

ผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่อการสกัดสารหนูในน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำมันดิบ
ด้วยระบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์



นายชเนษฎ์ วรบุตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

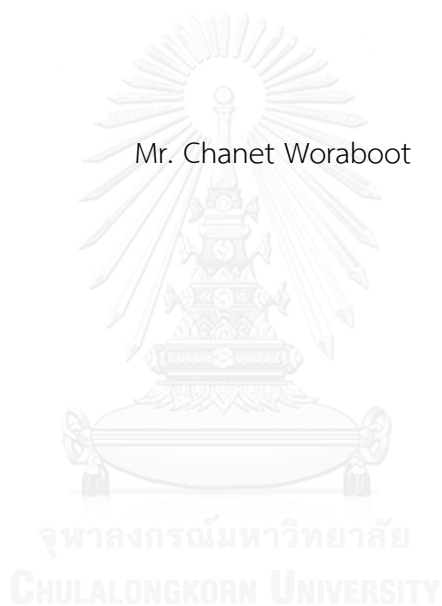
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE EFFECTS OF SYNERGISTIC EXTRACTANTS ON DISPOSAL OF ARSENIC
IN PRODUCED WATER FROM CRUDE OIL PRODUCTION PROCESS
VIA HOLLOW FIBER CONTACTOR MODULES

Mr. Chanet Woraboot



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่อการสกัดสารหนูในน้ำ
จากกระบวนการผลิตน้ำมันดิบด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิด
คอนแทคเตอร์
โดย นายชเนษฐ์ วรรณบุตร
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ศาตราภิชาน ดร.อุรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ พัฒนะศรี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราภิชาน ดร.อุรา ปานเจริญ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ หนูทอง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จุฬาลักษณ์ นาคสังข์)

ชเนษฐ์ วรบุตร : ผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่อการสกัดสารหนูในน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำมันดิบด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์ (THE EFFECTS OF SYNERGISTIC EXTRACTANTS ON DISPOSAL OF ARSENICIN PRODUCED WATER FROM CRUDE OIL PRODUCTION PROCESS VIA HOLLOW FIBER CONTACTOR MODULES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศาตราภิชาน ดร.อุรา ปานเจริญ, 103 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนสารหนูจากน้ำทิ้งในกระบวนการผลิตน้ำมันดิบด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์ตัวแปรต่าง ๆ ที่ศึกษาได้แก่ ปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน เวลาการสกัด ชนิดของสารสกัด (Aliquat 336, Cyanex 921 และ Cyanex 923) และความเข้มข้นของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ค่าความเป็นกรด เบสของสารละลายป้อนอัตราการไหลของสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ

จากผลการทดลองสรุปว่าสกัดไอออนสารหนูได้สูงสุด 92 เปอร์เซ็นต์และนำกลับได้ 30 เปอร์เซ็นต์โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล ผสมกับสารสกัด Cyanex 921 ความเข้มข้น 0.04 โมล ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมอื่น ๆ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนู 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 6 อัตราการไหลของสารละลายป้อน 100 มิลลิลิตร/นาที ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.1 โมล นอกจากนี้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic coefficient, S.C.) และได้ค่าเท่ากับ 0.325 จึงแสดงถึงการสกัดไอออนสารหนูเป็นแบบเสริมฤทธิ์กัน

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5471074921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: SYNERGISTIC EXTRACTANT / ARSENIC / HOLLOW FIBER CONTACTOR

CHANET WORABOOT: THE EFFECTS OF SYNERGISTIC EXTRACTANTS ON DISPOSAL OF ARSENICIN PRODUCED WATER FROM CRUDE OIL PRODUCTION PROCESS VIA HOLLOW FIBER CONTACTOR MODULES. ADVISOR: DISTINGUISHED PROF. DR.URA PANCHAROEN, 103 pp.

This work studied the parameters that influenced on the separation of arsenic ions from produced water via hollow fiber contactor modules. The studied parameters were initial concentration of arsenic ions in the feed solution, feed pH separation time, types of extractants (Aliquat 336, Cyanex 921 and Cyanex 923), flow rates of feed solution as well as concentration of the stripping solution.

The results indicated that the highest extraction and stripping of arsenic ions were 92% and 30%, respectively using 0.4 M Aliquat 336 mixed with 0.04 M Cyanex 921. In addition, the optimum conditions of other parameters were as follows: the initial concentration of arsenic ions in the feed solution of 0.5 mg/L, the feed pH of 6, the feed flow rate of 100 mL/min, and the stripping concentration of 0.1 M. The synergistic coefficient (S.C.) was obtained and found to be 0.325, which demonstrated this system performing the synergism extraction effect.

Department: Chemical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ในการเรียนและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ของข้าพเจ้าจะสำเร็จไม่ได้ถ้าหากไม่มี ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ที่คอยเคียงเคียง แนะนำ สั่งสอนวิธีการคิดและระเบียบงานวิจัยที่ ถูกต้อง

รวมถึงเป็นผู้ที่คอยชี้แนะในเรื่องต่างๆระหว่างที่ข้าพเจ้าได้ศึกษา ขอขอบคุณทุน สนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัยภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่อ อุตสาหกรรม-พวอ.ระดับปริญญาโทประจำปี 2556 และบริษัท ซาลาแมนเดอร์เอ็นเนอร์ยี (โครงการบัวหลวง) จำกัด (เลขที่สัญญา MSD56I0016) ขอขอบคุณบริษัท Cytec Australia Holdings Pty Ltd.

และขอขอบคุณ

1. ผศ.ดร. สุพจน์ พัฒนะศรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
2. ผศ.ดร. กษิตศ หนูทอง กรรมการ
3. ดร. จุฬาลักษณ์ นาคสังข์ กรรมการ

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณอำนาจ วรบุตร และคุณสุขสำราญ วรบุตร บิดามารดาของข้าพเจ้าผู้ให้ชีวิต สั่งสอน อุปการะ ทำให้ข้าพเจ้าได้มีการศึกษาที่ดีตลอดจากเด็ก จนเติบโตขึ้นมาถึงวันนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ พญ. วณิชชา วรบุตร ภรรยาของข้าพเจ้าที่คอยให้ กำลังใจและปลอบโยนในยามที่ท้อแท้เมื่อเจอกับปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ คุณูปการใดที่เกิดจาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บุพการีและผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติความเป็นมา	3
1.2 ประโยชน์ของสารหนู.....	4
1.3 ความเป็นพิษของสารหนู.....	6
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารหนู.....	6
1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.6 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
1.8 แผนการทำงานวิจัย	10
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	12
2.1 ประเภทของเยื่อแผ่นเหลว.....	12
2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ (unsupported liquid membrane).....	12
2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองบนตัวรองรับ (supported liquid membrane).....	13
2.2 มอดูลเยื่อแผ่นเหลว	13
2.2.1 แบบท่อ (Tubular modules).....	13
2.2.2 แบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module).....	14

2.2.3	มอดูลแบบแผ่นเรียบ (Flat Sheet modules)	16
2.2.4	มอดูล แบบท่อเกลียว (Spiral wound)	17
2.3	การแบ่งประเภทของสารสกัด	18
2.3.1	สารสกัดชนิดกรด	18
2.3.2	สารสกัดชนิดเบส	19
2.3.3	สารสกัดชนิดกลาง (ซอลเวท)	21
2.4	ปฏิบัติการการสกัดไอออนสารหนู	22
2.4.1	สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Aliquat 336	22
2.4.2	สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Cyanex 921	23
2.4.3	สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Cyanex 923	23
2.4.4	สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Aliquat 336 ร่วมกับ Cyanex 921	24
2.4.5	สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Aliquat 336 ร่วมกับ Cyanex 923	26
2.5	การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction)	26
2.6	การคำนวณร้อยละการสกัด และร้อยละการนำกลับ	30
2.7	กลไกการสกัดด้วยเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์	31
2.7.1	กลไกการถ่ายเทมวล	32
2.7.2	แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบการแพร่ (Diffusion flux model) และ แบบปฏิกิริยา (Reaction flux model) กับการแยกไอออนสารหนูผ่านระบบ เส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์	33
บทที่ 3	สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีทดลอง	36
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	36
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	38
3.3	วิธีการทดลอง	40
3.3.1	ศึกษาผลของชนิดของสารสกัด	40

3.3.2	ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน	41
3.3.3	ศึกษาผลของความเป็น กรด ต่าง (pH) ในสารละลายป้อน.....	41
3.3.4	ศึกษาผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์	42
3.3.5	ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ	43
3.3.6	ศึกษาผลของเวลาการสกัดในเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์	44
3.3.7	ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ	44
3.4	ขั้นตอนการทำความสะอาดมอดูลเส้นใยกลางคอนแทคเตอร์	45
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	46
4.1	ผลการทดลอง.....	46
4.1.1	อิทธิพลของชนิดของสารสกัดต่างชนิดกัน.....	46
4.1.2	ผลของความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน ณ เวลาเริ่มต้น	47
4.1.3	ผลของความเป็นกรด เบส ของสารป้อนที่มีต่อการสกัด	48
4.1.4	ผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่มีต่อการสกัด.....	48
4.1.5	ผลของการแปรอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัด	50
4.1.6	ผลของเวลาที่ใช้ในเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์ต่อการสกัด	50
4.1.7	ผลของความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับ	51
4.1.8	การคำนวณค่า Distribution coefficient (D_{As}) และค่า Synergistic coefficient (S.C.).....	52
4.2	การคำนวณค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของปฏิกิริยา การสกัดสารหนู	54
4.3	การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนู	55
4.4	การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในเยื่อแผ่นเหลวของปฏิกิริยา การสกัดสารหนู	55
4.5	อันดับของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูและการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาและการแพร่.....	57

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
รายการอ้างอิง	64
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	70
ภาคผนวก ข ตัวอย่างข้อมูลจากการทดลองและผลการคำนวณ	86
ภาคผนวก ค	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	103



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิต arsenic trioxide ในโลก.....	3
ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติทั่วไปของสารหนู	5
ตารางที่ 1.3 แสดงการใช้ arsenic compound ในการรักษาโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาวเฉียบพลัน (APL) (26)	5
ตารางที่ 1.4 แผนการทำงานวิจัย	11
ตารางที่ 2.1 สารสกัดชนิดกรด	19
ตารางที่ 2.2 สารสกัดชนิดเบส.....	20
ตารางที่ 2.3 สารสกัดชนิดซอลเวท.....	21
ตารางที่ 3.1 สารเคมีและแหล่งที่มา	36
ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะของมอดูลเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดลอง.....	39
ตารางที่ 5.1 สรุปผลของงานวิจัย.....	61
ตาราง ข-1 ปริมาณของไอออนสารหนูและไอออนโลหะอื่นๆในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมัน ที่ pH 6-6.5	86
ตาราง ข-2 ผลของชนิดของสารสกัดต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.5 โมล ในคีโรซีน Cyanex 921 ความเข้มข้น 0.5 โมล ในคีโรซีน และ Cyanex 923 ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 5 อัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับ 100 มิลลิลิตร/นาที	86
ตาราง ข-3 ผลของความเข้มข้นของสารหนูในสารละลายป้อนต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ	87

ตาราง ข-4 ผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่อร้อยละของการสกัด	88
ตาราง ข-5 ผลของความเป็นกรด เบสของสารป้อนต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ	90
ตาราง ข-6 ผลของอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ	91
ตาราง ข-7 ผลของเวลาการสกัดในเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์ต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ	98
ตาราง ข-8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัด และร้อยละของการนำกลับ	99
ตาราง ข-9 ผลคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ระหว่าง Aliquat 336 และ Cyanex 921 ที่ความอัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ	100
ตาราง ข-10 ผลคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ระหว่าง Aliquat 336 และ Cyanex 923 ที่ความอัตราส่วนความเข้มข้นต่าง ๆ	101

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้ arsenic และ arsenic compound ในอุตสาหกรรมไม้ (27).....	6
รูปที่ 2.1 มอดูลแบบท่อ (35).....	14
รูปที่ 2.2 ลักษณะของมอดูลแบบเส้นใย (36).....	15
รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับบนเส้นใย ...	15
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของมอดูลแบบแผ่นและกรอบแบบ Channelled DCMD module (38).....	16
รูปที่ 2.5 มอดูลแบบแผ่นและกรอบแบบ SGMD module (33).....	17
รูปที่ 2.6 มอดูลแบบท่อม้วน (38).....	18
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของโมเลกุล H_2AsO_4 ในขณะที่ทำปฏิกิริยาการสกัดด้วยสารสกัด Aliquat336 และ Cyanex 921.....	25
รูปที่ 2.8 การถ่ายเทมวลในระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์ (18).....	32
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ Liqui-Cel [®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลองแบบ.....	38
รูปที่ 3.2 มอดูลเส้นใยกลวง (43).....	39
รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบชนิดของสารสกัดกับผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนู	47
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนูในสารละลายป้อน	47
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับค่าความเป็นกรด เบส ของสารละลายป้อน	48
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับอัตราส่วนของ Aliquat 336 ผสม กับ Cyanex 921 ในสารละลายอินทรีย์	49

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับอัตราส่วนของ Aliquat 336 ผสม กับ Cyanex 923 ในสารละลายอินทรีย์	49
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดไอออนสารหนูกับเวลาในการสกัดที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่างๆกัน	50
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับเวลา การสกัดที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที	51
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับความเข้มข้นของไทโอยูเรียในสารละลายนำกลับที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที	52
รูปที่ 4.9 ค่า Distribution coefficient ของการผสมสารสกัด Aliquat 336 กับ Cyanex 921 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	53
รูปที่ 4.10 ค่า Distribution coefficient ของการผสมสารสกัด Aliquat 336 กับ Cyanex 923 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	53
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของสารสกัด Aliquat 336 รวมกับสารสกัด Cyanex 921 ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนู	54
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $-V_f \ln (C_f/C_{f,0})$ ของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน กับเวลาเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดที่ค่าความเข้มข้นต่างๆกัน	55
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/P$ กับ $1/[(CH_3R_3N^+Cl)(TOPO)/[Cl^-]]$ เมื่อทำการเปลี่ยนค่า ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 และ Cyanex921 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	56
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนกับเปรียบเทียบเวลา	57
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_A - 1/C_{A0}$ ของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนกับเวลา	58
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_A - 1/C_{A0}$ ของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนกับเวลา	59
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนกับเวลาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองแบบปฏิกิริยากับแบบจำลองการแพร่	60

รูปที่ ค.1 ระบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์แบบสองมอดูลโดยใช้ Celgard®x-30 240 (1) ถังของสารละลายป้อน; (2) ปุ่ม ; (3) มาตรวัดความดัน; (4) มาตรวัดอัตราการไหล (5) คอนแทคเตอร์มอดูลที่ 1 สำหรับสกัด (6) ถังของสารละลายอินทรีย์; (7) ท่อของสารละลายอินทรีย์ที่ออกจากมอดูลที่ 1 ต่อเข้ากับ มอดูลที่ 2 ; (8) ถังของสารละลายนำกลับ; (9) คอนแทคเตอร์มอดูลที่ 2 (สำหรับสารละลายนำกลับ) 102



บทที่ 1

บทนำ

ในยุคของการเติบโตด้านอุตสาหกรรมอย่างทุกวันนี้ความตระหนักเรื่องการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมนั้นเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่ไม่ดีนั้นจะส่งผลกระทบต่อ การดำรงชีวิตและสุขภาพของมนุษย์โดยตรงอันตรายจากสารพิษหรือโลหะหนักที่เข้าสู่ร่างกายมนุษย์ก็เป็นผลมาจากการที่มีสารเหล่านี้เจือปนอยู่ในธรรมชาติและสิ่งรอบๆมนุษย์เอง และมีการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมที่กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของสารหนูในน้ำทิ้งมีค่าไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร (1) โดยส่วนใหญ่ทั่วไปในธรรมชาติจะพบสารหนูชนิด As^{3+} และ As^{5+} ซึ่งความรุนแรงของพิษสารหนูจะขึ้นอยู่กับชนิดของประจุตามรายงานการศึกษา (2, 3) โดยพบว่า As^{3+} จะมีพิษที่รุนแรงมากกว่า As^{5+} (4) ซึ่งแต่ละช่วงของค่า pH แตกต่างกันจะทำให้เกิดโครงสร้างของการรวมตัวของสารหนูที่แตกต่างกัน เช่น H_2AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $H_2AsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{2-} ซึ่งมีค่า pH อยู่ในช่วงน้อยกว่า 2 ระหว่าง 3 ถึง 6 ช่วง 8 ถึง 11 และมากกว่า 12 ตามลำดับ (5) โดยสารหนูเป็นสารจำพวกโลหะหนักจัดอยู่ในกลุ่มที่มีพิษต่อร่างกายมนุษย์ หากมีการสะสมในร่างกายมนุษย์แล้วไม่เพียงแต่จะมีความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งเท่านั้น สารหนูยังเข้าไปทำลายระบบประสาท ระบบรับรู้ความรู้สึก หากมีการสะสมตั้งแต่ยังเยาว์วัยก็จะส่งผลต่อพัฒนาการของระบบประสาททำให้มีความฉลาดหรือไอคิว (IQ) ที่ต่ำกว่าเด็กปกติโดยพบว่าสารหนูมีการเข้าสู่ร่างกายมากที่สุดสองทางคือเจือปนในอาหารและน้ำดื่ม (6-8)

