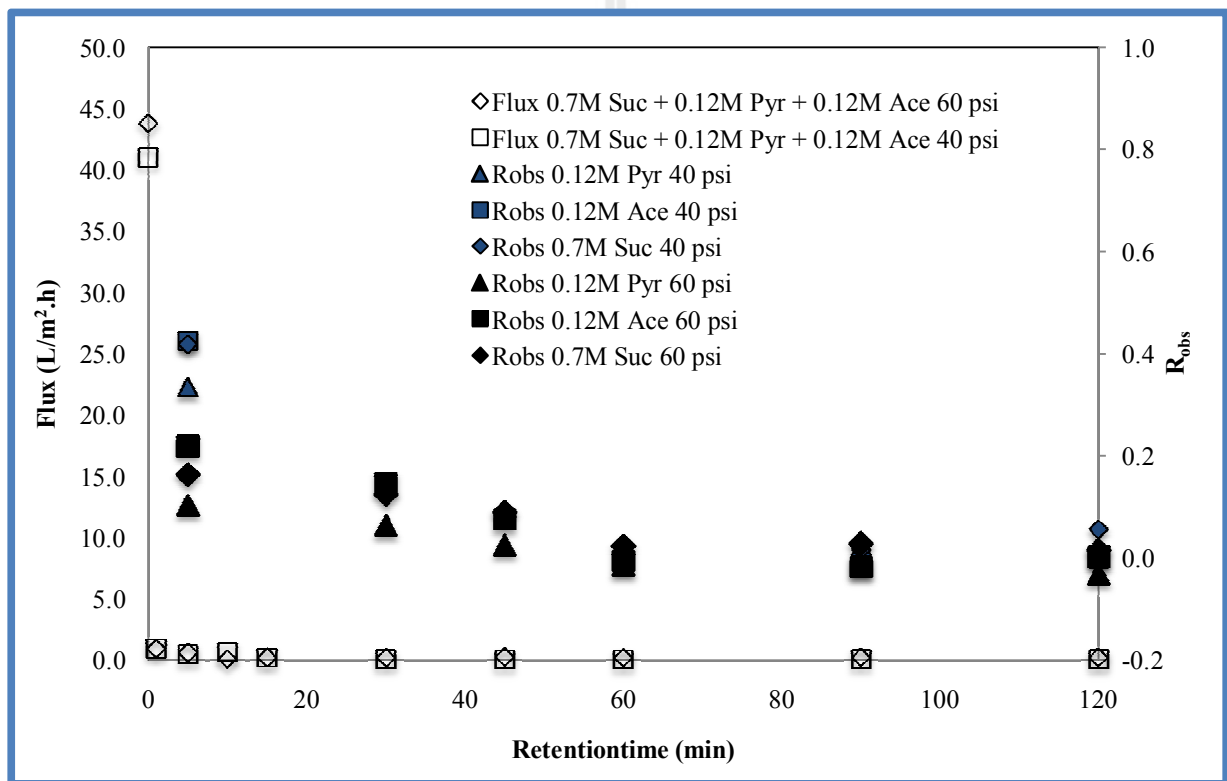
จากผลการทดลองข้างต้น การแยกตัวถูกละลายทั้งสามชนิดใน Ternary-solute solution ด้วยเยื่อเมมเบรนนาโนพิวเตรชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่สภาวะที่มีความเข้มข้นสูง การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนไม่สามรถก่อให้เกิดการแยกด้วยเช่นกัน การเจือจางสารละลายเท่านั้นที่ทำให้เกิดการแยกขึ้น ความสามารถในการแยกของ Ternary-solute solution สูงกว่าใน Binary-solute solution

4.4 อิทธิพลของ Ionic composition ต่อการถ่ายโอนมวลและการแยกในน้ำหมักจริง

4.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายโอนมวล

4.4.1.1 อิทธิพลของความดัน

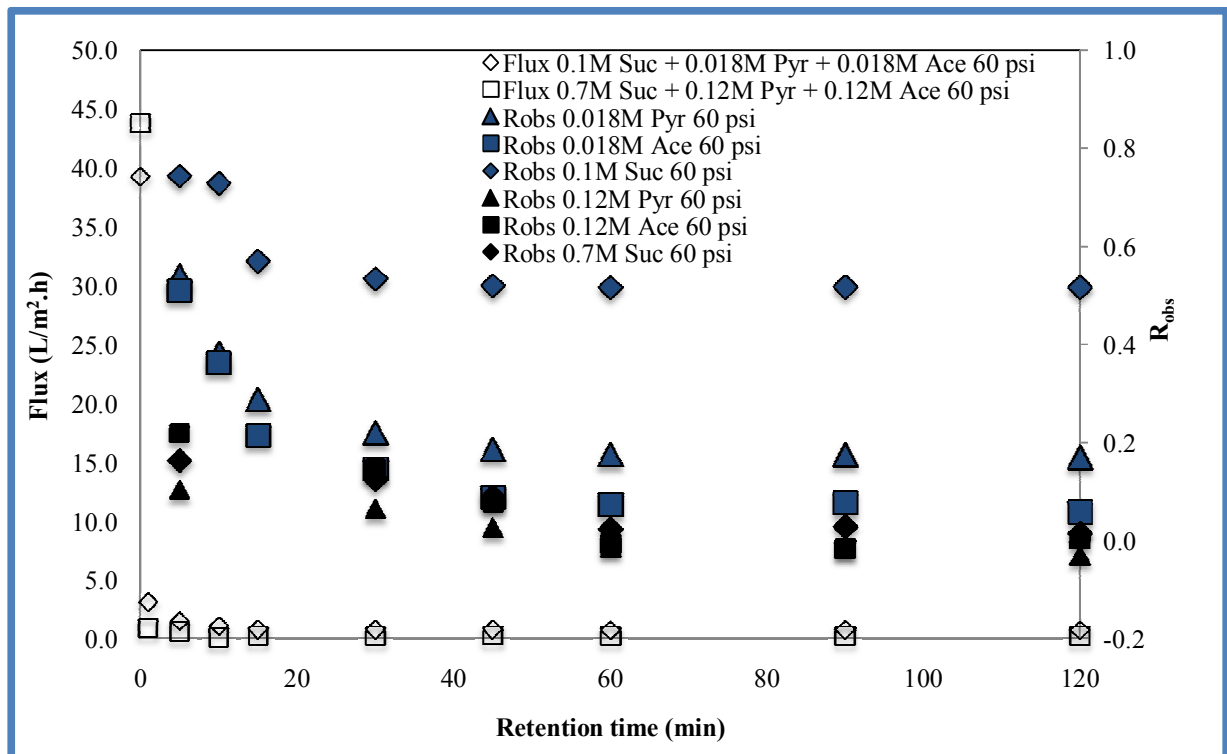
รูปที่ 4.20 แสดงอิทธิพลของความดันทรานสมเมเบรนต่อเพอร์มิเอตฟลักซ์และค่าการกักกันของซัคซิเนต ไพรูเวท แอซิเตท และสาร unknown ในน้ำหมักจริง พบว่า ค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์และค่าการกักกันมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความดันทรานสมเมเบรนเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความดันมีผลต่อการเพอร์มิเอตฟลักซ์และค่าการกักกันน้อยมาก สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับสารละลาย Ternary-solute solution



รูปที่ 4.20 ผลของความดันต่อค่าเพอร์มิเอตฟลักซ์ และค่าการกักกันของตัวถูกละลายในน้ำหมักจริง ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M แอซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown อื่นๆ

4.4.1.2 อิทธิพลของความเข้มข้น

รูปที่ 4.21 แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทพล็กซ์และค่าการกักกันของซั๊กซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M พบว่า การลดความเข้มข้นของสารละลายลงจะทำให้ค่าเพอร์มิเอทพล็กซ์และค่าการกักกันเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับสารละลาย Ternary-solute solution นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าการกักกันของซั๊กซิเนตและไพรูเวทมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าการกักกันในสารละลาย Ternary-solute solution แต่ค่าการกักกันของแอสซิเตทจะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย



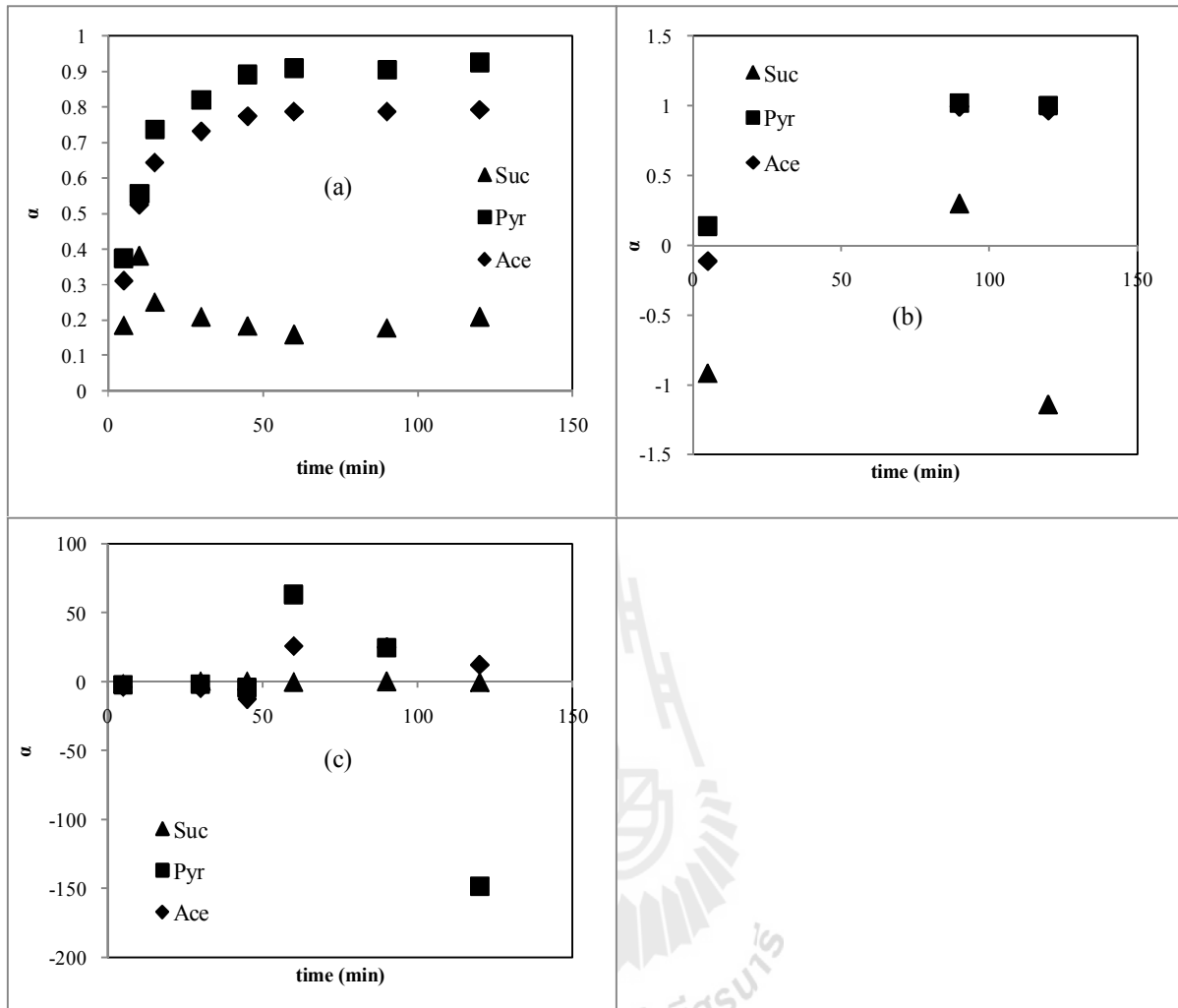
รูปที่ 4.21 ผลของความเข้มข้นต่อค่าเพอร์มิเอทพล็กซ์ และค่าการกักกันของตัวถูกละลายในน้ำหมักจริง ที่มีซั๊กซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M แอสซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown อื่นๆ