ได้มีนักวิจัยหลายคนทำการศึกษากการแยกสารหนูด้วยวิธีต่าง ๆ กันไม่ว่าจะเป็นการแยกด้วยระบบ Sorption , Polymerize inclusion membrane: PIM (9) , Liquid-liquid extraction (10), Supported liquid membrane (11) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วสารหนูที่ปะปนอยู่ในธรรมชาตินี้มีปริมาณของไอออนโลหะน้อยมากอยู่ในระดับหน่วยหนึ่งต่อพันล้าน (ppb) (4) ในขณะที่การใช้วิธี Liquid -liquid extraction จะต้องใช้ปริมาณตัวทำละลายที่สูงมาก (12) ทำให้ต้นทุนการแยกสูงวิธีการแยกไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow fiber supported liquid membrane) นั้นพบว่ามีต้นทุนในการดำเนินการที่ต่ำเนื่องจากใช้ปริมาณสารสกัดน้อย มีความสามารถในการสกัดไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำๆได้ดี Wannachod, Chaturabul (13) ที่ผ่านมาการศึกษาการแยก As(III) และ As(V) จากสารละลายซัลเฟตผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัด Cyanex 923 ละลายในโทลูอีนพบว่าสามารถสกัด As(V) ได้ดีกว่า As(III) (8)

ในอุตสาหกรรมขูดเจาะปิโตรเลียมการบำบัดน้ำทิ้งนั้นเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากในน้ำนั้นจะประกอบไปด้วยโลหะหนักจำพวกสารอะโรมาติกจำพวกโทลูอิน เบนซีนไซลีน และเอทิลเบนซีน กรดอินทรีย์ฟีนอลอัลคิล เป็นต้น ซึ่งมาตรฐานของปริมาณสารเหล่านี้ในน้ำทิ้งก็แตกต่างกันไป แต่สำหรับมาตรฐานสารจำพวกโลหะหนักในน้ำทิ้งซึ่งมีความเป็นอันตรายต่อมนุษย์นั้นได้ถูกกำหนดไว้ในปริมาณที่น้อยมากๆในหน่วยส่วนในพันล้านส่วน ดังนั้นการพัฒนาและนำเทคโนโลยีใหม่ๆเข้ามาใช้เพื่อบำบัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากการขูดเจาะปิโตรเลียมจึงยังมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยปัจจุบันวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดสารหนุออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากการขูดเจาะก๊าซธรรมชาติ และอุตสาหกรรมอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับสารหนุ ได้แก่ เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คืออัตราการสกัดที่ช้ามากดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณของสารสกัดและพื้นที่ในการถ่ายเทมวลสูง (10, 14) ส่วนเทคโนโลยีการอัดน้ำที่มีโลหะหนักปนเปื้อนกลับเข้าไปในหลุมขูดเจาะมักจะมีข้อจำกัดของลักษณะทางกายภาพของหลุมขูดเจาะและค่าใช้จ่ายในการจัดการที่สูง สำหรับศึกษาการสกัดแยกไอออนสารหนุผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในคณะทีมงานของผู้วิจัยร่วมกับบริษัทขูดเจาะน้ำมันดิบในทะเลอ่าวไทยนั้นได้มีการศึกษามาบ้างแล้วโดยผลการศึกษาพบว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงสามารถสกัดไอออนสารหนุออกจากน้ำทิ้งได้ดีที่ 94% (15) และ 91% (5) แต่ข้อจำกัดของการสกัดด้วยระบบนี้คือการดำเนินการระบบด้วยระบบปฏิบัติการแบบ semi-continuous ที่จะต้องหยุดกระบวนการเพื่อที่จะเติมสารสกัดเข้าไปอยู่ในรูพรุน (16) ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัด ดังนั้นเทคโนโลยีการแยกสารผ่านระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์นั้นเป็นอีกหนึ่งวิธีที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้เนื่องจากสามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำทิ้งและอัตราการไหลของสารสกัดได้อย่างเป็นอิสระต่อกันรวมทั้งในระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์นั้นจะสามารถดำเนินการระบบแบบ continuous process ได้และไม่มีปัญหาเรื่องของการกระจายตัวในแต่ละเฟส มีพื้นที่สัมผัสต่อปริมาตรสูงประมาณ 10,000 ตร.ม. / ลบ.ม. ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยเหมาะกับการติดตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีจำกัดรวมทั้งมีอัตราการถ่ายเทมวลที่ดีภายในเส้นใยและมีต้นทุนต่ำ (17-19)

1.1 ประวัติความเป็นมา

สารหนูถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ.1793 โดยอัลเบิร์ตัส มัคนัส ชาวบาวาเลีย แห่งเยอรมัน ซึ่งการพบสารหนุนั้นจะพบทั้งอยู่ในรูปที่เป็นธาตุซึ่งมีสมบัติเป็นสารกึ่งโลหะและในรูปแบบสารประกอบที่จะพบทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยสารหนูที่พบในรูปธาตุนั้นจะไม่มีพิษ แต่จะมีพิษสูงเมื่ออยู่ในรูปที่เป็นสารประกอบ ในธรรมชาติจะพบสารหนูทั้งหมด 3 ชนิดคือ ชนิดแรกเป็นชนิดที่มีความเสถียรสูงที่สุดจะพบในลักษณะที่เป็นของแข็งสีเทาและชนิดที่สองนั้นจะสามารถเปลี่ยนเป็นโลหะได้เมื่อถูกความร้อนจะพบในลักษณะที่เป็นผงสีเหลือง ส่วนชนิดที่สามจะมีสีดำ มีรูปร่างที่ไม่แน่นอนสามารถเปลี่ยนเป็นโลหะได้เช่นเดียวกันเมื่อถูกความร้อนสูง (20) การพบสารหนูในธรรมชาตินั้นมักจะพบอยู่ร่วมกับแร่ธาตุอื่นๆ เช่น ทองแดง ตะกั่ว เงิน พลวง สังกะสี เป็นต้นซึ่งอาจจะพบปริมาณสารหนูได้มากสำหรับพื้นที่ที่อยู่ใกล้กับโรงงานอุตสาหกรรม การทำการถลุงแร่ดังกล่าวนี้นอกจากนี้สารหนูยังพบอยู่ในบรรยากาศทั่วไปเนื่องจากมาจากการเผาไหม้ ถ่านหิน หรือแม้กระทั่งในการขุดเจาะปิโตรเลียม ทั้งนี้ปริมาณสารหนูที่มีการผลิตในโลกส่วนใหญ่ได้มาจากประเทศจีน ฝรั่งเศส เยอรมัน และเม็กซิโก ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 1.1 (21)

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการผลิต arsenic trioxide ในโลก

ประเทศ	การผลิต arsenic trioxide	
	ปี 2005	ปี 2006
เบลเยียม	1,000	1,000
ชิลี	11,500	11,500
จีน	30,000	30,300
ฝรั่งเศส	1,000	1,000
คาซัคสถาน	1,500	1,500
เม็กซิโก	1,650	1,300
โมร็อกโก	6,900	6,900
เปรู	3,600	3,500
รัสเซีย	1,500	1,500
อื่นๆ	790	1,000
รวม	59,400	59,200

1.2 ประโยชน์ของสารหนู

สารหนูที่อยู่ในรูปสารประกอบจะนำมาใช้ประโยชน์ในทางด้านเกษตรกรรม แต่สำหรับในส่วนภาคอุตสาหกรรมก็จะถูกพบการนำสารหนูไปใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมแก้ว เซรามิกส์ ยา และอาหารสัตว์

1.2.1 ประโยชน์ของสารหนูในทางการแพทย์

ในบางประเทศได้นำสารละลายโพว์เลอร์ซึ่งมีปริมาณของสารหนูละลายอยู่เล็กน้อยไปเป็นสารประกอบในการผลิตยา (ขนาดรับประทานไม่เกินวันละ 10 มิลลิกรัม) เพื่อรักษาโรคมะเร็งในเม็ดโลหิต และได้มีการทดลองนำอะเซนิคส์ไดรออกไซด์ร่วมกับทาลิโดไมด์เพื่อรักษาผู้ป่วยกลุ่มที่มีความผิดปกติของการสร้างเม็ดเลือดในไขกระดูก (22) เคยพบว่ามีการใช้สารหนูอินทรีย์เพื่อรักษาโรคซิฟิลิส

1.2.2 ประโยชน์ของสารหนูต่อด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม

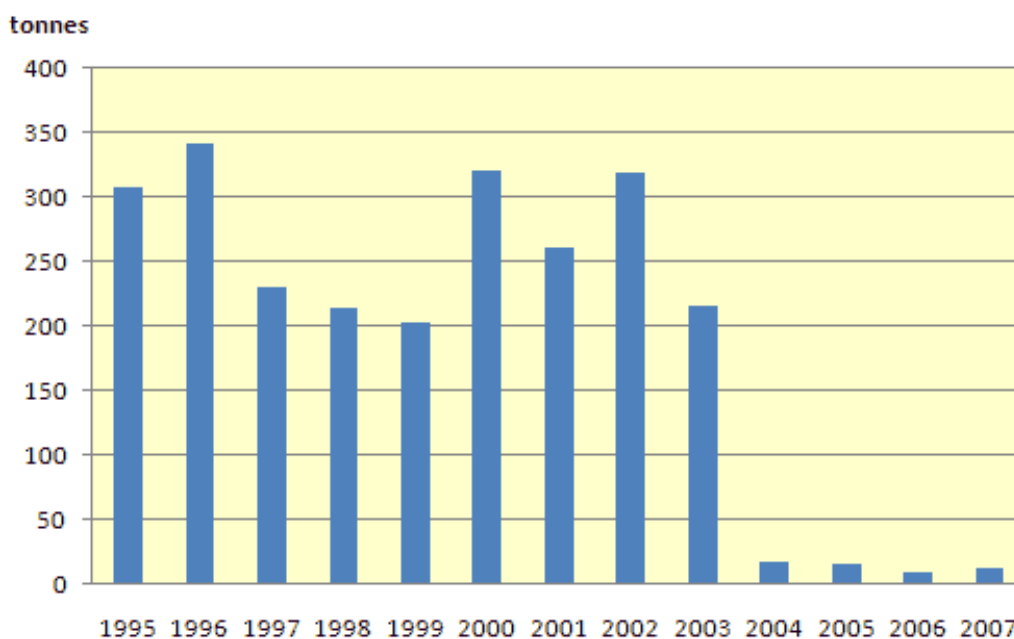
มีการนำสารหนูที่เป็นประเภทอนินทรีย์ไปใช้เพื่อสำหรับการเก็บรักษาของไม้ได้ดีเนื่องจากพิษจากสารหนุนั้นและจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแมลงเชื้อราและแบคทีเรียในเนื้อไม้ได้ดี (23) นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมในยาฆ่าแมลงใช้เป็นสารเติมเข้าไปที่กระบวนการผลิต Semi-conductor (24) โดยคุณสมบัติทั่วไปของสารหนู (25) จะแสดงดังข้อมูลในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติทั่วไปของสารหนู

คุณสมบัติทั่วไป	รายละเอียด
ชื่อ, สัญลักษณ์	สารหนู (Arsenic), As
เลขอะตอม	33
มวลอะตอม	74.92
อนุกรมเคมี	ธาตุกึ่งโลหะ
หมู่, คาบ, บล็อก	15, 4, p
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 5
สถานะออกซิเดชัน	+/- 3, 5
สถานะ	ของแข็ง
จุดหลอมเหลว	1090 K (817 °C)
จุดเดือด	887 K (614 °C)

ตารางที่ 1.3 แสดงการใช้ arsenic compound ในการรักษาโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาวเฉียบพลัน (APL) (26)

ผู้ทำวิจัย	สารเคมีที่ใช้	การวินิจฉัยโรค	จำนวนผู้ป่วย	% CR
Huang SL et al.	Tablets	Primary	60	98
Zhang P et al.	As ₂ O ₃	Primary	42	52.4
Chen GO, et al	As ₂ O ₃	Relapsed	16	93.7
Soignet SL, et	As ₂ O ₃	Primary	12	92
al. Niu C, et al	As ₂ O ₃	Relapsed+refractory	11	72.7
Soiget SL et al	As ₂ O ₃	Primary	47	95.1
Lu DP et al	As ₂ O ₃	Relapsed	40	95
		Relapsed+refractory		



รูปที่ 1.1 ปริมาณการใช้ arsenic และ arsenic compound ในอุตสาหกรรมไม้ (27)

1.3 ความเป็นพิษของสารหนู

สารหนูมีพิษร้ายแรงหากสะสมในร่างกายมนุษย์ปริมาณมากจะส่งผลให้เกิดอาการเป็นพิษเรื้อรัง ทำให้ผิวหนังเปลี่ยนสีและฝ่ามือฝ่าเท้าหนาขึ้น และอาจจะเป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง เกิดภาวะซีดจากไขกระดูกถูกกดการทำงาน Hall (8) และมีอาการของความผิดปกติของระบบทางเดินอาหารเช่น เส้นเลือดในหลอดอาหารโป่งพองอันเนื่องมาจากความดันเส้นเลือดดำในตับสูงจากตับแข็งที่ไม่ได้เป็นสาเหตุมาจากสุรา ระบบประสาท มีความผิดปกติ ได้แก่ ชาปลายมือปลายเท้า สูญเสียความรู้สึกตัวสับสน บางการศึกษาพบว่าสารหนูเป็นสาเหตุของมะเร็งปอดและมะเร็งที่กระเพาะปัสสาวะอีกด้วย (28)

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสารหนู

จากการศึกษาของ Prapasawat (29) เกี่ยวกับผลของการสกัด As(V) และ As(III) ออกจากสารละลายซัลเฟตโดยใช้ Cyanex 923 ทำละลายในโทลูอินทำหน้าที่เป็นสารสกัดและใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับซึ่งในงานชิ้นนี้ได้ทำงานทดลองด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัด As(V) นั้นสูงกว่า As(III) ที่ 46% และ 38% ตามลำดับ

ในขณะที่เดียวกันยังได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการถ่ายเทมวล โดยพบว่าที่เฟสของสารละลายป้อนจะมีค่า k_f จากการคำนวณเท่ากับ 7.15×10^{-3} และในเฟสสารอินทรีย์มีค่า k_r จากการคำนวณเท่ากับ 3.45×10^{-3} โดย Pancharoen และคณะ (15) ศึกษาการแยกไอออนสารหนูและไอออนปรอทในน้ำทิ้งจากการขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ โดยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยสารสกัดที่นำมาใช้ Aliquat 336, Bromo-PADAP, Cyanex 923 และ Cyanex 471 มาใช้เพื่อศึกษาการเสริมฤทธิ์กันโดยใช้โพลีเมอร์เป็นตัวทำละลาย ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพการสกัดไอออนโลหะได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ละลายในสารป้อน ชนิดของสารนำกลับระหว่าง NaOH, น้ำ DI, HNO₃, H₂SO₄ และ ไทโอยูเรีย รวมถึงจำนวนรอบ โดยพบว่าสามารถสกัดให้ความเข้มข้นของปรอทต่ำกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากทดลองเพียง 1 รอบโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 เข้มข้น 0.22 โมล ผสมกับ Cyanex 471 เข้มข้น 0.06 โมล ส่วนสารละลายนำกลับใช้ ไทโอยูเรีย เข้มข้น 0.1 โมล และสามารถแยกสารหนูให้มีความเข้มข้นเหลือต่ำกว่ามาตรฐานที่ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลอง 3 รอบ Pancharoen และคณะ (5) ได้ศึกษาการแยกสารไอออนของสารหนูจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมการขุดเจาะปิโตรเลียมในบริเวณอ่าวไทยโดยสารสกัดที่นำมาศึกษาได้แก่ Cyanex 923, TBP, Cyanex 301, TOA และ Aliquat 336 ความเข้มข้น 35% (v/v) และที่ค่าของความเข้มข้นสารละลายนำกลับ NaOH เท่ากับ 0.5 โมลพบว่าสารสกัด Aliquat 336 ให้ผลการนำกลับไอออนของสารหนูสูงที่สุดส่วนในขณะที่ใช้ Cyanex 301 ให้ผลการสกัดที่สูงสุด แต่มีเปอร์เซ็นต์การนำกลับที่น้อยมาก ผู้วิจัยยังพบว่าที่การทดลองจำนวน 3 รอบนั้นให้ผลการสกัดไอออนของสารหนูเท่ากับ 91% และผลการนำกลับไอออนสารหนูเท่ากับ 72% ซึ่งงานชิ้นนี้สามารถที่จะแยกสารหนูได้ผ่านค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด นอกจากนี้ยังพบอีกว่าสามารถนำกลับไอออนของสารหนูได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการนำกลับของสารละลายนำกลับเข้ามาผ่านในมอดูลของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง Guell และคณะทำการศึกษาการสกัด As(V) โดยใช้สาร Aliquat 336 เป็นสารสกัด แล้วเปรียบเทียบผลของการสกัดระหว่างวิธี เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (Supported liquid membrane) กับวิธีโพลีเมอร์ อินคูลชัน เมมเบรน (PIM) ซึ่งในเฟสนำกลับ (Stripping) นั้นจะนำโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลเป็นสารละลายนำกลับ จากผลการทดลองพบว่าในระบบพอลิเมอร์อินคูลชันเมมเบรน (PIM) นั้นให้ผลการสกัดที่สูงกว่า Ballinas และคณะ (9) ได้ทำการศึกษาการนำกลับ As(V) จากสารละลายของคอปเปอร์อิลโคโทรไลติก โดยใช้พอลิเมอร์อินคูลชันเมมเบรน (Polymer Inclusion Membrane, PIM) และใช้สาร DBBP (Di-Buthyl-Buthyl- Phosponate) เป็นสารสกัดและผลการสกัดพบว่าสามารถนำกลับ As(V) ได้ 90% ในระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 800 นาที Martinez และคณะ (11) ได้ศึกษาการแยกสารหนู As(V) ที่มีอยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นที่ใช้มีค่าเท่ากับ 2 โมลเลือกใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวพุง

(Supported Liquid Membrane) และมี Cyanex 921 ละลายในคีโรซีนเป็นสารสกัดซึ่งผู้วิจัยพบว่า ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 921 เท่ากับ 0.12 โมลจะมีประสิทธิภาพการสกัดสารหนู As(V) สูงที่สุดมีเปอร์เซ็นต์การสกัดที่ 94% โดยใช้เวลา 120 นาที Bogacki Wisniewski และคณะ (30) ศึกษาการสกัดสารหนูออกจากสารละลายกรดซัลฟิวริกโดยใช้สารสกัด ENIM-100, ไตรบิวทิลฟอสเฟต และสารผสมระหว่าง Cyanex 923 กับ 2-Methylhexonal ซึ่งผลการศึกษาพบว่า Cyanex 923 และ TBP ให้ผลการสกัดที่สูงในขณะเดียวกันน้ำก็ใช้เป็นสารละลายน้ำกลับได้ดีอีกด้วย Said Bey (31) ศึกษาการแยกสารหนู As(V) ออกจากน้ำสังเคราะห์โดยใช้วิธีการสกัดแบบ Non-dispersive solvent ผ่านระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์โดยใช้สาร Aliquat 336 เป็นสารสกัดซึ่งการทดลองจะทำ ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันไปเพื่อศึกษาผลของ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้น ค่า pH ของสารละลายรวมไปถึงคุณสมบัติของเยื่อแผ่นเส้นใยกลวงด้วยซึ่งผลการทดลองพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดแยกสารหนูโดยวิธี Non dispersive solvent extraction นั้นคือผลของค่า pH และขนาดความหนาของเส้นใยแต่อุณหภูมิจะไม่มีผลต่อความสามารถในการสกัดโดยพบว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุดได้ 70% ภายในระยะเวลา 6 ชั่วโมง

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสารหนูด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์นั้นพบว่ายังมีปริมาณผู้ที่สนใจศึกษาอยู่น้อยมากหากพิจารณาข้อดีของระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์เทียบกับระบบอื่นจะพบว่าในระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์นั้นมีข้อดีคือ เป็นระบบที่สามารถป้อนสารป้อนให้ไหลได้ด้วยอัตราไหลสูงโดยที่จะไม่มีการกระจายตัวของสารป้อน ความหนาแน่นระหว่างสารสองชนิดนั้นไม่แตกต่างกันมากนักจะมีพื้นที่สัมผัสต่อปริมาตรเยื่อมากกว่ามอดูลอื่นซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดอัตราการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะที่มากขึ้นด้วยซึ่งจากการศึกษาพบว่าระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์นั้นจะมีพื้นที่สัมผัสมากกว่าระบบ gas absorption ประมาณ 30 เท่าและมีค่ามากกว่าระบบ Liquid liquid extraction ประมาณ 500 เท่า (32) ดังนั้นจากเหตุผลข้างต้นนี้จึงทำให้มีนักวิจัยจำนวนมากสนใจที่จะนำระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์มาศึกษาในการกำจัดสารหนูโดยปัจจัยหนึ่งที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสกัดในระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์ได้แก่ชนิดของสารสกัดจากการค้นคว้าในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารสกัดที่มีสามารถนำมาใช้แยกสารหนูได้แก่ Cyanex 923, Aliquat 336, Bromo-PADAP, Cyanex 471, TBP, Cyanex 301, TOA และ Cyanex 921

1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการแยกสารหนูออกจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันโดยใช้ระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูล และสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์
2. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกสารหนูออกจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันโดยใช้ระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูล

1.6 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดสารหนู
 - ชนิดของสารสกัด Aliquat 336, Cyanex 921 และ Cyanex 923 ในตัวทำละลายโครซีนและอิทธิพลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์
 - ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนระหว่าง 0.2-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - ความเป็นกรด เบสของสารละลายป้อน
 - อัตราส่วนความเข้มข้นของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่อการสกัดสารหนูด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูล
2. วิเคราะห์และสรุปผล

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้ในการสกัดแยกไอออนโลหะจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของไอออนโลหะระดับต่ำมาก (หนึ่งในล้านส่วน (ppm) หรือหนึ่งในพันล้านส่วน (ppb) แต่ยังคงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูล
2. สามารถแยกสารหนูออกจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

3. นำองค์ความรู้ใหม่ที่ได้สามารถถ่ายทอดสู่สาธารณชนผ่านการเผยแพร่ในรูปแบบของเอกสารวิชาการ บทความในวารสาร หรือการประชุมวิชาการ

1.8 แผนการทำงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนหนูด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์รวมทั้งการสกัดแยกด้วยวิธีการอื่นๆ
2. ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับชนิดสารสกัด สารละลายป้อน และสารละลายนำกลับ รวมถึงกลไกในการถ่ายเทมวลของสารสกัดของระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์
3. ทำการศึกษาและทดลองหาอัตราส่วนของสารสกัดที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสารสกัดในการสกัดแยกไอออนสารหนูด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์
4. ศึกษาปัจจัยเรื่องความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูชนิดของสารสกัดความเข้มข้นของสารสกัดที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนสารหนูออกจากน้ำทิ้งด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูล
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
6. เขียนบทความเชิงวิชาการ

บทที่ 2

ทฤษฎี

เทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการแยกหรือสกัดสารในปัจจุบันนี้ได้มีให้เลือกมากมายหลายแบบ เช่น กระบวนการไดอะไลซิส , กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส , กระบวนการออสโมซิสผันกลับ และนาโนฟิลเตรชัน , กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน , กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน , กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน , กระบวนการแยกไอออนด้วยตัวทำละลายหรือแม้กระทั่งกระบวนการแยกไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลว (33) ซึ่งในการเลือกนำเทคโนโลยีต่างๆเหล่านี้ไปใช้กระบวนการแยกสารก็ขึ้นอยู่กับการใช้งานที่ผู้ใช้งานต้องการสำหรับงานที่ผู้ใช้งานต้องการที่จะแยกไอออนที่มีความเข้มข้นที่ต่ำมากๆ ที่อยู่ในระดับส่วนในล้านหรือส่วนในพันล้านไม่ว่าจะเนื่องด้วยเหตุผลทางด้านความปลอดภัยต่อชีวิตมนุษย์เนื่องจากสารเหล่านั้นมีความเป็นพิษสูงหรือแม้กระทั่งในกลุ่มไอออนโลหะที่มีราคาสูงมาก ๆ กระบวนการแยกไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวนั้นเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมกับการใช้งานในแบบดังกล่าว คุณสมบัติของเยื่อแผ่นเหลวไม่เพียงแต่มีความสามารถในการแยกไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำๆได้ดีเท่านั้นแต่ยังสามารถที่จะทำงานให้จบได้เพียงหนึ่งขั้นตอนใช้พลังงานในการทำงานของระบบต่ำอีกทั้งยังมีอัตราการใช้สารสกัดที่ต่ำมากๆทำให้การใช้สารสกัดนั้นไม่สิ้นเปลืองมากเท่ากับวิธีอื่นๆ (13)

2.1 ประเภทของเยื่อแผ่นเหลว

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ (34)

2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ (unsupported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ในหลายทิศทางเพราะฉะนั้นในบางครั้งจะนิยมเรียกว่า เยื่อแผ่นเหลวแบบเคลื่อนที่ได้ (mobilized liquid membrane) ตัวอย่างเช่น เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน และเยื่อแผ่นเหลวเทียมแบบอาศัยสนามไฟฟ้า

2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองบนตัวรองรับ (supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เพราะฉะนั้นจึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เยื่อแผ่นเหลวแบบเคลื่อนที่ไม่ได้ (Immobilized liquid membrane) โดยลักษณะของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้จะมีตัวรองรับที่มีรูพรุนโดยที่มีวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ (วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว) จะฝังตัวอยู่ในระหว่างรูพรุนของตัวรองรับซึ่งจะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับวัฏภาคสารละลายป้อน และวัฏภาคสารละลายนำกลับโดยที่ตัวรองรับจะช่วยยึดสารละลายอินทรีย์ไว้ไม่ให้หลุดออกไปกับการไหลของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับด้วยประเภทของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับสามารถแบ่งออกตามวัสดุที่นำมาใช้ได้แก่

- วัสดุที่รูพรุนเป็นแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยสารละลายที่เหมาะสมกับตัวรองรับประเภทนี้จะต้องเป็นสารละลายอินทรีย์
- วัสดุที่รูพรุนเป็นแบบชอบน้ำ (Hydrophilic) โดยสารละลายที่เหมาะสมกับตัวรองรับประเภทนี้จะต้องเป็นสารละลายน้ำ

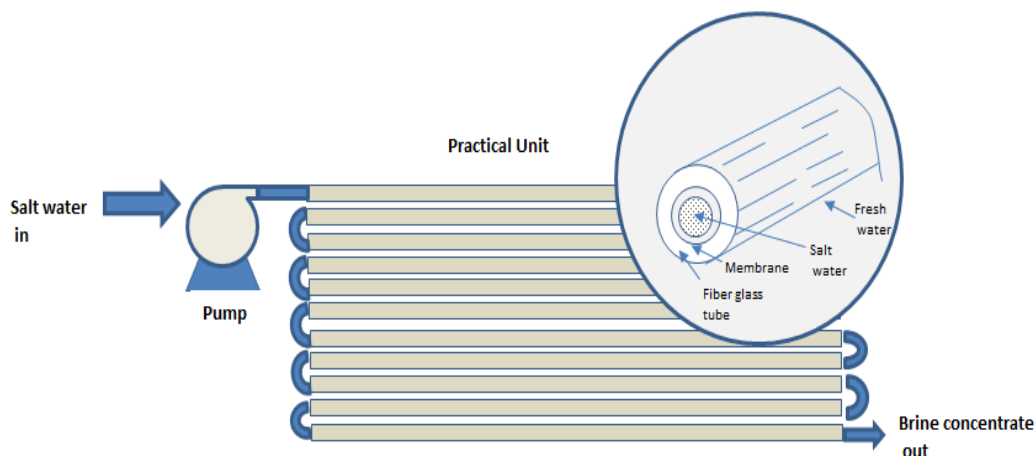
2.2 มอดูลเยื่อแผ่นเหลว

การออกแบบมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่นิยมใช้ในวงการอุตสาหกรรม (33) ในปัจจุบันนี้พบว่ามียู่ 4 รูปแบบซึ่งจำแนกตามการออกแบบด้วยวิธีที่จัดเรียงเยื่อแผ่นเหลวภายในเป็นอุปกรณ์โดยตัวอย่างของมอดูลเยื่อแผ่นเหลวในปัจจุบันนี้มีดังนี้

2.2.1 แบบท่อ (Tubular modules)

เป็นมอดูลที่มีประกอบด้วยท่อของเมมเบรนจัดเรียงอยู่ภายในอุปกรณ์และวัสดุที่นิยมนำมาทำท่อหลอดเมมเบรนมักทำขึ้นจากผ้าที่มีรูพรุนหรือพลาสติกที่มีเยื่อเลือกในภายในขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อโดยทั่วไปในช่วง 5-25 มม. และท่อมีความยาวอยู่ในช่วงของ 0.6 ถึง 6 เมตรมอดูลท่อที่มีลักษณะที่สำคัญคือ สามารถยอมให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ในสารป้อนผ่านได้เนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ทำให้มีข้อดีคือสามารถป้อนสารประเภทแขวนลอยที่มีความเข้มข้นสูงได้นอกจากนี้มอดูลยังสามารถทำความสะอาดได้ง่าย

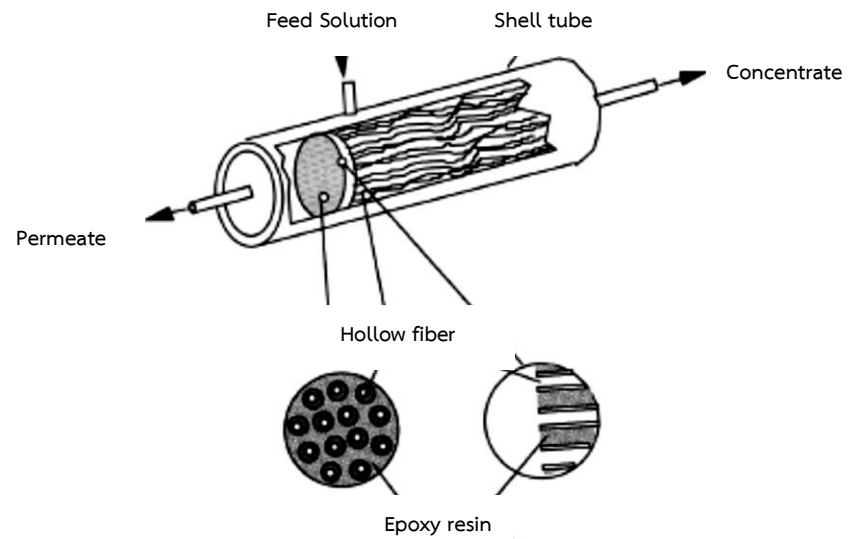
โดยใช้เครื่องจักรกลหรือสารเคมีในการทำความสะอาดส่วนข้อเสียคือต้องใช้เส้นใยเป็นจำนวนมากเพื่อบรรจุลงใน housing และใช้ต้นทุนที่สูงตัวอย่างของมอดูลแบบท่อแสดงในรูปที่ 2.2