4.4.2 การเบี่ยงเบนของค่าการกักกันในน้ำหมักจริง

รูปที่ 4.22a แสดงค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตท ในน้ำหมักจริงที่มี ซัคซิเนตเข้มข้น 0.1M ไพรูเวทเข้มข้น 0.018M และแอซิเตทเข้มข้น 0.018M และสาร unknown ที่ความดัน 60 psi จากผลการทดลองของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีค่าห่างจากศูนย์ โดยค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนตมีค่าเข้าสู่ 0.2 ส่วนค่าเบี่ยงเบนของไพรูเวทและแอซิเตทมีค่าเท่ากับ 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ แสดงว่า การถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระบบมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น สาร unknown ในน้ำหมักจริงสามารถส่งผลกระทบต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีการเปลี่ยนแปลง โดยการถ่ายโอนมวลสารเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ไพรูเวท > แอซิเตท > ซัคซิเนต ความแตกต่างที่เกิดขึ้นทำให้ผู้วิจัยสามารถคาดหวังว่าการแยกจะเกิดขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง Ternary-solute solution และน้ำหมักจริง พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของน้ำหมักจริงมีค่าสูงกว่าค่าเบี่ยงเบนของ Ternary-solute solution ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในน้ำหมักมีสารที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกได้ ประจุบวกเหล่านี้จะส่งเสริมให้เกิด Screening effect มากขึ้น ทำให้การถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น ส่วนการที่ค่าเบี่ยงเบนของไพรูเวทมีค่าสูงกว่าแอซิเตท อาจเนื่องมาจากไพรูเวทมีความแรงของประจุน้อยกว่าแอซิเตทจึงถูกผลักไปอยู่ในเฟอรัมไอออนได้มากกว่า

รูปที่ 4.22b แสดงค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตท ในน้ำหมักจริง ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown ที่ความดัน 60 psi จากผลการทดลองของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีค่าห่างจากศูนย์และมีแนวโน้มเป็นค่าบวก แสดงว่า การถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย การปรากฏอยู่ของสาร unknown ในน้ำหมักจริงส่งผลกระทบต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารของซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตท เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหมักจริงมีความเข้มข้นของสารละลายสูง จึงทำให้เกิด Screening effect ได้เกือบสมบูรณ์แล้ว การปรากฏของสาร unknown เพิ่มเติมในระบบ จึงส่งผลกระทบต่อค่าการถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดไม่มากนัก

รูปที่ 4.22c แสดงค่าเบี่ยงเบนของซัคซิเนต ไพรูเวท และแอซิเตท ในน้ำหมักที่มี ซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M และแอซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown ที่ความดัน 40 psi จากผลการทดลองของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง พบว่า ค่าเบี่ยงเบนของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรากฏอยู่ของสาร unknown ในน้ำหมักจริงที่ความดัน 40 psi มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าค่าเบี่ยงเบนที่ความดัน 60 psi แสดงว่า การถ่ายโอนมวลสารทั้งสามชนิดจะได้รับอิทธิพลน้อยกว่าเมื่อมีการป้อนแรงขับเคลื่อนให้กับระบบน้อยลง ดังนั้น ที่สภาวะที่มีความดันสูงจะทำให้ค่าการกักกันของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่ความดันต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องผลการทดลองที่ได้ใน Ternary-solute solution

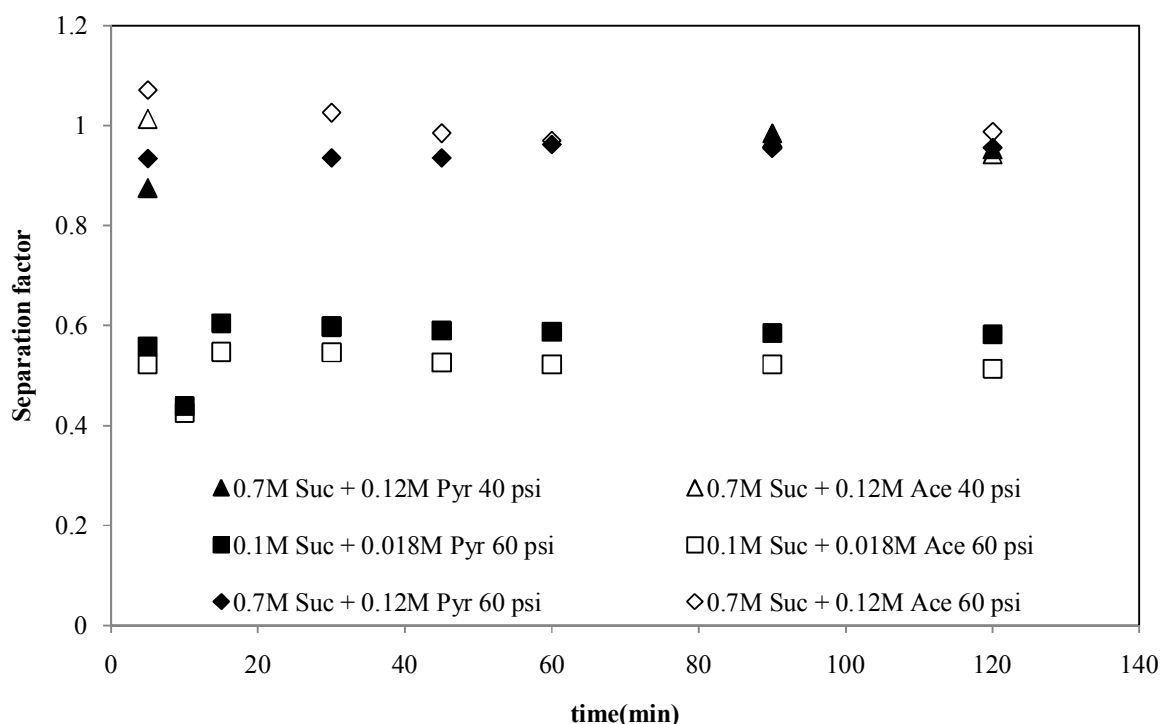


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนกับเวลาของตัวถูกละลายในน้ำหมักจริง ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M แอซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown อื่นๆ

4.4.3 ความสามารถในการแยก

จากรูปที่ 4.23 พบว่า ค่า Separation factor ในน้ำหมักจริงที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M แอซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown ที่ความดัน 40 psi และ 60 psi มีค่าใกล้เคียงกับหนึ่ง แสดงว่า ที่สภาวะความดันทั้ง 2 ค่านี้ไม่เกิดการแยกขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในสาร Ternary-solute solution

ส่วนที่สภาวะสารละลายที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.1M ไพรูเวทเข้มข้น 0.018M แอซิเตทเข้มข้น 0.018M และสาร unknown ที่ความดัน 60 psi มีค่าแตกต่างจากหนึ่ง โดยมีค่า Separation factor ของซัคซิเนต/ไพรูเวท เท่ากับ 0.58 และค่า Separation factor ของซัคซิเนต/แอซิเตท เท่ากับ 0.51 แสดงว่าเกิดการแยกขึ้น ณ สภาวะนี้ นอกจากนี้ ค่า Separation factor มีค่าห่างจากหนึ่ง แสดงให้เห็นว่า ซัคซิเนตถูกกักกันไว้ในรีเทนเทท ในขณะที่ ไพรูเวทหรือแอซิเตทซึมผ่านไปยังเพอร์มิเมทได้มากกว่าซัคซิเนต ซึ่งความสามารถในการแยกใกล้เคียงกับความสามารถในการแยกที่พบในสาร Ternary-solute solution อย่างไรก็ตาม ที่สภาวะการทดลองพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์และเปอร์เซ็นต์ผลได้ของซัคซิเนตในรีเทนเททมีค่าเท่ากับ 60.5% และ 48.4% ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Separation factor กับเวลาของตัวถูกละลายในน้ำหมักจริง ที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M แอซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown อื่นๆ

ค่า Separation factor ที่พบในน้ำหมักจริงมีค่าแตกต่างจากหนึ่งมากกว่าค่า Separation factor ที่พบใน Ternary-solute solution นั่นคือ ความสามารถในการแยกของเยื่อเมมเบรนสูงขึ้นในน้ำหมักจริง ทั้งนี้ นอกจากระบบมีตัวถูกละลายเพิ่มขึ้นหรือมีปริมาณของโพแทสเซียมไอออนเพิ่มขึ้นแล้ว ระบบยังมีสาร unknown ที่มีประจุบวกในสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย ลักษณะเช่นนี้จะทำให้อิทธิพลของ Donan effect น้อยลง การถ่ายโอนมวลสารของไพรูเวทและแอสซิเตทจึงเพิ่มสูงขึ้น แต่การถ่ายโอนมวลสารของซัคซิเนตได้รับผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของประจุบวกในสารละลายน้อยกว่า เมื่อซัคซิเนต ไพรูเวท และแอสซิเตท ได้รับผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของประจุบวกในสารละลายไม่เท่ากัน จึงทำให้การแยกสูงขึ้น

4.4.4 สรุป

สำหรับน้ำหมักจริงที่มีซัคซิเนตเข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M และสาร unknown อื่น ๆ การใช้เยื่อเมมเบรนชนิดนาโนไม่สามารถทำการแยกตัวถูกละลายทั้งสามชนิดออกจากกันได้ ส่วนการเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนไม่ส่งผลต่อการแยกด้วยเช่นกัน ดังนั้น ความสามารถในการแยกไม่ขึ้นกับความดันทรานสมเมมเบรน ในส่วนนี้ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ใน Ternary-solute solution

การเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นน้อยลงก่อให้เกิดการแยกที่ชัดเจนขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำระบบได้รับอิทธิพลของ Donan effect และซัคซิเนต ไพรูเวท และแอสซิเตทมีการถ่ายโอนมวลสารผ่านเมมเบรนที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ความสามารถในการแยกในน้ำหมักจริงใกล้เคียงกับความสามารถในการแยกใน Ternary-solute solution นอกจากนี้ยังพบว่า เพอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์และเปอร์เซ็นต์ผลได้ของซัคซิเนตในรีเทนเทตมีค่าเท่ากับ 60.5% และ 48.4% ตามลำดับ

จากผลการทดลองข้างต้น การแยกตัวถูกละลายทั้งสามชนิดในน้ำหมักจริงด้วยเยื่อเมมเบรนนาโนฟิวเตรชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้ การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนไม่สามรถก่อให้เกิดการแยกด้วยเช่นกัน การเจือจางสารละลายเท่านั้นที่ทำให้เกิดการแยกขึ้น ความสามารถในการแยกในน้ำหมักจริงสูงกว่าใน Ternary-solute solution