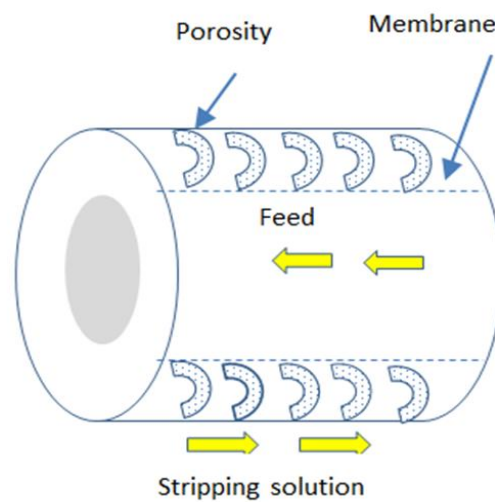
รูปที่ 2.1 มอดูลแบบท่อ (35)

2.2.2 แบบเส้นใยกลาง (Hollow Fiber Module)

มอดูลเส้นใยกลางจะมีลักษณะที่บางโดยปกติโมดูลชนิดนี้จะประกอบไปด้วยเส้นใยกลางประมาณ 50- 3000 ชิ้นบรรจุรวมเป็นในชุดเดียวกันเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นใยปกติจะมีขนาดประมาณช่วง 0.2-3 มม (ยกเว้นที่ใช้ใน RO ซึ่งอาจจะเป็น บางเป็น 0.04 มม. และสามารถทนต่อความดันที่สูงมาก ความยาวของเส้นใยยาวประมาณ 18-120 ซม. และส่วนมากถูกออกแบบมาให้ทำงานในช่วงของการไหลที่มีตัวเลข Reynolds number ประมาณ 500 - 3000 และที่ความดันสูงสุดไม่เกิน 2.5 บาร์สำหรับข้อดีคือมีช่องว่างน้อยหรือมีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูงอาจสูงถึง 30000 ตร.ม./ ลบ.ม. และไม่ต้องใช้วัสดุที่ใช้ในการยึดเกาะส่วนข้อเสียคือต้องมีการบำบัดสารปนเปื้อนเบื้องต้นก่อนเพื่อกำกัตสารแขวนลอยและคอลลอยด์ออกก่อนตัวอย่างของโมดูลเส้นใยกลางแสดงในรูปที่ 2.3



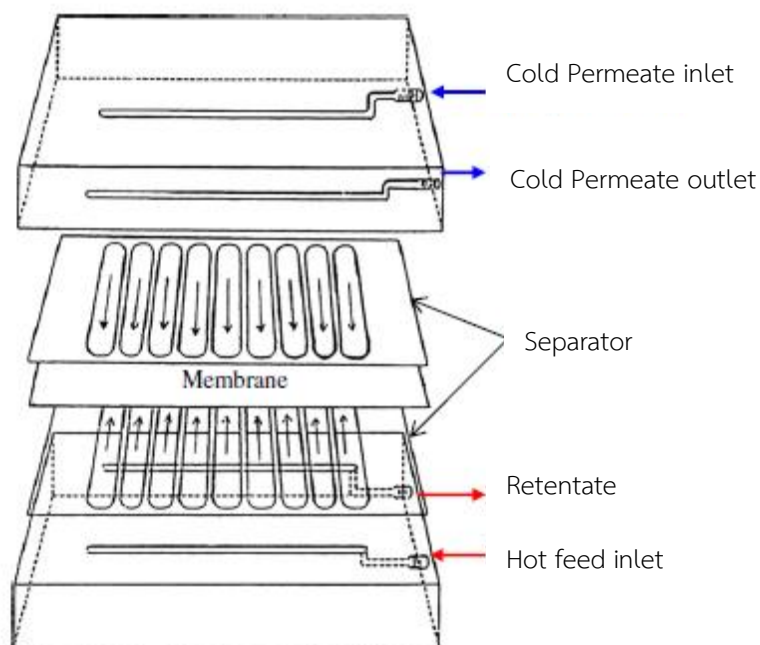
รูปที่ 2.2 ลักษณะของมอดูแบบเส้นใย (36)



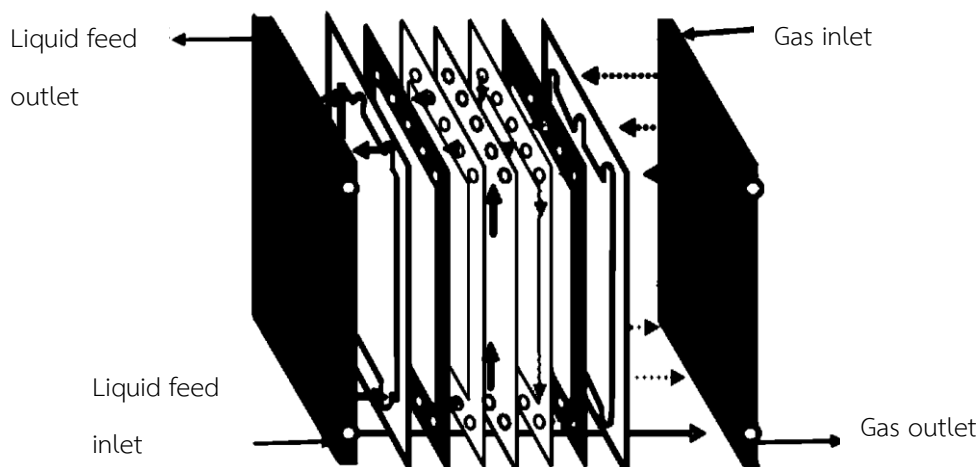
รูปที่ 2.3 ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับบนเส้นใย กลางหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง (37)

2.2.3 มอดูลแบบแผ่นเรียบ (Flat Sheet modules)

มอดูลแผ่นเรียบประกอบด้วยเยื่อแผ่นด้านบนและแผ่นเพททิตที่ด้านล่างกัน จากนั้นปล่อยสารป้อนระหว่างแผ่นทำให้น้ำมีการแพร่หรือซึมออกด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 มอดูลแผ่นเรียบมีช่องว่างระหว่างช่องเริ่มที่ 0.5-10 มม.และมีความยาวตั้งแต่ 10 ถึง 60 ซม. โดยทั่วไปมอดูลนี้จะใช้ความดันในการดำเนินการอยู่ในช่วง 400 – 1000 psig มีพื้นที่เยื่อแผ่นต่อหน่วยปริมาตร ประมาณ 100-400 ตร.ม./ ลบ.ม. สำหรับข้อดีคือสามารถที่จะถอดเปลี่ยนได้เมื่อเยื่อแผ่นมีความเสียหายส่วนข้อเสียคือมีรูปแบบการไหลที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้ต้นทุนสูง



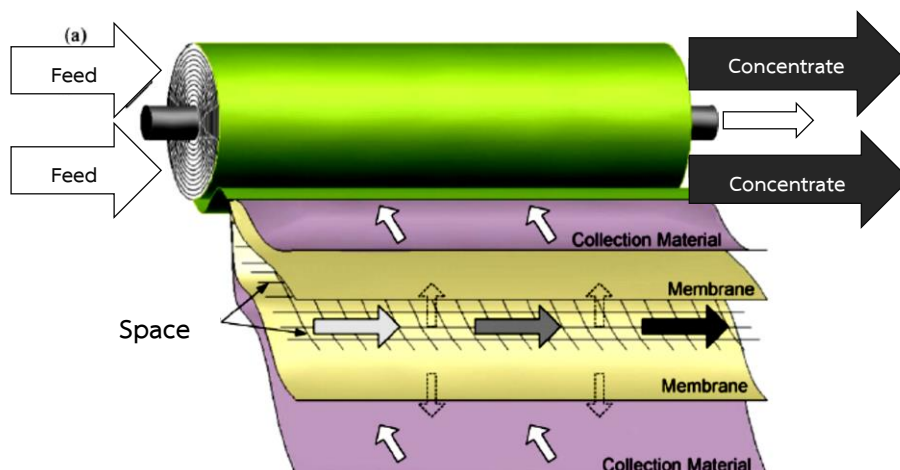
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของมอดูลแบบแผ่นและกรอบแบบ Channelled DCMD module (38)



รูปที่ 2.5 มอดูลแบบแผ่นและกรอบแบบ SGMD module (33)

2.2.4 มอดูล แบบท่อเกลียว (Spiral wound)

การออกแบบของมอดูลแบบท่อเกลียวจะคล้ายกับที่ของมอดูลแผ่นแบนโดยระหว่างแผ่นเมมเบรนในมอดูลแบบท่อเกลียวมีวัสดุมาคั้นโดยสารป้อนมีลักษณะการไหลเข้าไปเป็นแบบขวางกับด้านเพอมีเอทดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปมอดูลนี้จะใช้ความดันสำหรับการดำเนินการอยู่ในช่วงระหว่าง 50 - 1000 psig โดยมีข้อดีคือมีความหนาแน่นของเยื่อแผ่นสูงประมาณ 300-1000 ตร.ม./ ลบ.ม. ทำให้มีค่าฟลักซ์ที่สูงส่วนข้อเสียคือต้องมีการบำบัดสารป้อนเบื้องต้นก่อนเพื่อป้องกันการเกิดการอุดตัน



รูปที่ 2.6 มอดูลแบบท่อม้วน (38)

2.3 การแบ่งประเภทของสารสกัด

การแบ่งประเภทของสารสกัดตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันหลักตามโครงสร้างโมเลกุลสามารถที่จะจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ (39) คือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractant) สารสกัดชนิดเบส (Basic extractant) และสารสกัดชนิดกลาง (Neutral extractant)

2.3.1 สารสกัดชนิดกรด

สารสกัดชนิดกรดจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามการเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายป้อน คือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractant) และสารสกัดคีเลต (Chelate extractant) สารสกัดกรดจะมีฟังก์ชันจำพวก COOH , $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ ที่ทำหน้าที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายป้อน สารสกัดคีเลตคือสารสกัดที่เข้าทำปฏิกิริยาคีเลชันกับไอออนบวกของโลหะเนื่องด้วยองค์ประกอบของสารสกัดชนิดนี้ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่พร้อมจะให้ไอออนลบกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยาทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้

ตารางที่ 2.1 สารสกัดชนิดกรด

สารสกัดชนิดกรด	บริษัท	ชื่อทางการค้า
Di-2-ethylhexyl phosphoric acids	Merck Ltd.	D2EHPA
Phosphoricacid tri (2-ethylhexyl) ester	Merck Ltd.	TEHP
Thenoyltrifluoroacetone	Merck Ltd.	HTTA
Bis(2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid	Cytec Inc. USA	Cyanex 272
Bis(2,4,4-trimethylpentyl) dithiophosphinic acid	Cytec Inc. USA	Cyanex 301
Trioctylphosphineoxides	Cytec Inc. USA	Cyanex 921
Trialkylphosphineoxides	Cytec Inc. USA	Cyanex 923
2-Hydroxy-5-nonylacetophenoneoximes	Cognis Inc. USA	LIX84-IC
5-Nonylsalicylaldoxime	Cognis Inc. USA	LIX860N-I

สมสมการ 2.1 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดกรดและสารสกัดชนิดคีเลตกับไอออนโลหะ



ซึ่งสมการ 2.1 จะแสดงการการรวมตัวของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาการสกัดจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด เบสของสารสกัด และคุณสมบัติเฉพาะของไอออนนั้นๆด้วย (39)

2.3.2 สารสกัดชนิดเบส

สารสกัดชนิดเบสเป็นสารสกัดชนิดอินทรีย์ที่เมื่อมีการแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะไอออนแล้วจะเกิดเป็นรูปเกลือสารสกัดชนิดนี้ที่ถูกนำมาใช้งานโดยทั่วไปจะอยู่ในกลุ่มของเอมีน และแอมโมเนียมเฮไลด์โดยในกลุ่มของแอมโมเนียมเฮไลด์นั้นจะมีทั้งชนิดที่เป็นปฐมภูมิ (RNH_2) ทูตียมภูมิ (R_2NH) ตติยภูมิ (R_3N) และจตุภูมิ (R_4N^+)

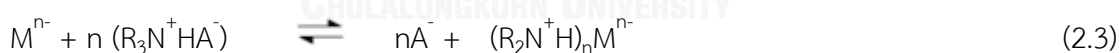
ตารางที่ 2.2 สารสกัดชนิดเบส

สารสกัดชนิดเบส	บริษัท	ชื่อทางการค้า
Tri-n-octylamine	Cognis Inc. USA	Alamine 300 (TOA)
Methyltrioctyl ammonium chloride	Cognis Inc. USA	Aliquat 336
Ammonium salt	Cognis Inc. USA	Aliquat 100
Ammonium salt	Cognis Inc. USA	Aliquat 100S
Ammonium salt	Cognis Inc. USA	Aliquat 134

สมการ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการเกิดเกลือเอมีนก่อนที่เข้าทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนโลหะ



สมการ 2.3 จะแสดงการเกิดปฏิกิริยาการสกัดจากการเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะของสารสกัดชนิดเบสกับไอออนโลหะที่มีประจุลบปฏิกิริยาการสกัดนี้จะเกิดขึ้นในวัฏภาคของสารละลายป้อน (Feed phase) โดยประสิทธิภาพของการสกัดนั้นจะแปรผันตรงตามความสามารถของสารสกัดที่จะเข้าไปจับกับไอออนโลหะที่มีประจุลบ



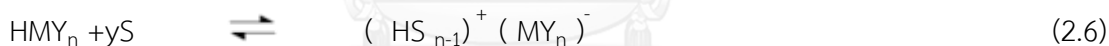
เกลือของเอมีน $\text{R}_3\text{N}^+\text{HA}^-$ ในแสดงสมการ 2.2 นั้นเกิดจากการที่สารสกัดเอมีนเข้าทำปฏิกิริยากับกรด จะกลายเป็นเกลือที่มีขั้วอยู่ในวัฏภาคของสารสกัดเมื่อถูกสัมผัสกับวัฏภาคของสารละลายป้อน ก็จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนโลหะ M^{n-} เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังแสดงในสมการ 2.3 นอกจากนี้ประสิทธิภาพของการใช้สารสกัดเอมีนในการสกัดโลหะไอออนยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของเอมีนด้วยกันเองที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกันซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของทำละลายแต่ละชนิดและคุณสมบัติของประจุของแอมโมเนียมที่เข้าทำปฏิกิริยาด้วย

2.3.3 สารสกัดชนิดกลาง (ซอลเวท)

สารสกัดชนิดกลางหรือสารสกัดซอลเวทเป็นสารสกัดประเภทที่มีหมู่ฟังก์ชันให้เฉพาะไอออนลบโดยจะเข้าร่วมตัวกับโลหะไอออนในวัฏภาคของสารละลายป้อน (Feed phase) เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนเป็นกลางประสิทธิภาพในการสกัดของสารสกัดชนิดกลางหรือสารสกัดซอลเวทนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะไอออนนั้นๆที่มีความสามารถในการเปลี่ยนเป็นไอออนเชิงซ้อนในวัฏภาคของสารละลายป้อนซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการสกัดนั้นจะเกิดจากการรวมตัวกันของอะตอมโลหะที่อยู่ระหว่างไอออนเชิงซ้อนหรืออาจเกิดจากการรวมตัวกับโปรตอน สำหรับการเกิดไอออนเชิงซ้อนของกรดตั้งที่สมแสดงไว้ในสมการที่ 2.5



เมื่อ S แทนด้วยสารสกัดชนิดกลางหรือสารสกัดซอลเวทโดยที่การเพิ่มความสามารถในการละลายของสารอินทรีย์ในวัฏภาคสารสกัดทำได้โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกับสารสกัดตั้งแสดงในสมการ 2.6



ตารางที่ 2.3 สารสกัดชนิดซอลเวท

สารสกัดชนิดซอลเวท	บริษัท	ชื่อทางการค้า
Tributylphosphineoxide	Cytec Inc. USA	TBPO
Triphenylphosphineoxide	Cytec Inc. USA	TPPO

2.4 ปฏิบัติการสกัดไอออนสารหนู

ในงานวิจัยชิ้นนี้กระบวนการสกัดไอออนสารหนูมีการถ่ายเทมวลแบบสวนทางกัน โดยสมการการเกิดปฏิกิริยาการสกัดสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Aliquat 336

ไอออนสารหนูที่ศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อน (Feed phase) จะเข้าทำปฏิกิริยาการสกัดกับสารสกัด Aliquat 336 ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ หลังจากทำปฏิกิริยาการสกัดแล้วจะเกิดไอออนเชิงซ้อนขึ้นโดยจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบไปข้างหน้า จนกระทั่งเข้าสู่ค่าสมดุลของปฏิกิริยาซึ่งสมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Aliquat 336 สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.7 (40) ดังนี้