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การถ่ายโอนมวลสารของโพแทสเซียมซัลไฟต์ โพแทสเซียมไพรูเวท และโพแทสเซียมแอสซิเตท ใน Single-solute solution ผ่านเยื่อเมมเบรนชนิดนาโน เกิดขึ้นเนื่องจากกลไกสองชนิด ได้แก่ Size effect และ Charge effect การเพิ่มความดันทรานสมเมเบรนในช่วง 40 – 60 psi สามารถส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายทั้งสามชนิดได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้การถ่ายโอนมวลสารของตัวทำละลายทั้งสามชนิดเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะสถานะที่สารละลายมีโพแทสเซียมซัลไฟต์เข้มข้นสูง (0.7M) เยื่อเมมเบรนไม่สามารถกักกันโพแทสเซียมซัลไฟต์ได้เลย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การถ่ายโอนมวลสารผ่านเยื่อเมมเบรนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ใน Binary-solute solution ผลการทดลองสอดคล้องกับใน Single-solute solution กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมเบรนส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารได้เพียงเล็กน้อย ที่ความเข้มข้นของซัลไฟต์สูงจะส่งผลให้ค่าการกักกันของไพรูเวทหรือแอสซิเตทมีค่าเป็นลบ แต่การลดความเข้มข้นของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายเกิดการเปลี่ยนแปลง เยื่อเมมเบรนชนิดนาโนไม่สามารถแยกซัลไฟต์และไพรูเวทใน Binary-solute solution ที่มีซัลไฟต์เข้มข้น 0.7M และไพรูเวทเข้มข้น 0.12M และไม่สามารถแยกซัลไฟต์และแอสซิเตทใน Binary-solute solution ที่มีซัลไฟต์เข้มข้น 0.7M กับแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M ได้ เนื่องจากค่าการกักกันของซัลไฟต์และไพรูเวทหรือซัลไฟต์และแอสซิเตทมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นของซัลไฟต์และไพรูเวทหรือแอสซิเตทเท่ากับ 0.1M และ 0.018 M ตามลำดับ ทำให้เกิดการแยกขึ้นได้

ใน Ternary-solute solution ผลการทดลองสอดคล้องกับใน Single-solute solution และ Binary-solute solution นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงความดันทรานสมเมเบรนส่งผลต่อการถ่ายโอนมวลสารได้เพียงเล็กน้อย แต่การลดความเข้มข้นของสารละลายส่งผลให้การถ่ายโอนมวลสารของตัวถูกละลายมีการเปลี่ยนแปลง เยื่อเมมเบรนชนิดนาโนไม่สามารถแยกซัลไฟต์ออกจากไพรูเวท และแอสซิเตทใน Ternary-solute solution ที่มีซัลไฟต์เข้มข้น 0.7M ไพรูเวทเข้มข้น 0.12M และแอสซิเตทเข้มข้น 0.12M ได้ เนื่องจากค่าการกักกันของซัลไฟต์ ไพรูเวท และแอสซิเตทมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นของซัลไฟต์ ไพรูเวท และแอสซิเตทมีค่าใกล้เคียงกัน

ซีเททเท่ากับ 0.1M 0.018 M และ 0.018M ตามลำดับ ทำให้เกิดการแยกขึ้นได้ จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำมีค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์และเปอร์เซ็นต์ผลได้ของซั๊กซิเนตในรีเทนเทตมีค่าเท่ากับ 63.57% และ 49.90% ตามลำดับ

การแยกและทำบริสุทธิ์เกลือของกรดซั๊กซิินิกจากน้ำหมักจริงด้วยเยื่อเมมเบรนชนิดนาโนในชุดการทดลอง การกรองแบบตายตัวที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงไม่สามารถทำได้ การเพิ่มความดันทรานสมเมมเบรนไม่สามารถช่วยให้เกิดการแยกได้ แต่การเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นต่ำทำให้เกิดการแยกได้ จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายต่ำมีเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์และเปอร์เซ็นต์ผลได้เท่ากับ 60.5% และ 48.4% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการแยกซั๊กซิเนตจากเกลือของกรดอินทรีย์ by-products ด้วยการกรองผ่านเยื่อเมมเบรนชนิดนาโน มีความบริสุทธิ์เพียง 60.5% และมีผลได้เพียง 48.4% ซึ่งถือว่า การแยกด้วยวิธีการนี้มีประสิทธิภาพไม่สูงนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดของชุดการทดลองที่ทนความดันสูงสุดได้เพียง 75 psi ซึ่งความดันดังกล่าวไม่สามารถต้านทานแรงดันออสโมติกของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงได้ ประกอบกับเยื่อเมมเบรนชนิดนาโนที่ใช้ศึกษามีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของเกลือของกรดอินทรีย์ที่ศึกษา จึงทำให้ไม่สามารถกักกันตัวถูกละลายชนิดใดได้เลยที่สภาวะที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกซั๊กซิเนตออกจากเกลือของกรดอินทรีย์ by-products คณะผู้วิจัยขอเสนอแนวทาง ดังนี้

5.2.1 ควรทำการทดลองโดยใช้ชุดทดลองที่สามารถทนแรงดันได้สูง เช่น ทนแรงดันได้มากกว่า 20 psi เพื่อให้มีแรงขับเคลื่อน (driving force) ที่สามารถเอาชนะแรงดันออสโมติกของเกลือของกรดอินทรีย์ในสารป้อนได้

5.2.2 ควรทำการทดลองกับระบบที่เป็นกรองแบบไหลขนานกับเยื่อเมมเบรนชนิดนาโน (Cross flow filtration) เพื่อลดการอุดตันของตัวถูกละลายที่สะสมอยู่บนผิวหน้าของเยื่อเมมเบรน

5.2.3 ควรทำการทดลองกับเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กกว่านี้ หรือมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กพอที่จะกักกันซั๊กซิเนต และปล่อยให้เกลือของกรดอินทรีย์ by-products ซึมผ่านเยื่อเมมเบรนไปยังเพอร์มิเอทได้

บรรณานุกรม

Bouchoux, A., Bouchoux, A., Roux-de Balmann, H., and Lutin, F. (2005). Nanofiltration of glucose and sodium lactate solutions variations of retention between single- and mixed-solute solution. **Journal of Membrane Science** 258: 123-132.

Bouchoux, A., Roux-de Balmann, H., and Lutin, F. (2006). Investigation of nanofiltration as a purification step for lactic acid production processes based on conventional and bipolar electrodialysis operations. **Separation and Purification Technology** 52: 266-273.

Bargeman, G., Vollenbroek, J.M., Straatsm, J., Schroën, C.G.P.H., Boom, R.M. (2005). Nanofiltration of multi-component feeds. Interaction between neutral and charged components and their effect on retention. **Journal of Membrane Science** 247: 11.20.

Bechthold, I, Bretz, K., Kabasci, S., Kopitzky, R., and Springer, A. (2008). Succinic Acid: A new platform chemical for biobased polymers from renewable resources. **Chemical Engineering & Technology** 31(5): 647-654.

Huh, Y. S., Jun, Y.-S., Hong, Y.K., Song, H., Lee, S.Y., and Hong, W.H. (2006). Effective purification of succinate acid from fermentation broth produced by *Mannheimia succiniciproducens*. **Process Biochemistry** 41: 1461-1465.

Kang, S.H. and Chang, Y.K. (2005). Removal of organic acid salts from simulated fermentation broth containing succinate by nanofiltration. **Journal of Membrane Science** 246: 49-57.

Krieg, H.M., Modise, S.J., Keizer, K., and Neomagus, H.W.J.P. (2004). Salt rejection in nanofiltration for single and binary salt mixtures in view of sulphate removal. **Desalination** 171: 205-215.

Jantama, K, Zhang, X., Moore, J.C., Shanmugam, K.T., Svoronos, S.A., and Ingram, L.O. (2008). Eliminating Side Products and Increasing succinate yields in engineered strains of *Escherichia coli* C. **Biotechnology and Bioengineering** 101(5): 881-893.

Sjöman, E., Mänttari, M., Nyström, M., Koivikko, H., and Heikkilä, H. (2007). Separation of xylose from glucose by nanofiltration from concentrated manosaccharide solutions. **Journal of Membrane Science** 292: 106-115.

Song, H. and Lee S.Y. (2006). Production of succinic acid by bacterial fermentation. **Enzyme and Microbial Technology** 39: 352-361.

Song, H., Huh, Y.S., Lee, S.Y., Hong, W.H., and Hong, Y.K. (2007). Recovery of succinic acid produced by fermentation of a metabolically engineered *Mannheimia succiciproducens* strain. **Journal of Biotechnology** 132: 445-452.

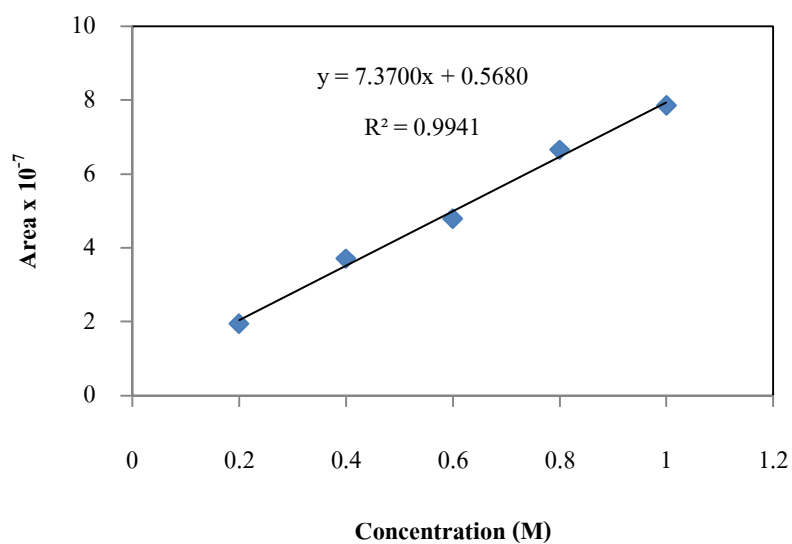
Schaep, J., Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C. and Wilms, D. (2006). Influence of ion size and charge in nanofiltration. **Separation and Purification Technology** 14: 155-162.

Wee, Y.-J., Kim, J.-N., and Ryu, H.-W. (2006). Biotechnological production of lactic acid and its recent application. **Food Technology and Biotechnology** 44 (2): 163-172.