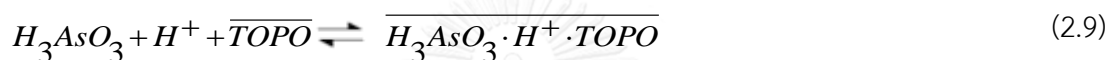
สมการการหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา

$$K_{ex} = \frac{[(CH_3R_3NCl)(H_3AsO_3)]}{[H_3AsO_3][CH_3R_3NCl]} \quad (2.8)$$

ขณะที่ที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคสารละลายนำกลับและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์จะมีปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นเนื่องด้วยแรงผลักดันจากไฮโดรเนียมไอออนการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุลซึ่งค่าคงที่สมดุลจะเป็นค่าเดียวกันกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (การเกิดปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูจะยังคงดำเนินต่อไปได้แม้ว่าในวัฏภาคของสารละลายนำกลับจะมีความเข้มข้นของไอออนสารหนูมากกว่าในวัฏภาคของสารละลายป้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากในฝั่งของวัฏภาคสารละลายนำกลับมีความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าวัฏภาคสารละลายป้อน)

2.4.2 สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Cyanex 921

ไอออนสารหนูที่ศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อน (Feed phase) จะเข้าทำปฏิกิริยาการสกัดกับสารสกัด Cyanex 921 ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์หลังจากทำปฏิกิริยาการสกัดแล้วจะเกิดไอออนเชิงซ้อนขึ้นโดยจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบไปข้างหน้าจนกระทั่งเข้าสู่ค่าสมดุลของปฏิกิริยา ซึ่งสมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Cyanex 921 สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.9 (40) ดังนี้



สมการการหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา

$$K_{ex} = \frac{[(H_3AsO_3H \ TOPO)]}{[H_3AsO_3][H^+][TOPO]} \quad (2.10)$$

ขณะที่ที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคสารละลายนำกลับและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์จะมีปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นเนื่องด้วยแรงผลักดันจากไฮโดรเนียมไอออนการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุลซึ่งค่าคงที่สมดุลจะเป็นค่าเดียวกันกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (การเกิดปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูจะยังคงดำเนินต่อไปได้แม้ว่าในวัฏภาคของสารละลายนำกลับจะมีความเข้มข้นของไอออนสารหนูมากกว่าในวัฏภาคของสารละลายป้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากในฝั่งของวัฏภาคสารละลายนำกลับมีความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าวัฏภาคสารละลายป้อน

2.4.3 สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Cyanex 923

ไอออนสารหนูที่ศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อน(Feed phase) โดยจะเข้าทำปฏิกิริยาการสกัดกับสารสกัด Cyanex 923 ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์หลังจากทำปฏิกิริยาการสกัดแล้วจะเกิด

ไอออนเชิงซ้อนขึ้นโดยจะเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบไปข้างหน้าจนกระทั่งเข้าสู่ค่าสมดุลของปฏิกิริยา ซึ่งสมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Cyanex 923 สามารถเขียนได้ดังสมการ 2.11 (40) ดังนี้



สมการการหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา

$$K_{\text{ex}} = \frac{[\overline{\text{HAsO}_2 \cdot \text{H}^+ \cdot \text{TRPO}}]}{[\text{HAsO}_2][\text{H}^+][\overline{\text{TRPO}}]} \quad (2.12)$$

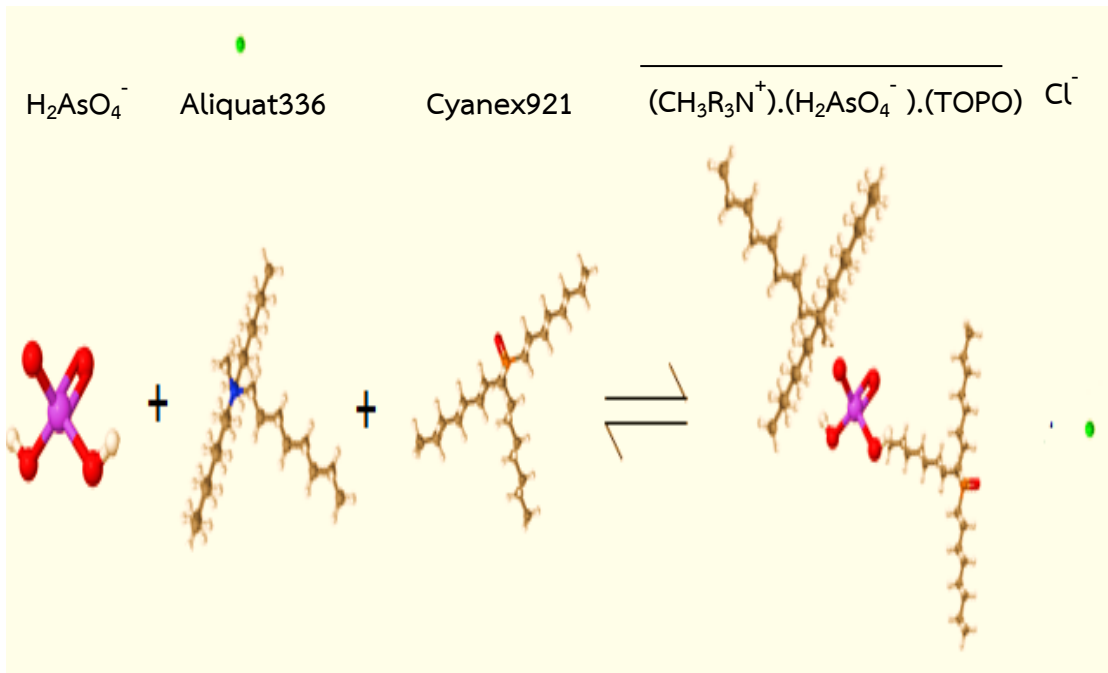
ขณะที่ที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคสารละลายนำกลับและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์จะมีปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นเนื่องด้วยแรงผลักดันจากไฮโดรเนียมไอออนการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุลซึ่งค่าคงที่สมดุลจะเป็นค่าเดียวกันกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (การเกิดปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูจะยังคงดำเนินต่อไปได้แม้ว่าในวัฏภาคของสารละลายนำกลับจะมีความเข้มข้นของไอออนสารหนูมากกว่าในวัฏภาคของสารละลายป้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากในฝั่งของวัฏภาคสารละลายนำกลับมีความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าวัฏภาคสารละลายป้อน)

2.4.4 สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Aliquat 336 ร่วมกับ Cyanex 921

ไอออนของสารหนูที่ละลายในวัฏจักรสารป้อนนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัด Aliquat 336 ที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์โดยในขั้นนี้จะเกิดไอออนเชิงซ้อนขึ้นหลังจากที่ไอออนของสารหนูทำปฏิกิริยากับ Aliquat 336 เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนต่อมาก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัด Cyanex 921 ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนซึ่งสมการของการเกิดปฏิกิริยาการสกัดทั้งหมดสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.13 (40)



โดยรูป 2.7 (41) จะแสดงโครงสร้างของโมเลกุล $H_2AsO_4^-$ ในขณะที่ทำปฏิกิริยาการสกัดด้วยสารสกัด Aliquat 336 และ Cyanex 921 แล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $(CH_3R_3N^+).(H_2AsO_4^-).(TOPO)$



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของโมเลกุล $H_2AsO_4^-$ ในขณะที่ทำปฏิกิริยาการสกัดด้วยสารสกัด Aliquat336 และ Cyanex 921

สมการการหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา

$$K_{ex,As} = \frac{[(CH_3R_3N^+).(H_2AsO_4^-).(TOPO)][Cl^-]}{[H_2AsO_4^-][CH_3R_3N^+Cl^-][TOPO]} \quad (2.14)$$

ขณะที่ที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคสารละลายนำกลับและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์จะมีปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นเนื่องด้วยแรงผลักดันจากไฮโดรเนียมไอออนการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุลซึ่งค่าคงที่สมดุลจะเป็นค่าเดียวกันกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (การเกิดปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูจะยังคงดำเนินต่อไปได้ แม้ว่าในวัฏภาคของสารละลายนำกลับจะมีความเข้มข้นของไอออนสารหนูมากกว่าในวัฏภาคของสารละลายป้อน

ทั้งนี้เนื่องจากในฝั่งของวัฏภาคสารละลายนำกลับมีความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าวัฏภาคสารละลายป้อน)

2.4.5 สมการการสกัดไอออนสารหนูด้วยสารสกัด Aliquat 336 ร่วมกับ Cyanex 923

ไอออนของสารหนูที่ละลายในวัฏจักรสารป้อนนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัด Aliquat 336 ที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ โดยในขั้นนี้ก็จะเกิดไอออนเชิงซ้อนขึ้นหลังจากที่ไอออนของสารหนูทำปฏิกิริยากับ Aliquat 336 เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนต่อมาก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัด Cyanex 923 ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนซึ่งสมการของการเกิดปฏิกิริยาการสกัดทั้งหมดสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.15 (40)



สมการการหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา

$$K_{ex} = \frac{[(\overline{CH_3R_3N^+})(\overline{H_2AsO_4^-})(\overline{TRPO})_m]}{[\overline{H_2AsO_4^-}][\overline{CH_3R_3N^+}][\overline{TOPO}]^m} \quad (2.16)$$

ขณะที่ที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคสารละลายนำกลับและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์จะมีปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นเนื่องด้วยแรงผลักดันจากไฮโดรเนียมไอออนการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุลซึ่งค่าคงที่สมดุลจะเป็นค่าเดียวกับกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า

2.5 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction)

การสกัดด้วยสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์หมายถึงการแยกไอออนของโลหะด้วยการรวมตัวกันของสารสกัดมากกว่าสองชนิดขึ้นไปโดยผลของการสกัดที่ได้จะมากกว่าผลรวมของการใช้สารสกัดแต่ละชนิดนั้นแยกกันดัชนีชี้วัดค่าการสกัดไอออนโลหะแบบเสริมฤทธิ์นั้นได้ถูกพัฒนาขึ้น

โดย Duyckaerts และคณะ (42) ถึงสัมประสิทธิ์การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic coefficient, S.C.) โดยที่ค่าสัมประสัมพันธ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.17

$$S.C. = \log [D_{(a, b)} / (D_{(a)} + D_{(b)})] \quad (2.17)$$

เมื่อ

$D_{(a)}$ คือ อัตราส่วนของการกระจายตัวของไอออนโลหะเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่ a

$D_{(b)}$ คือ อัตราส่วนของการกระจายตัวของไอออนโลหะเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่ b

$D_{(a, b)}$ คือ อัตราส่วนของการกระจายตัวของไอออนโลหะเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่ a และ b

อัตราส่วนของการกระจายตัวของไอออนโลหะ (Distribution ratio) สามารถคำนวณได้จากปริมาณของไอออนโลหะที่มีอยู่ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ต่อปริมาณของไอออนโลหะที่มีอยู่ในวัฏภาคของสารละลายป้อน ซึ่งหาก ค่าสัมประสิทธิ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (S.C.) มีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าในระบบนั้นมีการสกัดแยกแบบเสริมฤทธิ์ในขณะเดียวกันหากค่าสัมประสิทธิ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (S.C.) ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าศูนย์หมายถึงว่าการสกัดไอออนโลหะด้วยการรวมตัวกันของสารสกัดนั้นๆไม่ได้ส่งผลต่อการสกัดแบบเสริมฤทธิ์การรวมกันของสารสกัดเพื่อทำให้เกิดปรากฏการณ์การสกัดแบบเสริมฤทธิ์นั้นหลักการเลือกสารสกัดจะต้องมีสารสกัดตัวหนึ่งที่มีบทบาทเป็นสารสกัดหลักในปฏิกิริยาและสารสกัดตัวที่เหลือจะมีบทบาทเพื่อทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกับไอออนโลหะเพื่อช่วยให้เกิดการเสริมฤทธิ์ของการสกัดซึ่งสารตัวนี้จะต้องมีคุณสมบัติเป็นสารที่ไม่สามารถแตกตัวเพื่อให้โปรตอนกับไอออนโลหะได้แต่ฟังก์ชันหลักๆคือจะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเพื่อทำปฏิกิริยากับสารหลักในการเกิดปฏิกิริยาการสกัดตัวอย่างของสารสกัดชนิดนี้ได้แก่สารสกัดประเภทของ Cyanex 921 เป็นต้นโดยการเกิดปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะแบบเสริมฤทธิ์ของสารสกัดสามารถเขียนได้ตามสมการ 2.18



ค่าคงที่ของปฏิกิริยาดังสมการ 2.19

$$K_{ex,1} = \frac{[MR_n][H^+]^n}{[M^{n+}][HR]^n} \quad (2.19)$$

ในสมการ 2.18 แสดงถึงสมการของปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะซึ่งใช้สารสกัดชนิดกรดมาเป็นสารสกัดหลัก ค่า $K_{ex,1}$ ที่ปรากฏในสมการที่ 2.19 เป็นค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดของสารสกัดหลักซึ่งสารสกัดจะเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการสกัดเสริมฤทธิ์นั้น สารสกัดชนิดรองจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักก่อนแล้วจึงเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่ละลายอยู่ในสารละลายป้อนแล้วเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนชนิดใหม่ดัง (MR_nS_x) ในสมการ 2.20 ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการสกัดในลักษณะนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกไอออนโลหะออกจากสารละลายป้อนได้สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันสารสกัดชนิดรองยังมีโอกาสที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะโดยตรงโดยไม่ต้องผ่านการเข้าทำปฏิกิริยากับสารสกัดอื่น ๆ ก่อนได้สมการการสกัดด้วยสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2.20 และ 2.21



การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.23 และ 2.24

$$K_{ex,1+2} = \frac{[MR_nS_x][H^+]^n}{[M^{n+}][HR]^n[S]^x} \quad (2.22)$$

$$K_{ex,2} = \frac{[MX_nS_p]}{[M^{n+}][X^-]^n[S]^p} \quad (2.23)$$

เมื่อ $K_{ex,1+2}$ หมายถึง ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ และ $K_{ex,2}$ หมายถึงค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดของสารสกัดรองการคำนวณอัตราส่วนการกระจายตัวของไอออนโลหะสามารถคำนวณได้ตามสมการ 2.25, 2.26 และ 2.27

$$D_{(1)} = \frac{[MR_n]}{[M^{n+}]} = \frac{K_{ex,1}[HR]^n}{[H^+]^n} \quad (2.24)$$

$$D_{(2)} = \frac{[MX_nS_p]}{[M^{n+}]} = K_{ex,2}[X^-]^n[S]^p \quad (2.25)$$

$$D_{(1+2)} = D_{(1)} + D_{(2)} + \frac{[MR_nS_x]}{[M^{n+}]} \quad (2.26)$$

$$D_{(1)} = \frac{[MR_n]}{[M^{n+}]} = \frac{k_{ex,1}[HR]^n}{[H^+]} \quad (2.27)$$

เพราะฉะนั้น

$$D_{(1+2)} = \frac{K_{ex,1}[HR]^n}{[H^+]^n} + K_{ex,2}[X^-]^n[S]^p + K_{ex,1+2} \cdot \frac{[HR]^n[S]^x}{[H^+]^n} \quad (2.28)$$

แทนค่าในสมการการ 2.29 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ดังสมการ 2.30

$$S.C = \log \left[\frac{\frac{K_{ex,1}[HR]^n}{[H^+]^n} + K_{ex,2}[X^-]^n[S]^p + K_{ex,1+2} \cdot \frac{[HR]^n[S]^x}{[H^+]^n}}{\frac{K_{ex,1}[HR]^n}{[H^+]^n} + K_{ex,2}[X^-]^n[S]^p}} \right] \quad (2.29)$$

จากที่สารสกัดรองมีการรวมตัวกับไอออนโลหะบวกน้อยมาก จึงกำหนดให้ค่า $K_{ex,2}$ มีค่าน้อยมาก
ประมาณ ศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ 2.29 แทนค่า $K_{ex,2}$ เท่ากับศูนย์จะได้

$$S.C. = \log \left[1 + \frac{K_{ex,1+2}[S]^x}{K_{ex,1}} \right] \quad (2.30)$$

$$S.C. = \log[1 + \beta_{n,x}[S]^x] \quad (2.31)$$

เมื่อ

$$\beta_{n,x} = \frac{K_{ex,1+2}}{K_{ex,1}} \quad (2.32)$$

เมื่อ $\beta_{n,x}$ เป็นค่าคงที่ของความเสถียรในปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ หรือ $\beta_{n,x}$ เท่ากับอัตราส่วนของค่าคงที่ปฏิกิริยาการสกัดชนิดที่ใช้สารสกัดตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปต่อค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดของสารสกัดหลักเพราะฉะนั้นค่า $\beta_{n,x}$ ที่มีมากแสดงว่าในปฏิกิริยาการสกัดนั้นเป็นแบบเสริมฤทธิ์มาก