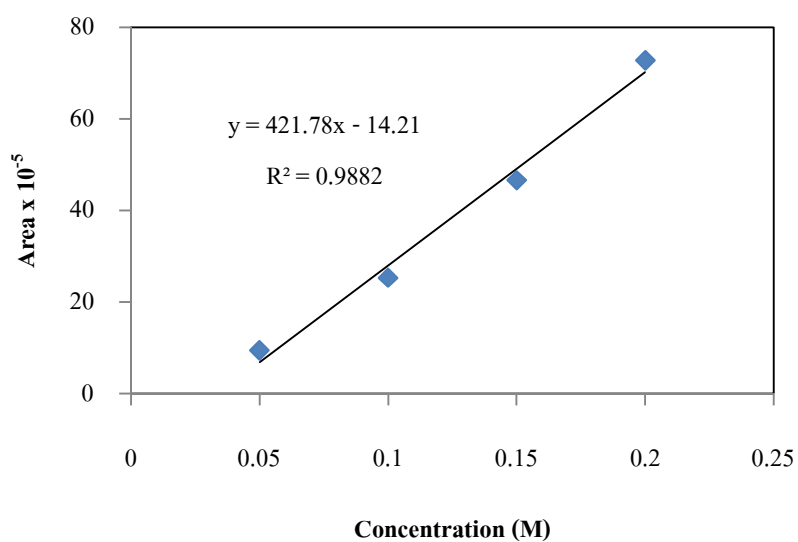




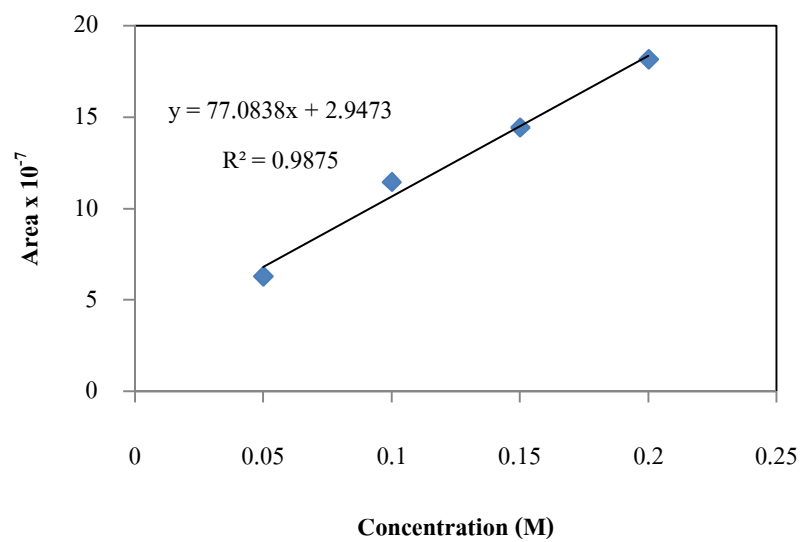
ภาคผนวก ก
กราฟมาตรฐาน



รูปที่ ก1 กราฟมาตรฐานของซัลลิวเนต



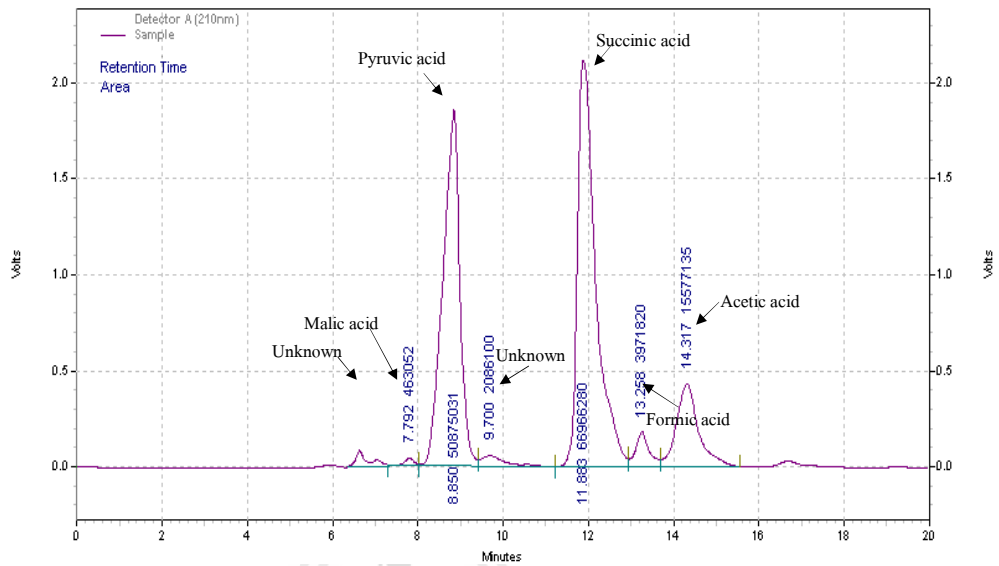
รูปที่ 2ก กราฟมาตรฐานของแอสซิวเตท



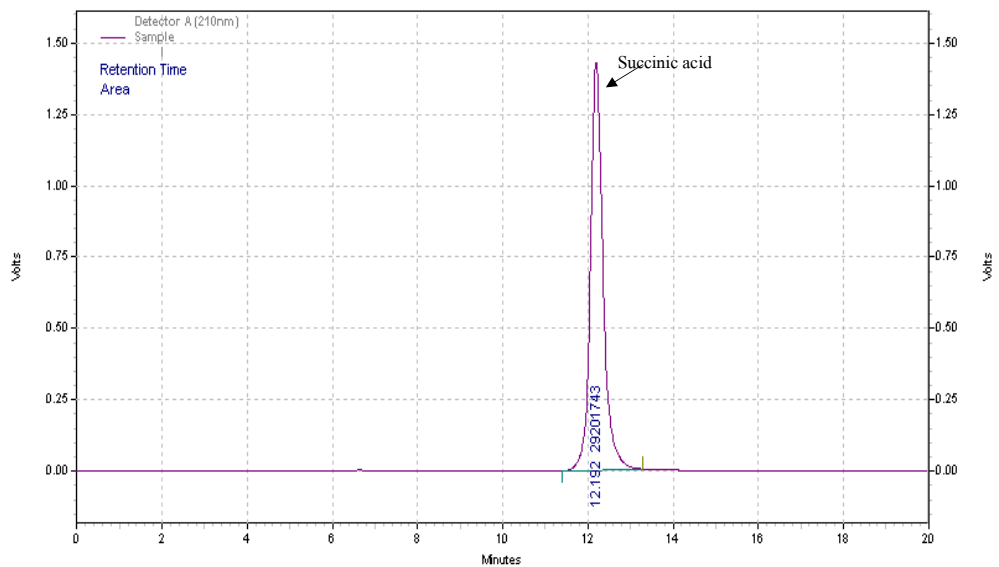
ภาพที่ 3ก กราฟมาตรฐานของกรดไพรูเวท



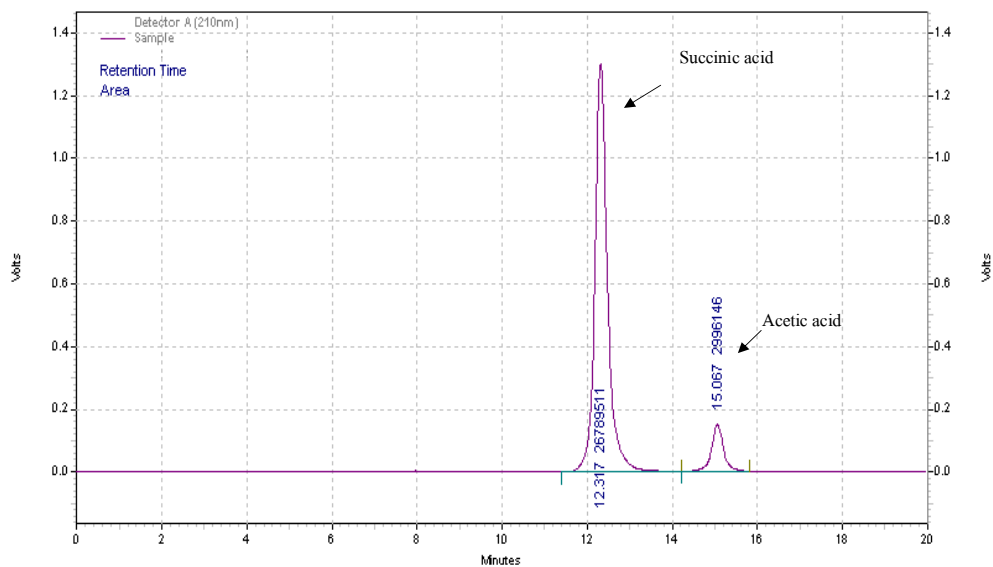
ภาคผนวก ข
กราฟโครมาโตแกรม



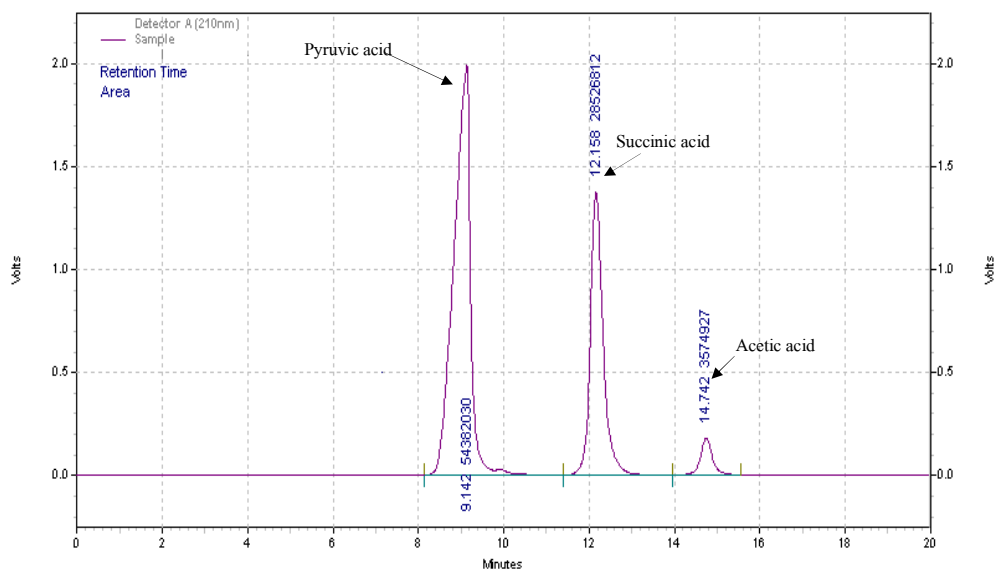
รูปที่ 1x กราฟโครมาโตแกรมของน้ำหมักจริง (Real fermentation broth)



รูปที่ 2x กราฟโครมาโตแกรมของน้ำหมักจำลองใน Single-solute solution (0.7M Succinate)

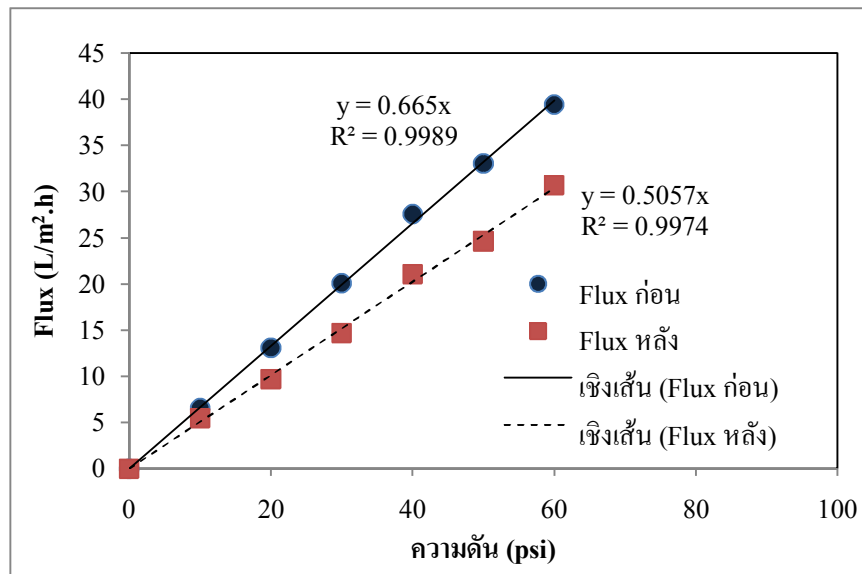


รูปที่ 3x กราฟโครมาโตแกรมของน้ำหมักจำลองใน Binary-solute solution (0.7M Succinate + 0.12M Acetate)

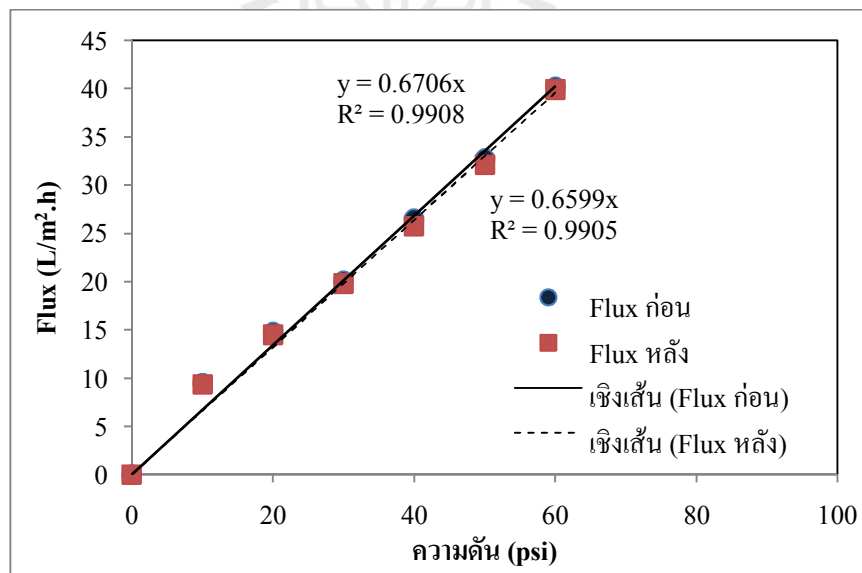


ภาพที่ 4x กราฟโครมาโตแกรมของน้ำหมักจำลองใน Ternary-solute solution (0.12M Pyruvate + 0.7M Succinate + 0.12M Acetate)

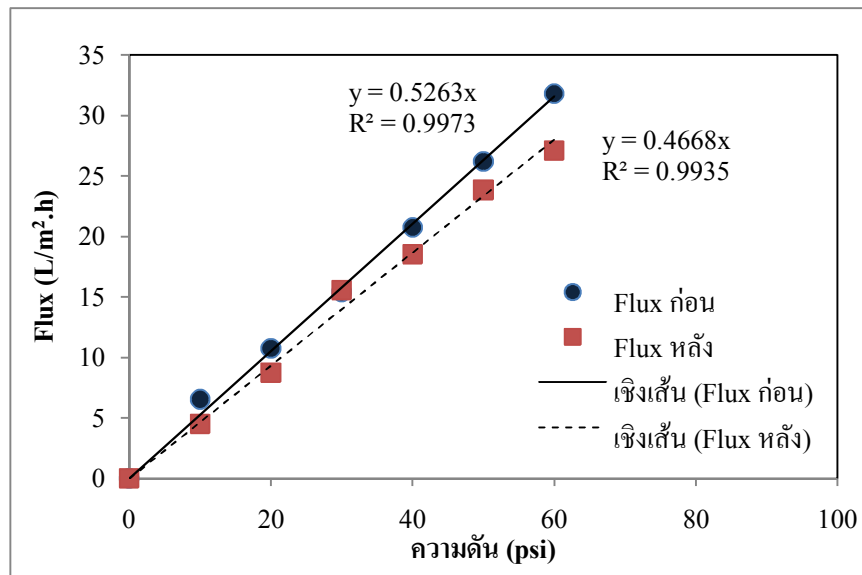
ภาคผนวก ค
Water permeability



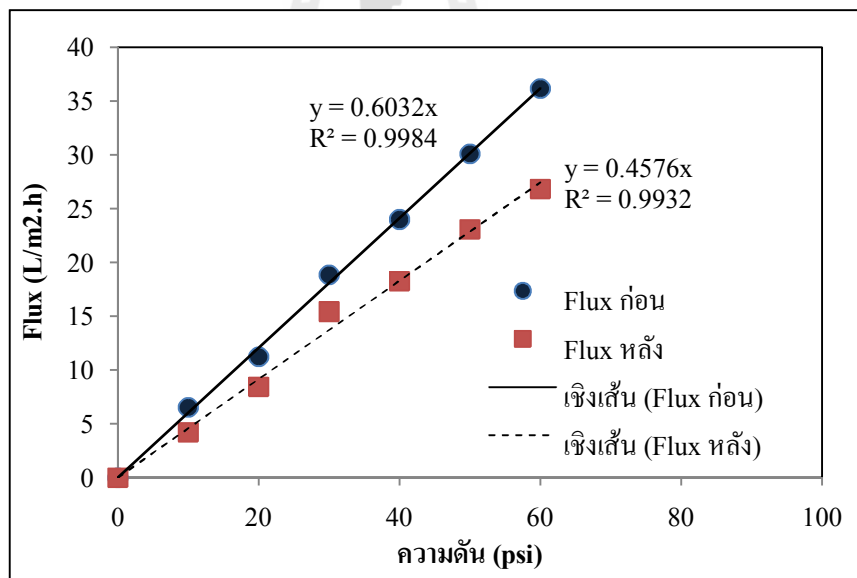
รูปที่ 1ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.1M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi



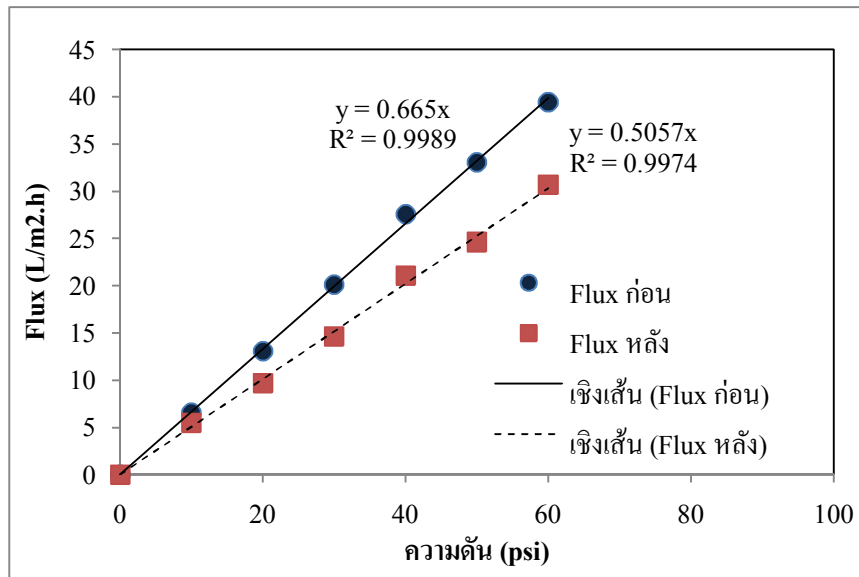
รูปที่ 2ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.1M ใน Single-solute solution ที่ 50 psi



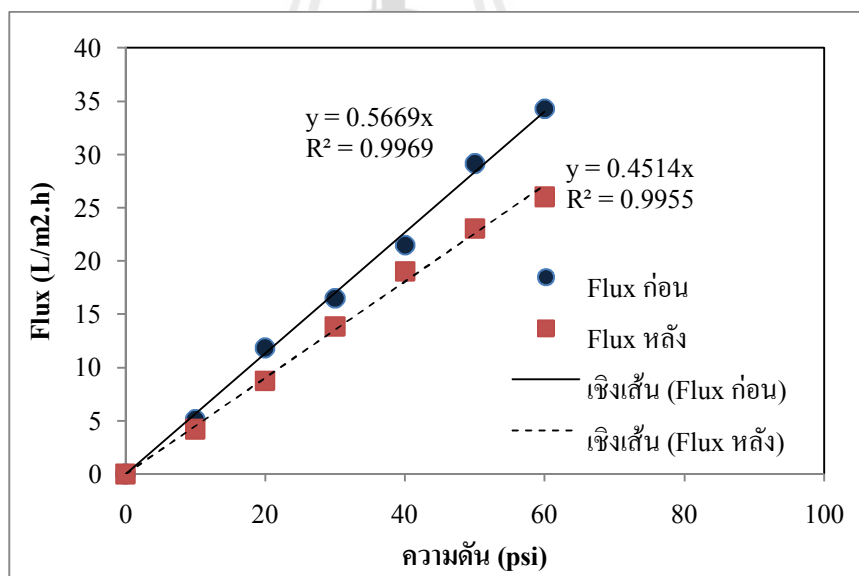
รูปที่ 3ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซัลซิเนต เข้มข้น 0.1M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi



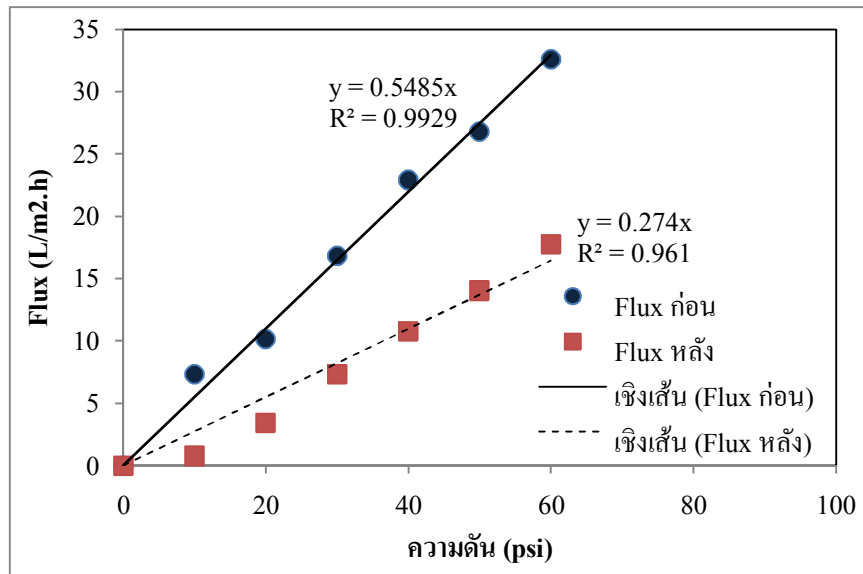
รูปที่ 4ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซัลซิเนต เข้มข้น 0.3M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi



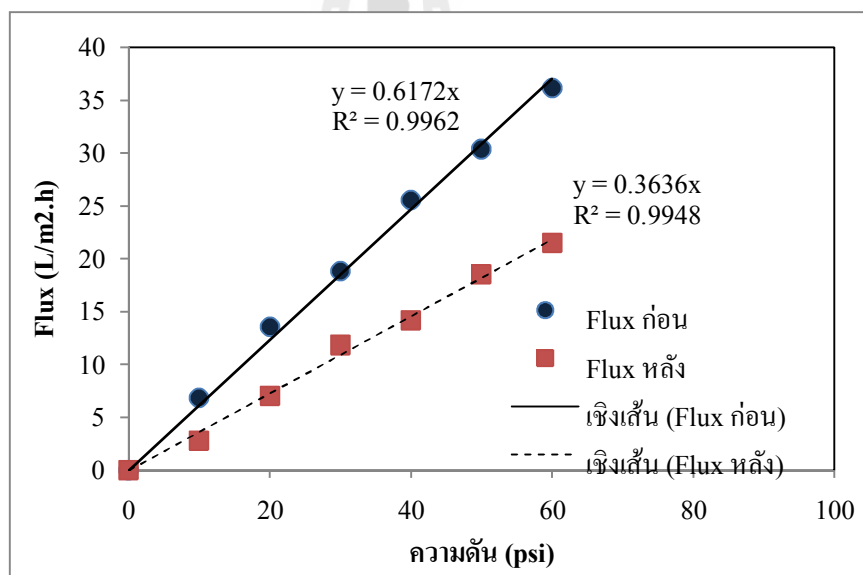
รูปที่ 5ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.3M ใน Single-solute solution ที่ 50 psi