2.6 การคำนวณร้อยละการสกัด และร้อยละการนำกลับ

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของการสกัด} = \frac{C_{f,in} - C_{f,out}}{C_{f,in}} \times 100 \quad (2.33)$$

$$\text{ร้อยละของการนำกลับ} = \frac{C_{s,out}}{C_{f,in}} \times 100 \quad (2.34)$$

เมื่อ

$C_{f,in}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนฝั่งขาเข้า (หน่วย ppb)

$C_{f,out}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนฝั่งขาออก (หน่วย ppb)

$C_{s,out}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายนำกลับฝั่งขาออก (หน่วย ppb)

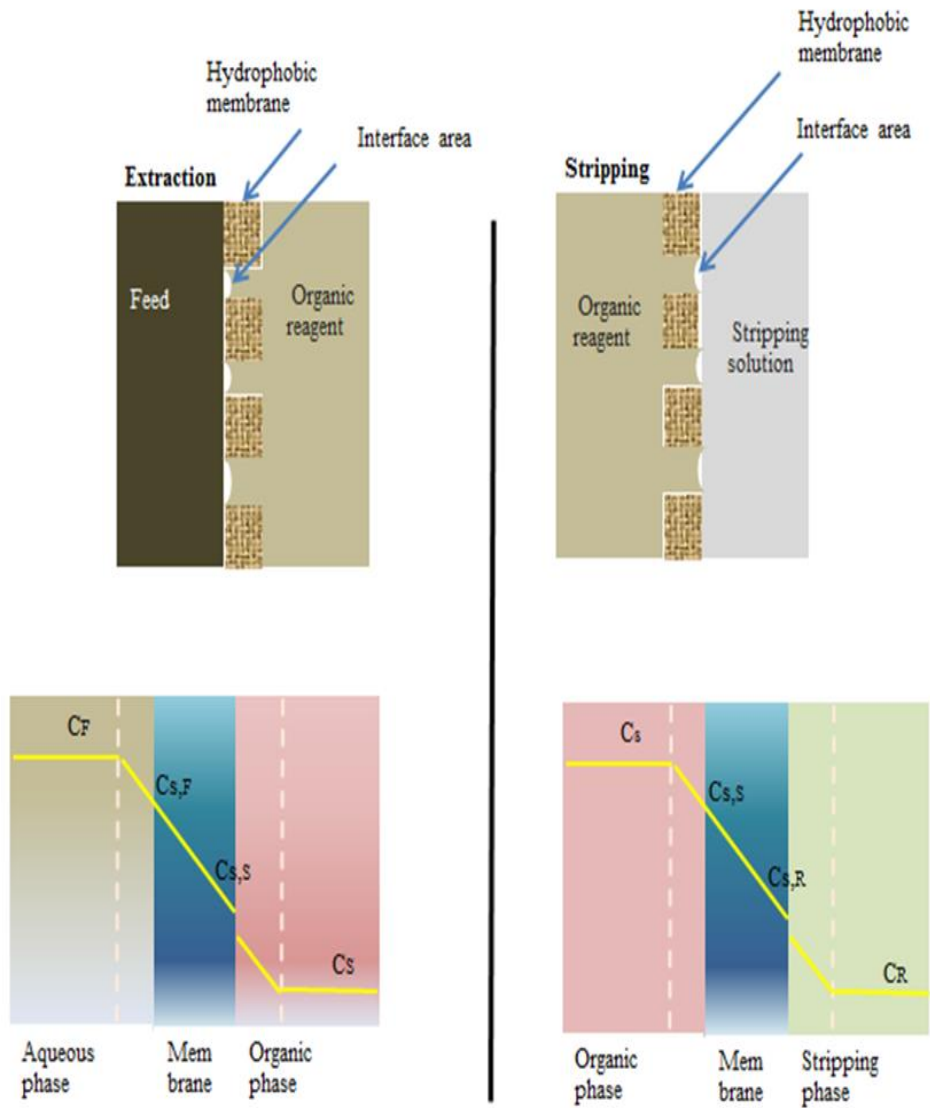
2.7 กลไกการสกัดด้วยเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์

ในระบบการสกัดหรือแยกไอออนโลหะด้วยระบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์ (Hollow fiber membrane contactors, HFCs) นั้นจะประกอบไปด้วย 2 วัสดุคือวัสดุที่เป็นสารป้อนและวัสดุที่เป็นสารสกัดหรือสารทำละลายโดยระหว่างทั้งสองวัสดุนี้จะมีเส้นใยที่ทำจากเยื่อที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากมายมาเป็นตัวกั้นและชนิดของเส้นใยที่นำมาเป็นเยื่อกั้นมี 2 ชนิดคือ

แบบที่ชอบน้ำ (Hydrophilic)

แบบที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)

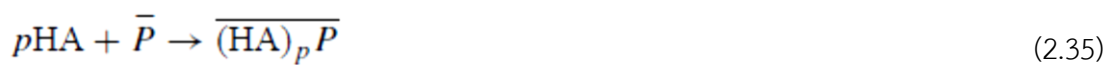
สำหรับกลไกปฏิกิริยาการสกัดนั้นจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่จุดผิวสัมผัส (Interface) ของวัสดุ ในกรณีระบบใช้เยื่อที่มีรูพรุนเป็นแบบชอบน้ำ (Hydrophilic) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่จุดสัมผัสด้านสารสกัดแต่สำหรับเยื่อที่มีรูพรุนเป็นแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ปฏิกิริยาการสกัดจะเกิดขึ้นจุดสัมผัสด้านที่เป็นสารละลายป้อนการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะจากวัสดุของสารป้อนไปยังวัสดุของสารสกัดนั้นจะอาศัยหลักการการถ่ายเทมวล (43, 44)



รูปที่ 2.8 การถ่ายเทมวลในระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์ (18)

2.7.1 กลไกการถ่ายเทมวล

สำหรับกลไกการถ่ายมมวลแบบควบคู่ของไอออนโลหะ (HA) และสารสกัด (P) ดังแสดงในรูปที่ 2.3. (43-45) สมดุลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อพอรุนกับวัฏภาคสารละลายป้อนคือ



โดยที่เครื่องหมาย “-” แทนวัฏภาคของสารอินทรีย์(Organic Phase) การเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปในทิศทางใดขึ้นอยู่กับสถานะของระบบและกลไกในการถ่ายเทมวลของโลหะผ่านเยื่อรูพรุนสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 ไอออนโลหะที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคของสารสกัดที่เข้ามาอยู่ภายในรูพรุน

ขั้นที่ 2 ไอออนโลหะจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดได้สารประกอบเชิงซ้อนของ $(HA)_pP$ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับระหว่างวัฏภาคสารสกัด (ผิวสัมผัส RF ในรูปที่ 2.3.1)



ขั้นที่ 3 สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ซึมผ่านวัฏภาคของสารสกัดที่อยู่ภายในรูพรุน(S_w) เนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับเคลื่อนไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อรูพรุนกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ

ขั้นที่ 4 สารประกอบเชิงซ้อน $(HA)_pP$ จะแพร่ไปที่วัฏภาคของสารสกัด

2.7.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบการแพร่ (Diffusion flux model) และแบบปฏิกิริยา (Reaction flux model) กับการแยกไอออนสารหนูผ่านระบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์

ในการศึกษาการสกัดไอออนสารหนูนั้นได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งแบบการแพร่ (Diffusion flux model) และแบบปฏิกิริยา (Reaction flux model) มาใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นของไอออนสารหนูที่เวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงเพื่อหาว่าการสกัดไอออนสารหนูที่ผ่านระบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์นั้นมีปรากฏการณ์การที่ควบคุมอัตราการสกัดไอออนสารหนูเป็นไปตามแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบใดโดยที่สมมุติฐานของการทดลองเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์เป็นดังนี้

- 1 เป็นการดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิ (Isothermal) และความดันคงที่
- 2 ปฏิกิริยาการสกัดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งบริเวณผิวสัมผัสระหว่างฝั่งของสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวเท่านั้น

- 3 เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีค่าน้อยมากเพราะฉะนั้นผลต่างของความเข้มข้นของไอออนสารหนูตามแนวรัศมีจะไม่เปลี่ยนแปลงท่อแต่จะเปลี่ยนแปลงตามแนวแกนท่อ
- 4 ที่วิภาคของสารละลายอินทรีย์จะมีเพียงสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนสารหนูกับสารสกัดเท่านั้น

โดยแบบจำลองแบบการแพร่ (Diffusion flux model) ที่สามารถนำมาคำนวณหาความเข้มข้นของไอออนสารหนูที่เวลาต่างๆตามสมการที่ 2.37 (46)

$$[As^{5+}]_f = -Rf \frac{[CH_3R_3N^+ \cdot TOPO]}{Rm} + \left[[As^{5+}]_{fo} + \frac{Rf[CH_3R_3N^+ \cdot TOPO]}{Rm} \right] \exp\left[\frac{-A}{2RfRmV_f} t \right] \quad (2.37)$$

แบบจำลองแบบปฏิกิริยา (Reaction flux model) (47, 48) ตามสมการ 2.38 ใช้สำหรับปฏิกิริยาของการสกัดอันดับที่ 0 (n=0)

$$\bar{C}_A(L, t) = \bar{C}_A(0, t - \tau_0) + k_f(t - \tau) - k_f t \quad (2.38)$$

และแบบจำลองแบบปฏิกิริยา (Reaction flux model) ตามสมการ 2.39 จะใช้สำหรับปฏิกิริยาของการสกัดอันดับที่ 1 (n=1) ที่เวลาเริ่มต้น (t=0)

$$C_A(L, 0) = CA(0,0) \exp\left(\frac{K_f A c L}{Q}\right) \quad (2.39)$$

สำหรับที่เวลาใดๆ (t≠0)

$$\bar{C}_A(L, t) = e^{\alpha} \bar{C}_A(0, t - \tau_0) \quad (2.40)$$

$$\text{เมื่อ } \alpha = \frac{k_f A_c L}{Q} \quad (2.41)$$

สมการ 2.41 และ 2.42 สำหรับปฏิกิริยาการสกัดที่มีอันดับปฏิกิริยาการสกัด $n \neq 0$ และ 1

$$\bar{C}_A(L, t) = e^\beta \bar{C}_A(0, t - \tau_0) \quad (2.42)$$

เมื่อ

$$\beta = \frac{k_f A_c n}{Q \gamma} \ln \frac{\gamma L + \lambda}{\lambda} \quad (2.43)$$



บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีทดลอง

ในบทนี้จะอธิบายถึงสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองรวมถึงขั้นตอนในการทดลองต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนสารหนูด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

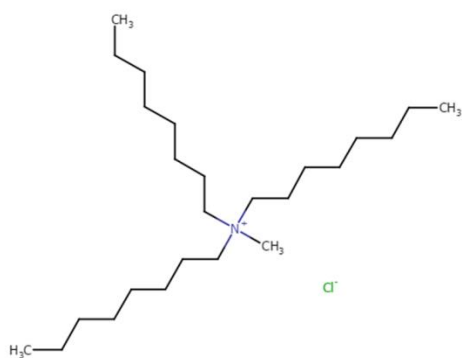
สารเคมีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ว่าจะเป็นสารละลายป้อน สารสกัด ตัวทำละลาย อินทรีย์ สารละลายนำกลับ ตัวทำละลาย นั้นมีหน้าที่ที่แตกต่างกันรวมถึงแหล่งที่มาของสารเหล่านี้ก็มาจากแหล่งที่แตกต่างกันดังสรุปไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีและแหล่งที่มา

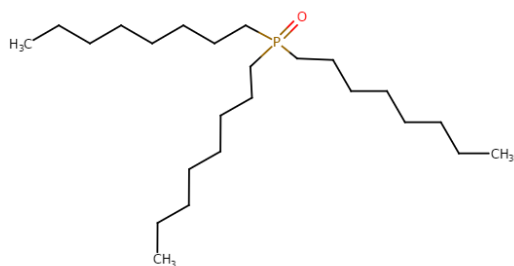
ชนิด	ชื่อสารเคมี	แหล่งที่มา
สารละลายป้อน	น้ำจากกระบวนการผลิตน้ำมัน	PTT (public) co.,Ltd
	Aliquat 336 ($\text{CH}_3\text{R}_3\text{N}^+\text{Cl}^-$)	Merck .Ltd
สารสกัด	Cyanex 921 ($\text{C}_{24}\text{H}_{51}\text{PO}$)	Cytec Canada
	Cyanex 923 ($\text{C}_{24}\text{H}_{51}\text{PO}$)	Cytec Canada
ตัวทำละลายอินทรีย์	Kerosene ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$)	Merck .Ltd.
สารละลายนำกลับ	Triourea (NH_2CSNH_2)	Merck .Ltd.
	Sulphuric acid (H_2SO_4)	Merck .Ltd.
ตัวทำละลาย	Hydrochloric acid (HCl)	Merck .Ltd.
	Nitric acid (HNO_3)	Merck .Ltd.

โครงสร้างของสารสกัด

a) Aliquat 336 (Methyl trioctylammonium chloride)

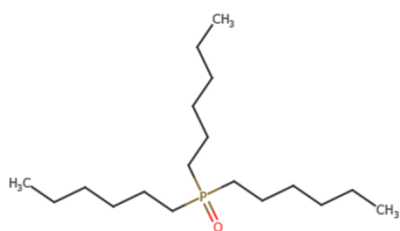


b) Cyanex 921 (Trioctylphosphine oxide, TOPO)



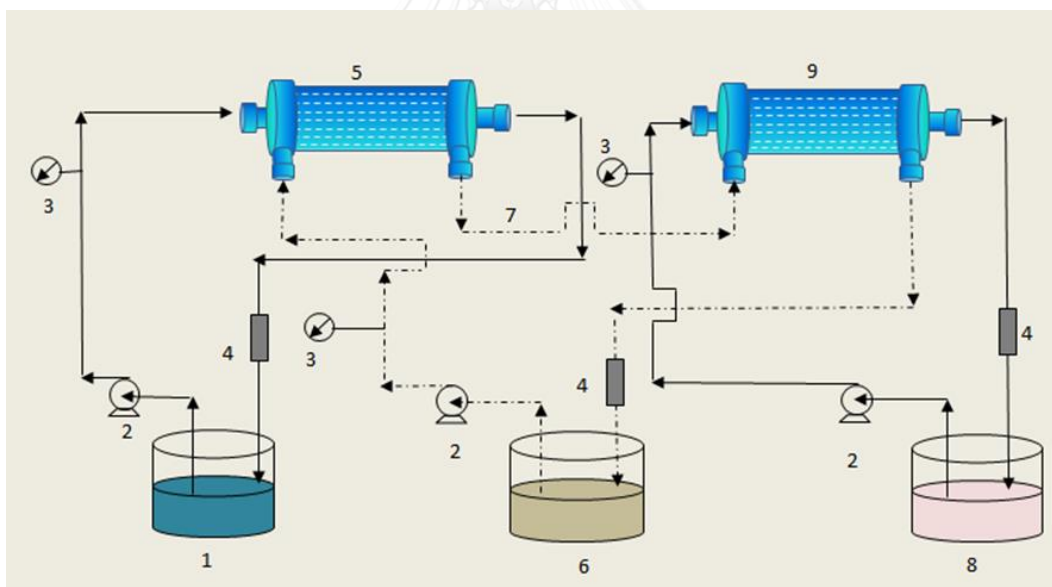
c) Cyanex 923 (Mixture of tertiary octyl and hexyl phosphine oxide)