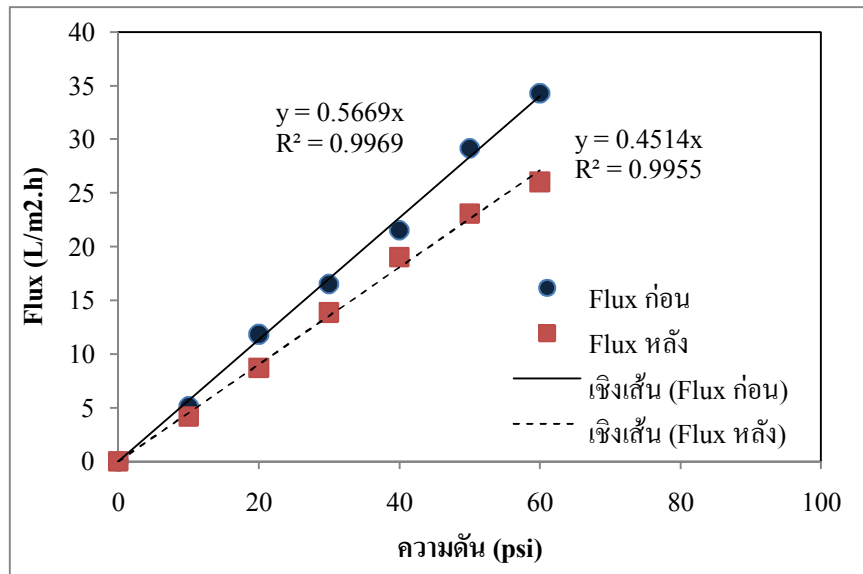
รูปที่ 6ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.3M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi



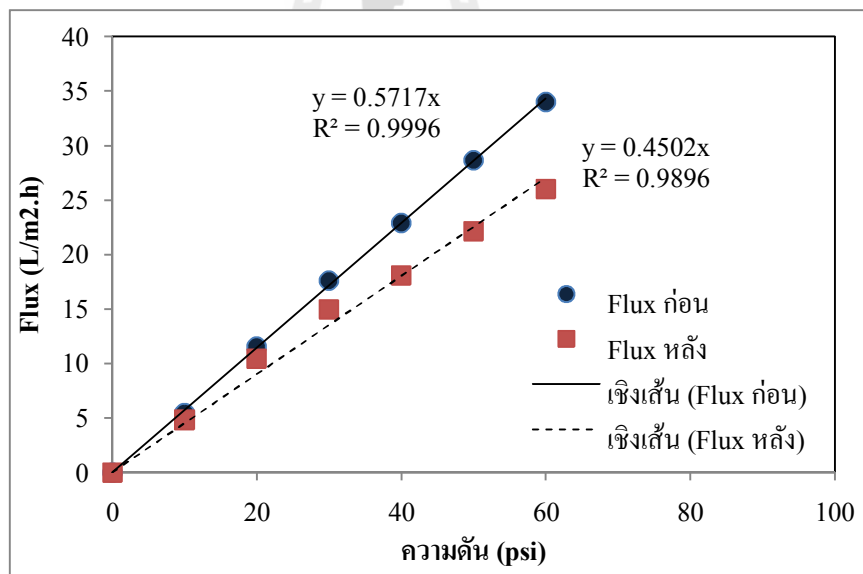
รูปที่ 7ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi



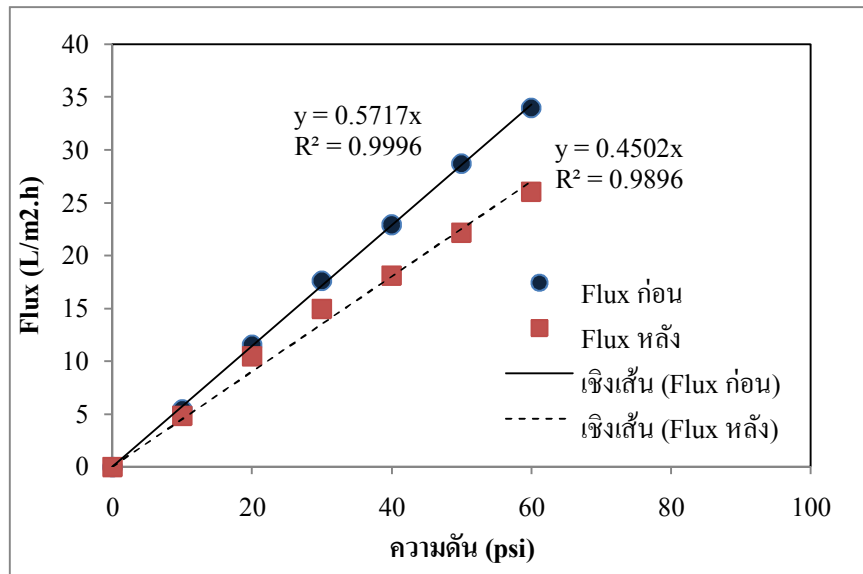
รูปที่ 8ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M ใน Single-solute solution ที่ 50 psi



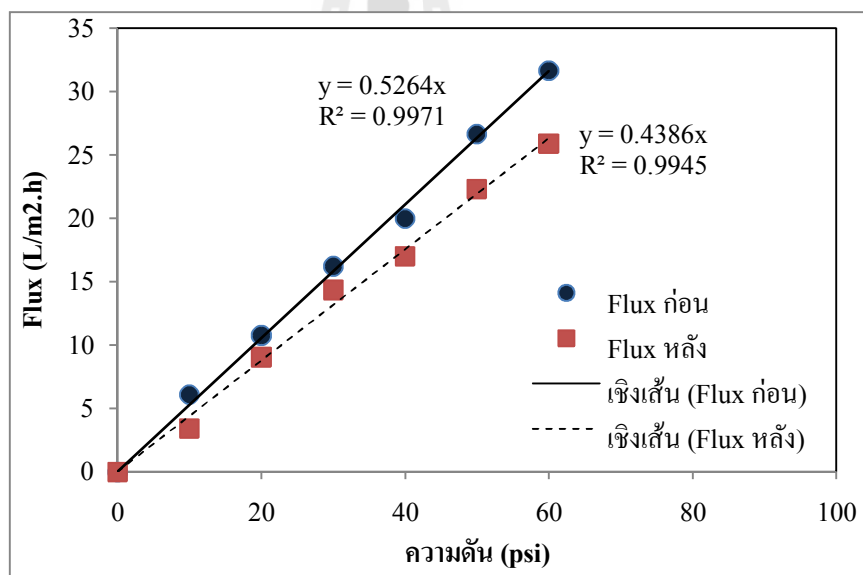
รูปที่ 9ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซัลไฟเนต เข้มข้น 0.7M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi



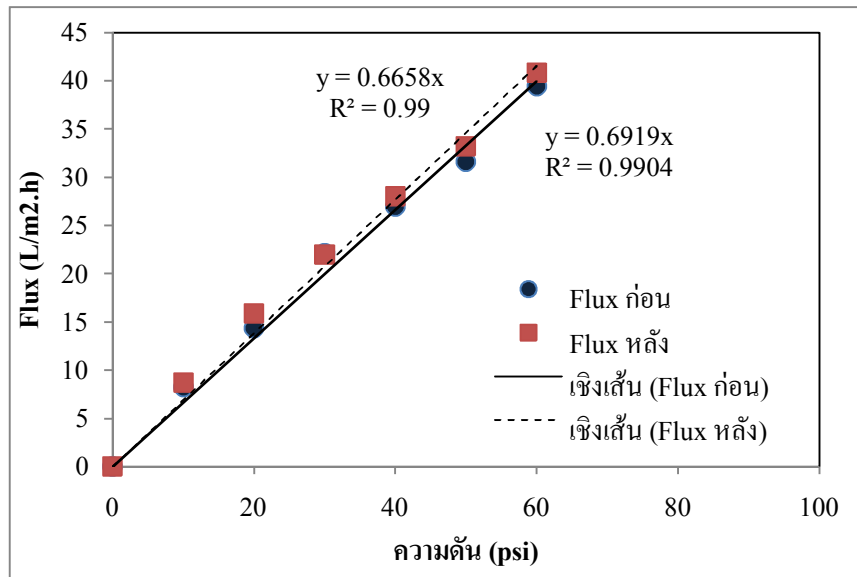
รูปที่ 10ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองโพรวาท เข้มข้น 0.12M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi



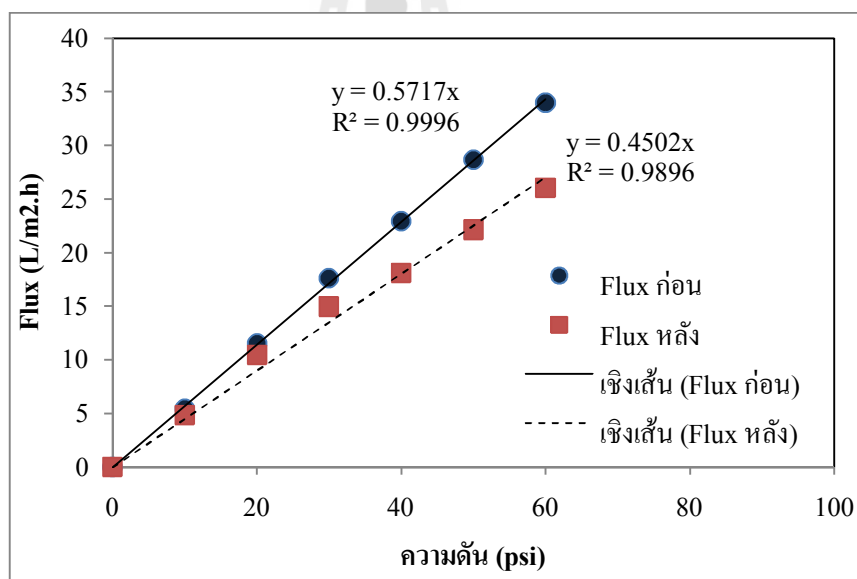
รูปที่ 11ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองไฟรูเวท เข้มข้น 0.12M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi



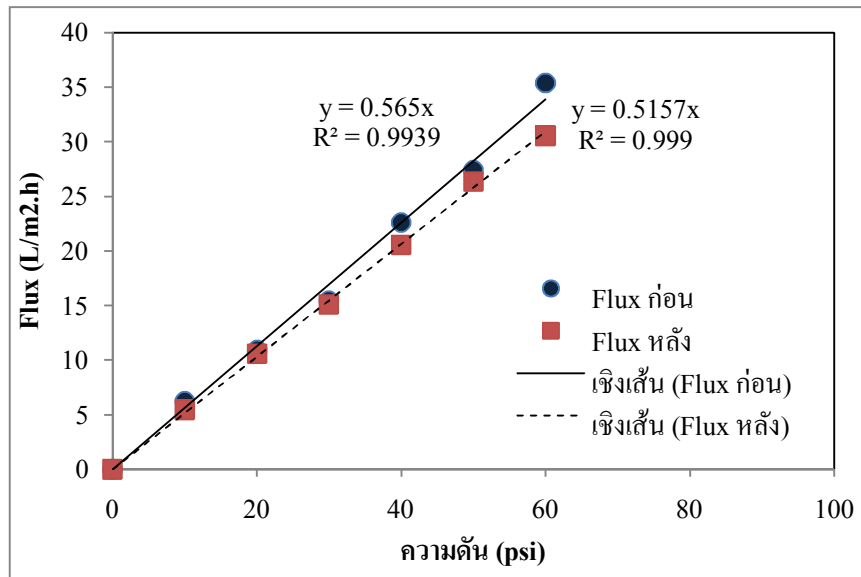
รูปที่ 12ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองไฟรูเวท เข้มข้น 0.018 M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi



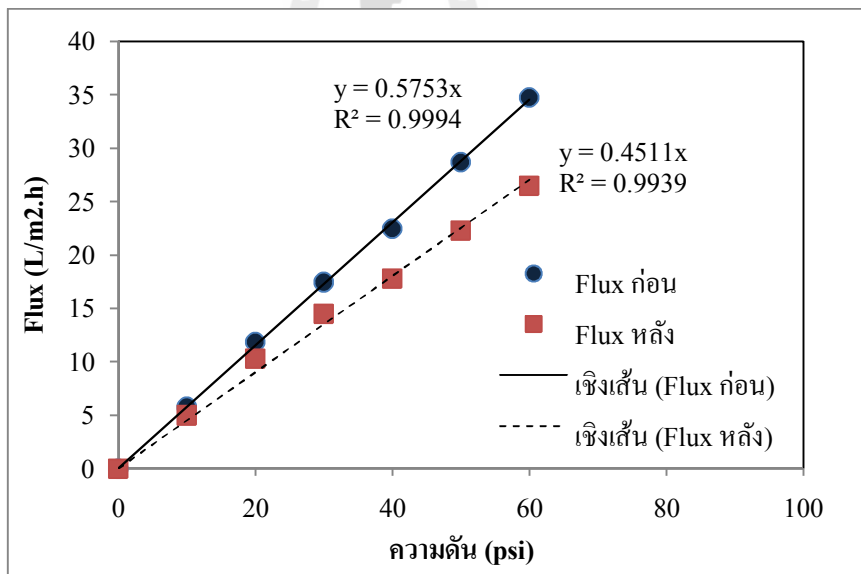
รูปที่ 13ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองแอซิเตท เข้มข้น 0.018 M ใน Single-solute solution ที่ 40 psi



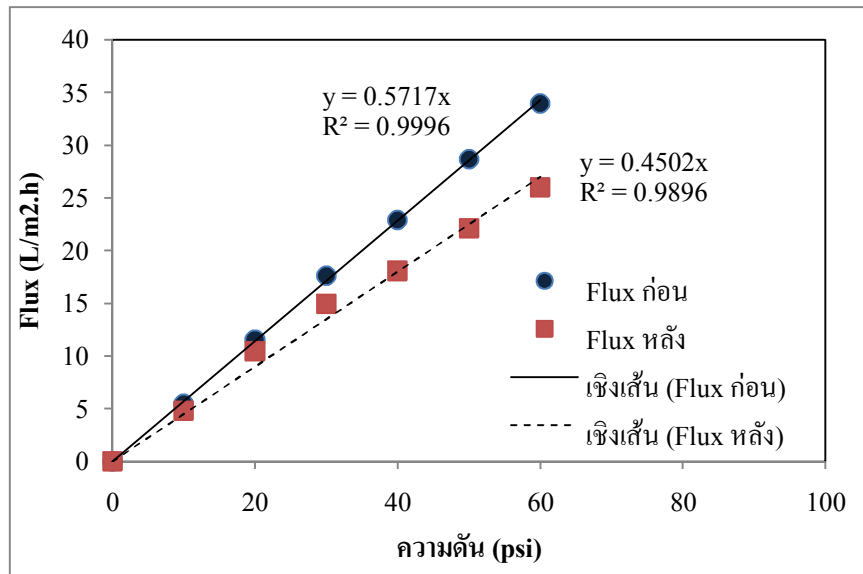
รูปที่ 14ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองแอซิเตท เข้มข้น 0.12 M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi



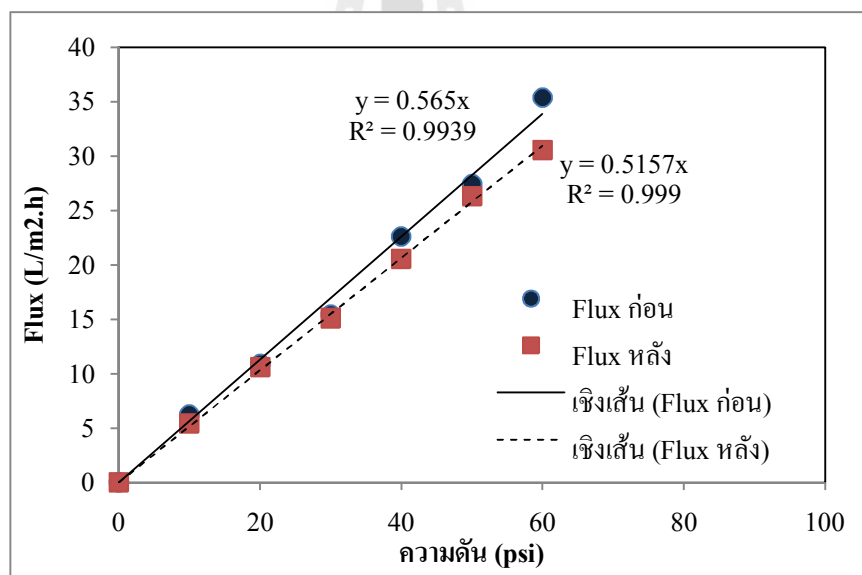
รูปที่ 15ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองแอซิเตท เข้มข้น 0.018 M ใน Single-solute solution ที่ 60 psi



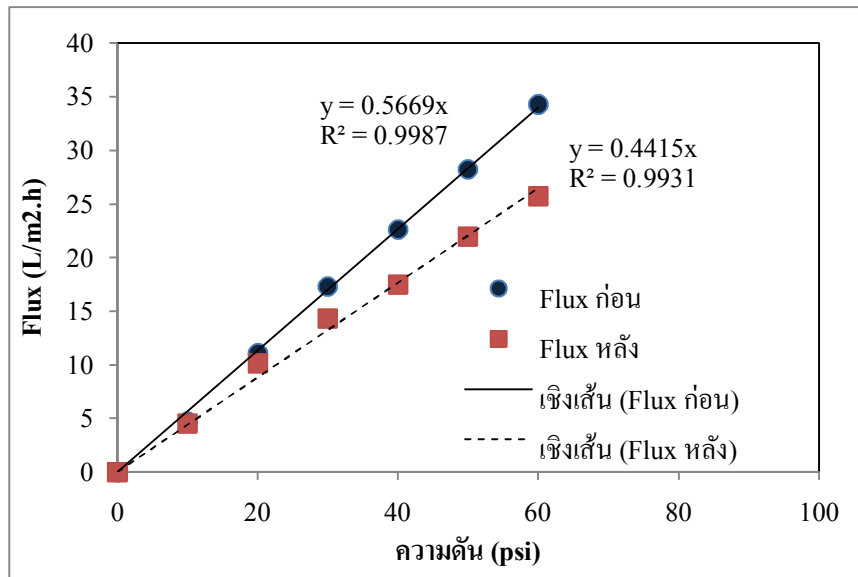
รูปที่ 16ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซึกซิเนต เข้มข้น 0.7M และโพรูเวท เข้มข้น 0.12 M ใน Binary-solute solution ที่ 40 psi



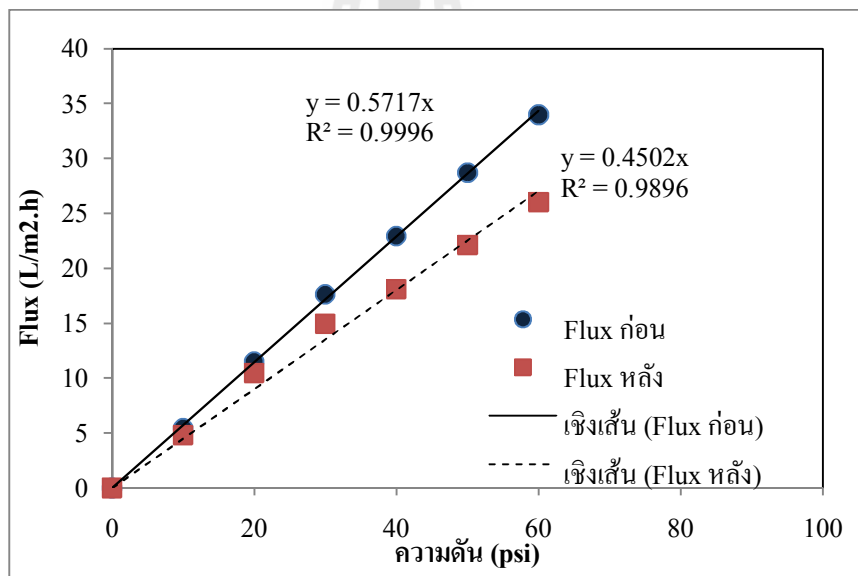
รูปที่ 17ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M และไพรูเวท เข้มข้น 0.12 M ใน Binary-solute solution ที่ 60 psi



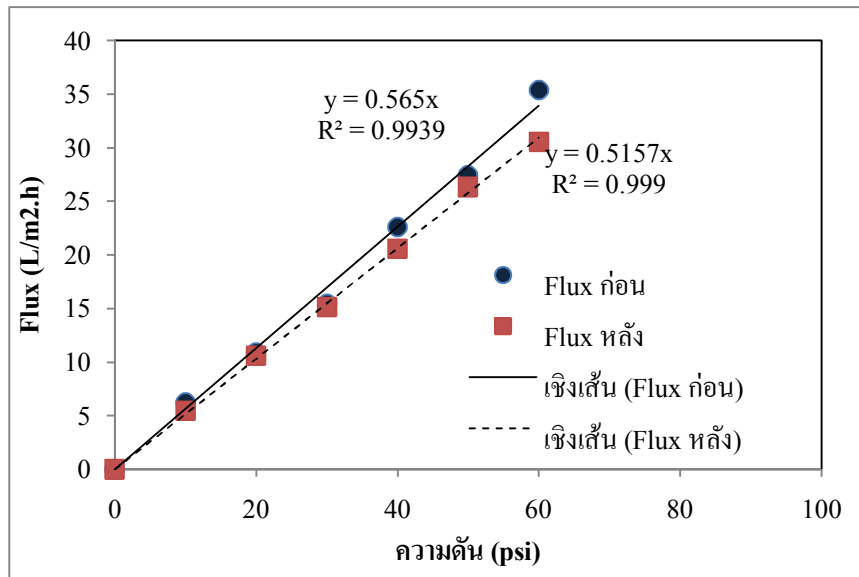
รูปที่ 18ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.1M และไพรูเวท เข้มข้น 0.018 M ใน Binary-solute solution ที่ 60 psi