เมื่อ R' คือ ส่วนผสมของ C₈H₁₇ และ C₆H₁₃



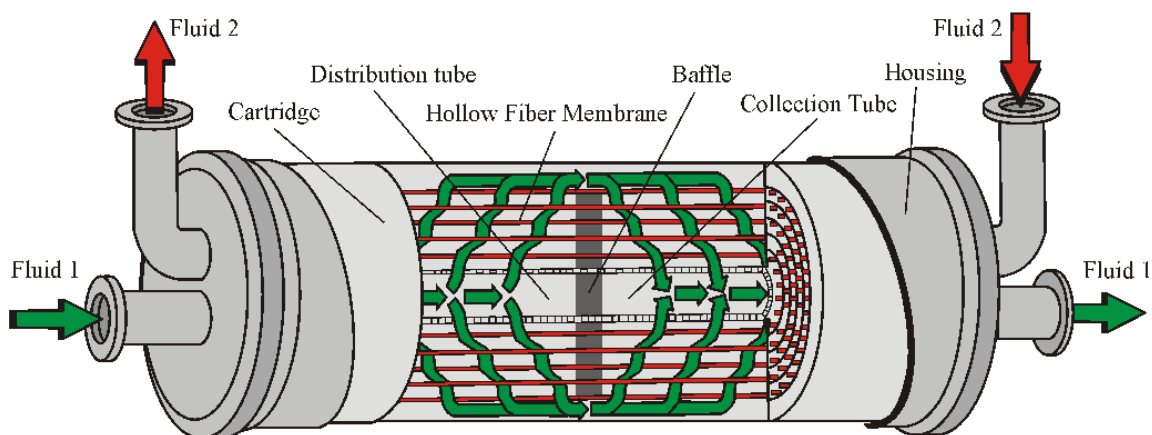
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1 ชุดทดลอง Liqui-Cel[®]Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat #5 PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ซึ่งประกอบด้วย ปัมป์ชุดควบคุมอัตราการไหล มาตรฐานอัตราการไหล และมาตรฐานความดัน อย่างละ 2 ชุด เพื่อวัดในด้านฝั่งท่อ และฝั่งเปลือกดังแสดงในรูปที่ 3.1
- 2 มอดูลเส้นใยกลวงของ Celgard[®]X-30 240 microporous polypropylene hollow fiber ดังรูปที่ 3.4 ลักษณะเฉพาะแสดงดังตารางที่ 3.2
- 3 วิเคราะห์ความเข้มข้นไอออนสารหนูด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer, ICP-AES
- 4 เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก อุปกรณ์วัดค่า pH ปีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ปิเปต กรวยแยก และแท่งแก้วคนสารเป็นต้น



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ Liqui-Cel[®] Laboratory ที่ใช้ในการทดลองแบบ

- (1) ถังของสารละลายป้อน; (2) ปัมป์ ; (3) มาตรฐานความดัน; (4) มาตรฐานอัตราการไหล
 (5) คอนแทคเตอร์มอดูลที่ 1 สำหรับสกัด (6) ถังของสารละลายอินทรีย์; (7) ท่อของสารละลายอินทรีย์ที่ออกจากมอดูลที่ 1 ต่อเข้ากับ มอดูลที่ 2 ; (8) ถังของสารละลายน้ำกลับ; (9) คอนแทคเตอร์มอดูลที่ 2 (สำหรับสารละลายน้ำกลับ)



รูปที่ 3.2 มอดูลเส้นใยกลวง (43)

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะของมอดูลเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดลอง

ลักษณะ	วัสดุ/ค่า
วัสดุที่ใช้ผลิตเส้นใยกลวง	พอลิโพรพิลีน
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	240 μm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	300 μm
ปริมาณรูพรุน	30 %
ความคดเคี้ยว (Tortuosity)	2.6
ผลต่างแรงดันสูงสุด	4.2 kg/cm^2 (60 psi)
พื้นที่ผิว	1.4 m^2 (15.2 ft^2)
พื้นที่ผิวต่อปริมาตร	29.3 $\text{cm}^2 / \text{cm}^3$
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	1 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 60 $^{\circ}\text{C}$
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดเส้นใยกลวง	6.3 cm
ความยาวของชุดเส้นใยกลวง	20.3 cm
ปริมาณเส้นใยกลวงทั้งหมด	35,000 เส้น

3.3 วิธีการทดลอง

ทำการศึกษามลของตัวแปรต่างๆต่อการสกัดสารหนูด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูล ดังนี้

3.3.1 ศึกษาผลของชนิดของสารสกัด

- 1.. เตรียมสารละลายอินทรีย์ ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรโดยเตรียม Aliquat 336 0.5 โมล (ในซีโรซีน) Cyanex 921 0.5 โมล (ในซีโรซีน) และ Cyanex 923 (ในซีโรซีน)
- 2.. เตรียมสารละลายป้อนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปริมาตร 1000 มิลลิลิตร การปรับค่าความเป็นกรด เบสเท่ากับ 5 แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (สนใจไอออนของสารหนู)
- 3.. เตรียมสารละลายนำกลับ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.1 โมล (ในน้ำ DI) ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- 4.. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 5 ตามรูปในทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน และป้อนสารละลายนำกลับเข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 9 ตามรูป 3.1) ทิศทางการไหลสวนทางกันกับสารละลายอินทรีย์ที่ป้อนมาจากมอดูลหมายเลข 5 โดยอัตราการไหลเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองกำหนดการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง
5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เวลา 120 นาทีนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนสารหนู โดยเครื่อง ICP-AES
6. ทำการเปลี่ยนสารละลายอินทรีย์เป็นของ Cyanex 921 และ Cyanex 923 ตามลำดับ โดยแต่ละชนิดของสารอินทรีย์ให้ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-5 เพื่อหาชนิดของสารสกัดที่เหมาะสมกับการสกัดไอออนสารหนู

3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน

- 1.. เตรียมสารละลายอินทรีย์โดยใช้ Aliquat 336 0.3 โมล รวมกับ Cyanex 0.3 โมล (ในซีโรซีน) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายป้อนความเข้มข้นของไอออนสารหนูเท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 6
3. เตรียมสารละลายนำกลับไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.1 โมล (ในน้ำ DI) ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 5 ตามรูป 3.1) ในทิศทางไหลแบบสวนทางกัน และป้อนสารละลายนำกลับเข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 9 ตามรูป 3.1) ทิศทางการไหลสวนทางกันกับสารละลายอินทรีย์ที่ป้อนมาจากมอดูลหมายเลข 5 โดยปรับอัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองกำหนดการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง
- 5.. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เวลา 120 นาทีนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนสารหนู โดยเครื่อง ICP-AES
- 6.. เปลี่ยนความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเป็น 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-5 เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเหมาะสมกับระบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูล ในการสกัดไอออนสารหนู

3.3.3 ศึกษาผลของความเป็น กรด ต่าง (pH) ในสารละลายป้อน

1. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรปรับความเป็นกรด เบส (pH) เท่ากับ 1
2. เตรียมสารละลายอินทรีย์ ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรโดยเตรียม Aliquat 336 0.5 โมล (ในซีโรซีน)
3. เตรียมสารละลายนำกลับไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.1 โมล (ในน้ำ DI) ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 5 ตามรูป 3.1) ในทิศทางไหลแบบสวนทางกัน และป้อนสารละลายนำกลับเข้ามอดูล

(อุปกรณ์หมายเลข 9 ตามรูป 3.1) ทิศทางการไหลสวนทางกันกับสารละลายอินทรีย์ที่ป้อนมาจากมอดูลหมายเลข 5 โดยปรับอัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองกำหนดการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง

5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เวลา 120 นาทีนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนสารหนู โดยเครื่อง ICP-AES
6. เตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยปรับความเป็นกรดเบส (pH) เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 ตามลำดับ แล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2-5

3.3.4 ศึกษาผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์โดยใช้เตรียม Cyanex 921 0.04 โมล และ Aliquat 336 0.1 โมล (ในซีโรซีน) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายป้อนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปริมาตร 1000 มิลลิลิตรทำการปรับค่าความเป็นกรด เบสให้ได้เท่ากับ 6 แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (สนใจไอออนของสารหนู)
3. เตรียมสารละลายนำกลับไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.1 โมล (ในน้ำ DI) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 5 ตามรูป 3.1) ในทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน และป้อนสารละลายนำกลับเข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 9 ตามรูป 3.1) ทิศทางการไหลสวนทางกันกับสารละลายอินทรีย์ที่ป้อนมาจากมอดูลหมายเลข 5 โดยปรับอัตราการไหลเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และกำหนดการทดลองให้เป็นการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง
5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เวลา 120 นาทีไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนสารหนู โดยเครื่อง ICP-AES
6. ทำซ้ำข้อ 1 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของ Aliquat 336 เป็น 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 โมล ตามลำดับ จากนั้นทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2-5
7. เตรียมสารละลายอินทรีย์โดยใช้เตรียม Cyanex 923 0.04 โมล และ Aliquat 336 0.1 โมล (ในซีโรซีน) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

8. เตรียมสารละลายป้อนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ลิตร ทำการปรับค่าความเป็นกรด เบสให้ได้เท่ากับ 6 แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายป้อน ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (สนใจไอออนของสารหนู)
9. เตรียมสารละลายนำกลับ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.1 โมล (ในน้ำ DI) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
10. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 5ตามรูป 3.1) ในทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน และป้อนสารละลายนำกลับเข้ามอดูล (อุปกรณ์ หมายเลข 9 ตามรูป 3.1) ทิศทางการไหลสวนทางกันกับสารละลายอินทรีย์ ที่ป้อนมาจากมอดูลหมายเลข 5 โดยอัตราการไหลเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองกำหนดการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง
11. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นเวลา 120 นาทีนำไป วิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนสารหนู โดยเครื่อง ICP-AES ทำซ้ำข้อ 7 โดยเปลี่ยน ความเข้มข้นของ Aliquat 336 เป็น 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 โมล ตามลำดับจากนั้นทำการทดลองซ้ำตามข้อ 8-11

3.3.5 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์โดยใช้เตรียม Cyanex 921 0.04 โมล และ Aliquat 336 0.3 โมล (ในซีโรซีน) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายป้อนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าความเป็นกรด เบสให้ได้เท่ากับ 6 แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายป้อน ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (สนใจไอออนของสารหนู)
3. เตรียมสารละลายนำกลับ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.1 โมล (ในน้ำ DI) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 5 ตามรูป 3.1) ในทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน และป้อนสารละลายนำกลับเข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 9 ตามรูป 3.1) ทิศทางการไหลสวนทางกันกับสารละลายอินทรีย์ที่ ป้อนมาจากมอดูลหมายเลข 5 โดยปรับอัตราการไหลเท่ากับที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองกำหนดการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง

5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เวลา 120 นาที ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนสารหนู โดยเครื่อง ICP-AES
6. ทำซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในข้อ 4 เป็น 100, 150, 200, 250, 300, 350 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ

3.3.6 ศึกษาผลของเวลาการสกัดในเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์โดยใช้เตรียม Cyanex 921 0.04 โมล และ Aliquat 336 0.3 โมล (ในซีโรซีน) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายป้อนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าความเป็นกรด เบสให้ได้เท่ากับ 6 แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (สนใจไอออนของสารหนู)
3. เตรียมสารละลายนำกลับ ไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.1 โมล (ในน้ำ DI) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 5 ตามรูป 3.1) ในทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน และป้อนสารละลายนำกลับเข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 9 ตามรูป 3.1) ทิศทางการไหลสวนทางกันกับสารละลายอินทรีย์ที่ป้อนมาจากมอดูลหมายเลข 5 โดยปรับอัตราการไหลเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองกำหนดการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง
5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 130, 140 และ 150 นาที ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนสารหนูโดยเครื่อง ICP-AES

3.3.7 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ

1. เตรียมสารละลายนำกลับไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.05 โมล (ในน้ำ DI) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายอินทรีย์โดยใช้เตรียม Cyanex 921 0.04 โมล และ Aliquat 336 0.3 โมล (ในซีโรซีน) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายป้อนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าความเป็นกรด เบสให้ได้เท่ากับ 6 แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (สนใจไอออนของสารหนู)
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์เข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 5 ตามรูป 3.1) ในทิศทางไหลแบบสวนทางกัน และป้อนสารละลายนำกลับเข้ามอดูล (อุปกรณ์หมายเลข 9 ตามรูป 3.1) ทิศทางการไหลสวนทางกันกับสารละลายอินทรีย์ที่ป้อนมาจากมอดูลหมายเลข 5 โดยปรับอัตราการไหลเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการทดลองกำหนดการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง
5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นเวลา 120 นาที ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนสารหนู โดยเครื่อง ICP-AES
6. ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของไทโอยูเรีย (ในน้ำ DI) เป็น 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45 และ 0.5 โมล ตามลำดับโดยทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไทโอยูเรียให้ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2-5

3.4 ขั้นตอนการทำความสะอาดมอดูลเส้นใยกลวงคอนแทคเตอร์

1. ใช้น้ำกลั่นป้อนเข้าไปไหลวนภายในมอดูลทั้งทางท่อและทางเปลือกเพื่อชะล้าง 15-20 นาที
2. ใช้ตัวสารละลายที่สามารถชะล้างการอุดตันและน้ำมันจากสารละลายอินทรีย์ป้อนเข้าไปไหลวนภายในมอดูลทั้งทางเปลือกและท่อ 15-20 นาที
3. ใช้น้ำกลั่นเข้าไปไหลวนภายในมอดูลทั้งทางท่อและทางเปลือกเพื่อชะล้าง 20-25 นาที
4. หากน้ำกลั่นที่ไหลออกมาจากมอดูลยังมีคราบสกปรกให้ทำซ้ำตามขั้นตอน 1-3
5. ไหลอากาศผ่านเข้าไปภายในเส้นใยกลวงภายในมอดูลเพื่อทำให้แห้ง

บทที่ 4

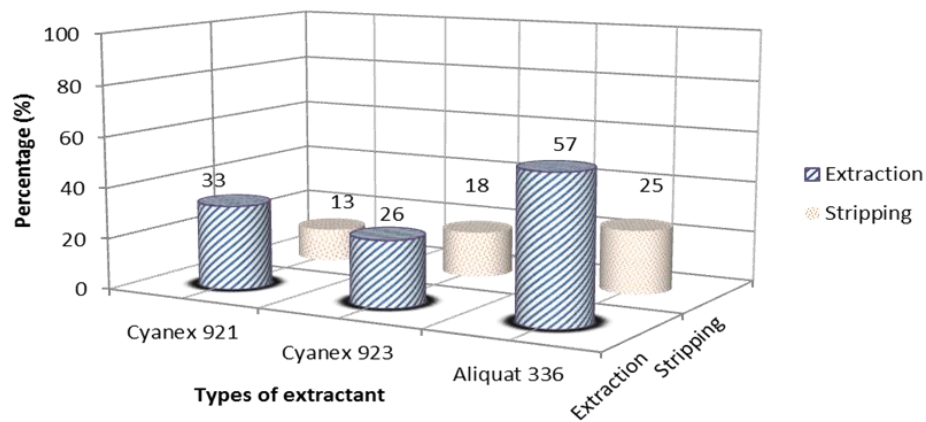
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

บทนี้จะนำเสนอผลของการศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่ออัตราการสกัดและการนำกลับสารหนูด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูลต่อกันได้แก่ ชนิดของสารสกัด Aliquat 336 Cyanex 921 และ Cyanex 923 ในตัวทำละลายโครซีน ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนระหว่างในช่วง 0.2 - 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน อัตราส่วนความเข้มข้นของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่อการสกัดสารหนูด้วยระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูล

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 อิทธิพลของชนิดของสารสกัดต่างชนิดกัน