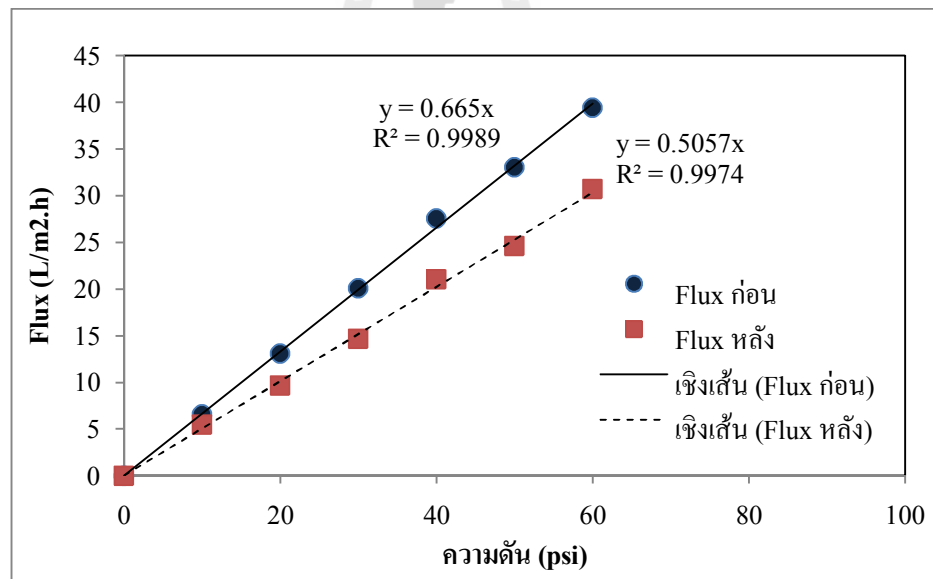
รูปที่ 19ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M และแอสซิเตท เข้มข้น 0.12 M ใน Binary-solute solution ที่ 40 psi



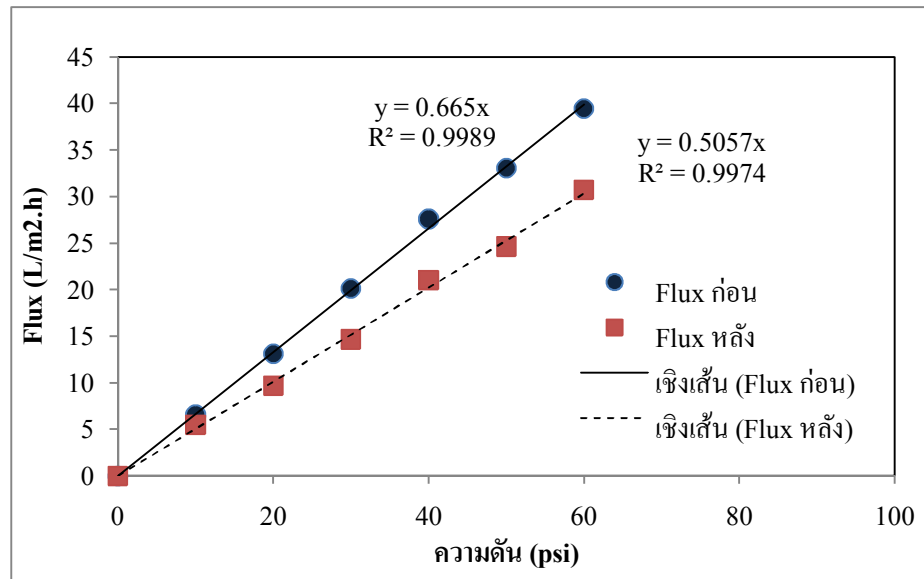
รูปที่ 20ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M และแอสซิเตท เข้มข้น 0.12 M ใน Binary-solute solution ที่ 60 psi



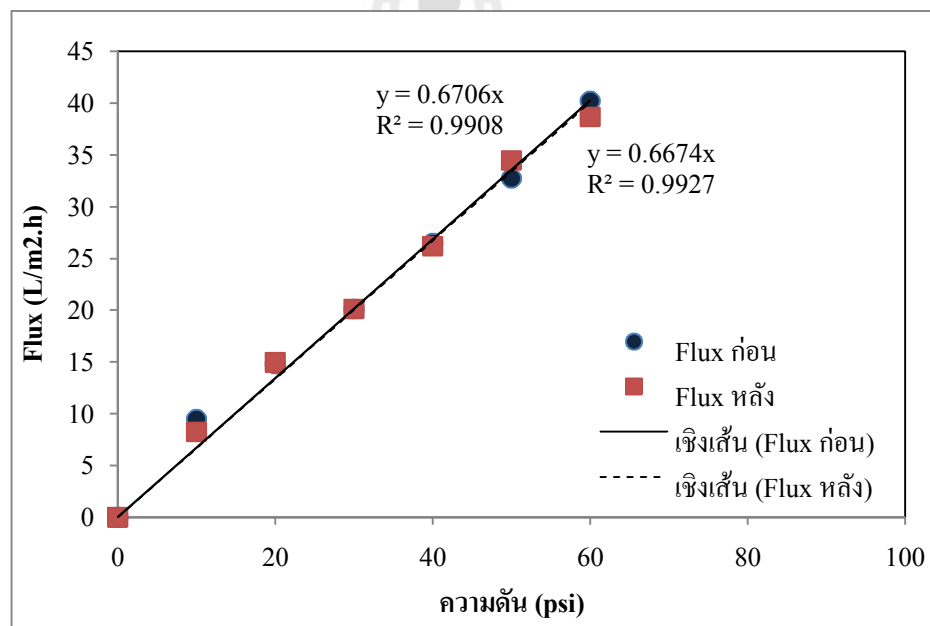
รูปที่ 21ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซึกซิเนต เข้มข้น 0.1M และแอซิเตท เข้มข้น 0.018 M ใน Binary-solute solution ที่ 60 psi



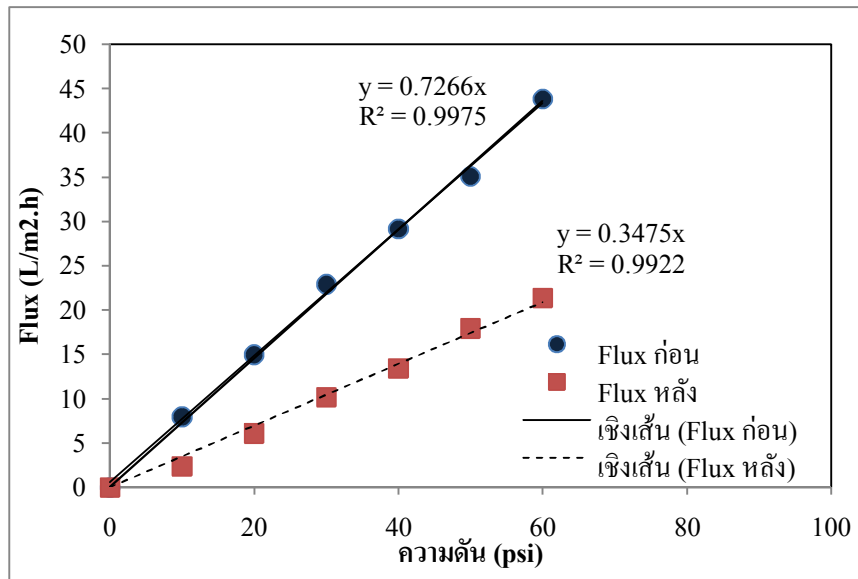
รูปที่ 22ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซึกซิเนต เข้มข้น 0.7M ไพรูเวท เข้มข้น 0.12M และแอซิเตท เข้มข้น 0.12 M ใน Ternary-solute solution ที่ 40 psi



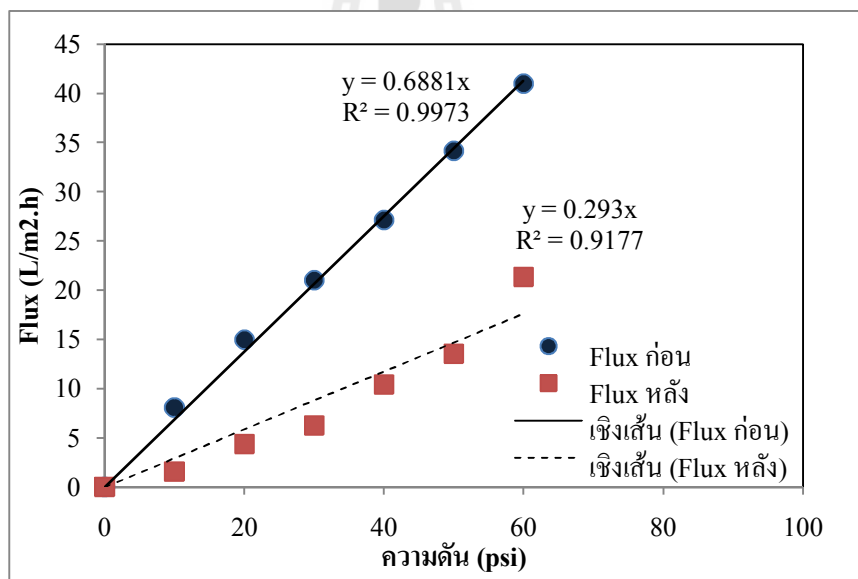
รูปที่ 23ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซังชีเนต เข้มข้น 0.7M ไพรวูเทเข้มข้น 0.12M และแอซีเตท เข้มข้น 0.12 M ใน Ternary-solute solution ที่ 60 psi



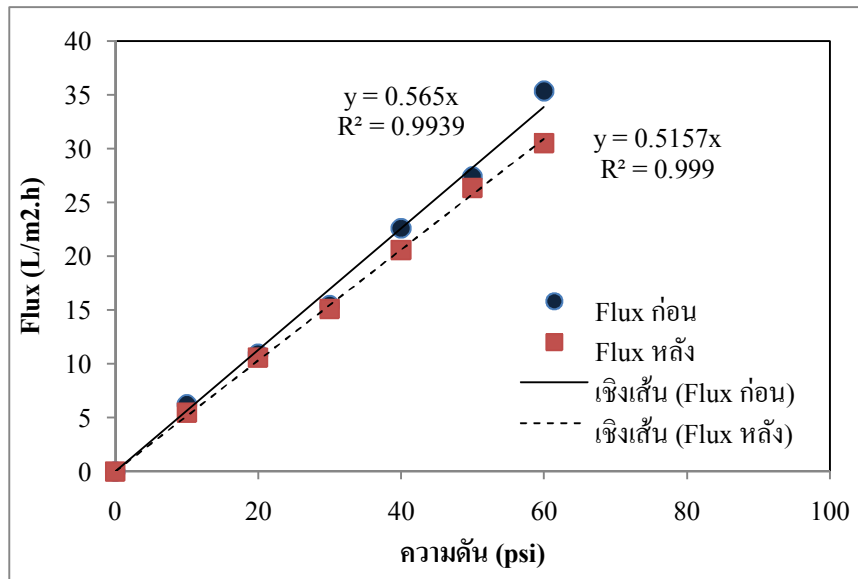
รูปที่ 24ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซังชีเนต เข้มข้น 0.1M ไพรวูเทเข้มข้น 0.018M และแอซีเตท เข้มข้น 0.018 M ใน Ternary-solute solution ที่ 60 psi



รูปที่ 25ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M ไพรูเวตเข้มข้น 0.12M และแอซิเตต เข้มข้น 0.12M ในน้ำหมักจริง ที่ 40 psi



รูปที่ 26ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.7M ไพรูเวตเข้มข้น 0.12M และแอซิเตต เข้มข้น 0.12M ในน้ำหมักจริง ที่ 60 psi



รูปที่ 27ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Water flux และความดันก่อนและหลังการกรองซั๊กซิเนต เข้มข้น 0.1M ไพรูเวตเข้มข้น 0.018M และแอซิเตท เข้มข้น 0.018M ในน้ำหมักจริง ที่ 60 psi