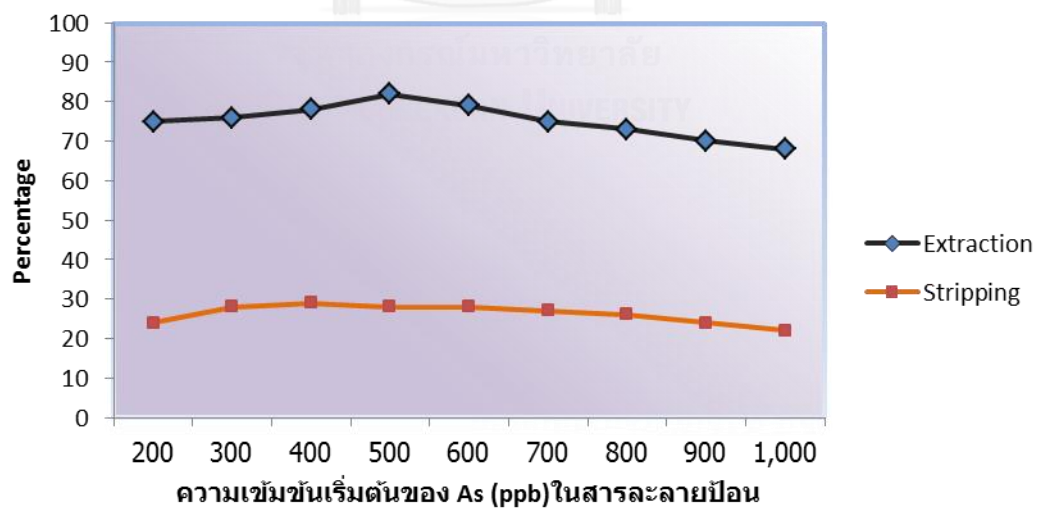
จากการทดลองเพื่อหาชนิดของสารสกัดที่สามารถสกัดไอออนสารหนูได้มากที่สุดพบว่าชนิดของสารสกัด Aliquat 336 มีเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนสารหนูได้มากกว่า Cyanex 921 และ Cyanex 923 ตามลำดับโดยผลของการทดลองได้นำเสนอตามรูปที่ 4.1 เนื่องจาก Aliquat 336 ซึ่งเป็นสารสกัดชนิดเบส จะสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับไอออนโลหะลบดังนั้นจึงให้ผลการสกัดที่สูงกว่าผลของการใช้ Cyanex 921 และ Cyanex 923 เนื่องจากในระบบของการสกัดนั้นได้ทำการปรับค่า pH ของสารละลายป้อนเท่ากับ 6 ซึ่งในสถานะนี้ไอออนสารหนูส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ต่าง ๆ ของ H_3AsO_3 , $H_2AsO_4^-$ และ $HAsO_4^{2-}$ ในขณะที่สารสกัด Aliquat 336 มีคุณสมบัติเป็นสารสกัดชนิดเบสและสามารถทำปฏิกิริยาการสกัดได้ดีกับสารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในรูปเหล่านี้ (5)



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบชนิดของสารสกัดกับผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนู

4.1.2 ผลของความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน ณ เวลาเริ่มต้น

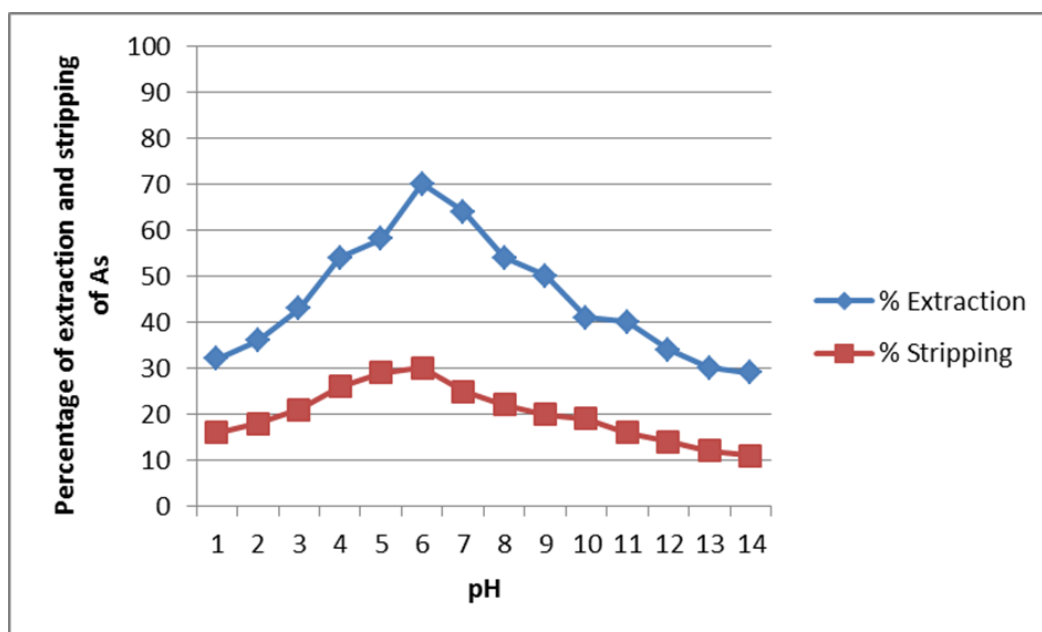
จากผลการทดลองที่แสดงตามรูป 4.2 แสดงให้เห็นว่าผลการสกัดไอออนสารหนูเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นและจะเริ่มมีผลการสกัดที่คงที่เมื่อความเข้มข้นของสารหนูสูงมากกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลลดลง (49)



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนูในสารละลายป้อน

4.1.3 ผลของความเป็นกรด เบส ของสารป้อนที่มีต่อการสกัด

การศึกษาผลของความเป็นกรดเบส ของสารละลายป้อนต่อผลการสกัดไอออนสารหนูพบว่า ที่สภาวะของความเป็นกรด เบส (pH) เท่ากับ 6 นั้นให้ผลการสกัดไอออนสารหนูได้สูงสุดเนื่องจาก ที่สภาวะนี้สารหนูจะอยู่ในรูปที่เป็นไอออนประจุลบซึ่งสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับ Aliquat 336 ที่เป็นสารสกัดชนิดเบส (11) ซึ่งผลที่แสดงตามรูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลองของการสกัดและนำกลับของไอออนสารหนูในสภาวะกรด เบสที่แตกต่างกัน

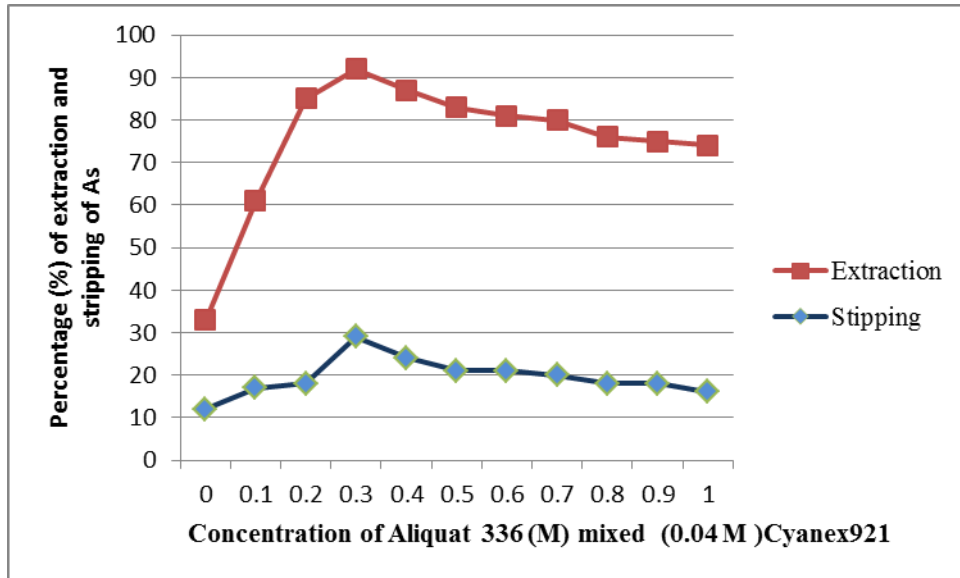


รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับค่าความเป็นกรด เบส ของสารละลายป้อน

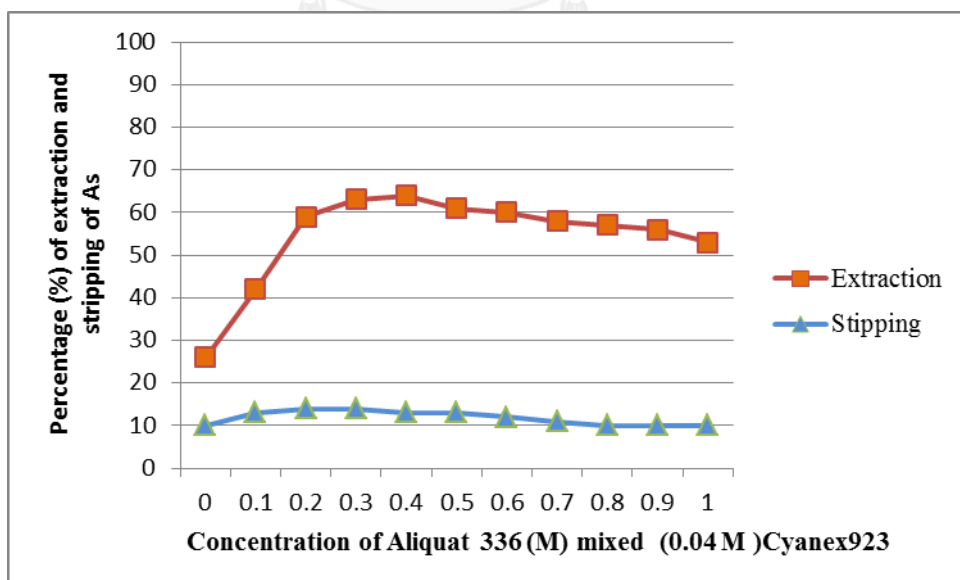
4.1.4 ผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่มีต่อการสกัด

การทดลองผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ระหว่างสารสกัด Aliquat 336 กับ Cyanex 921 และ Aliquat 336 กับ Cyanex 923 ได้แสดงผลการทดลองดังรูป 4.2 และ 4.3 โดยพบว่าผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ระหว่าง Aliquat 336 และ Cyanex 921 ให้ผลการสกัดไอออนของสารหนูได้สูงสุดเท่ากับ 92 % ซึ่ง (50) อธิบายปรากฏการณ์นี้อาไว้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด

ขึ้นไปจะทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ลดลง ดังนั้นการถ่ายเทมวลภายในระบบเส้นใยกลวงนั้นจึงลดลง



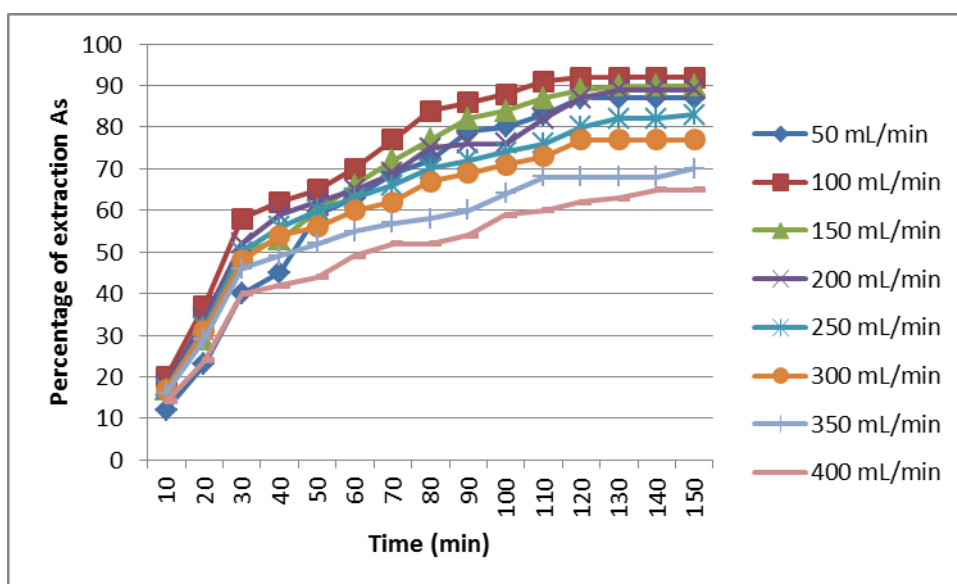
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับอัตราส่วนของ Aliquat 336 ผสม กับ Cyanex 921 ในสารละลายอินทรีย์



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับอัตราส่วนของ Aliquat 336 ผสม กับ Cyanex 923 ในสารละลายอินทรีย์

4.1.5 ผลของการแปรอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัด

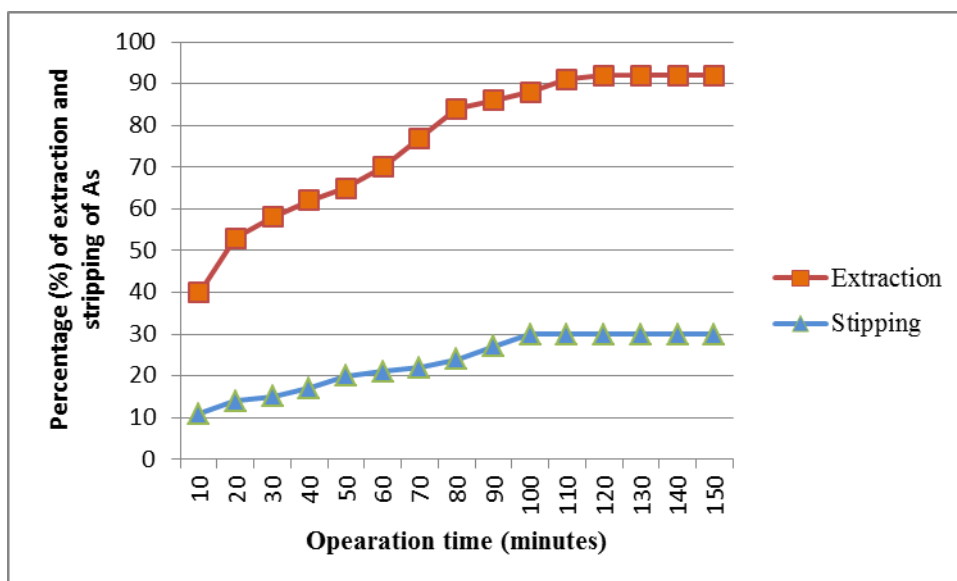
ผลของการแปรอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัดไอออนสารหนู ในขณะที่กำหนดสภาวะอื่นๆคงที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยพบว่าที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ผลการสกัดไอออนสารหนูได้สูงที่สุดเนื่องจากมี residual time ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาการสกัด ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลที่มากกว่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที จะทำให้ residual time ของไหลในระบบลดน้อยลงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดไอออนสารหนูกับเวลาในการสกัดที่อัตราไหลของสารละลายป้อนต่างๆกัน

4.1.6 ผลของเวลาที่ใช้ในเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์ต่อการสกัด

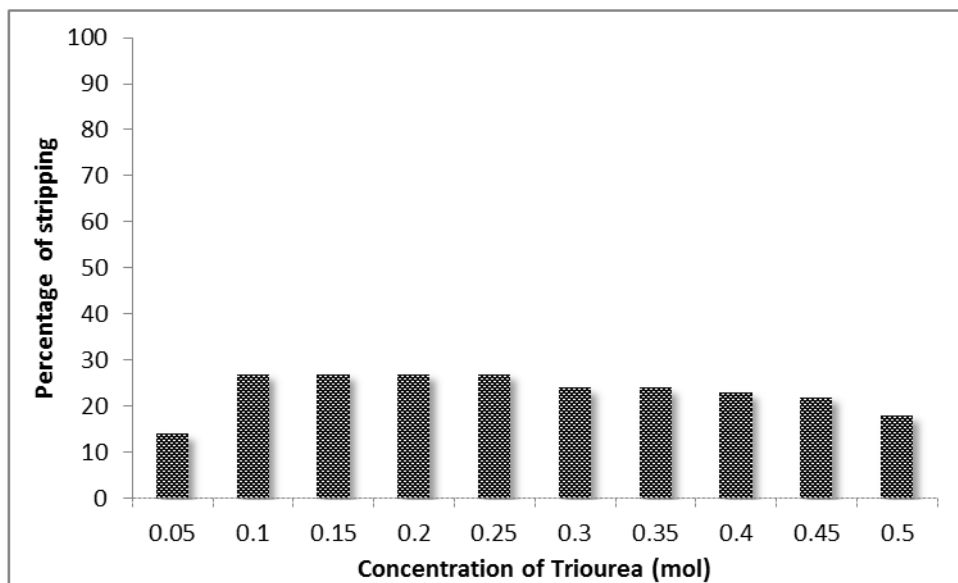
การศึกษาผลของเวลาการสกัดสารหนูในระบบเส้นใยกลวงชนิดคอนแทคเตอร์ต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดได้นำเสนอตามรูปที่ 4.6 โดยจะพบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนสารหนูจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลาการสกัดและจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีโดยมีเหตุผลเนื่องจากเกิดสมดุลทางเคมีระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ขึ้นทำให้ผลของการสกัดไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูเทียบกับเวลาการสกัดที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

4.1.7 ผลของความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับ

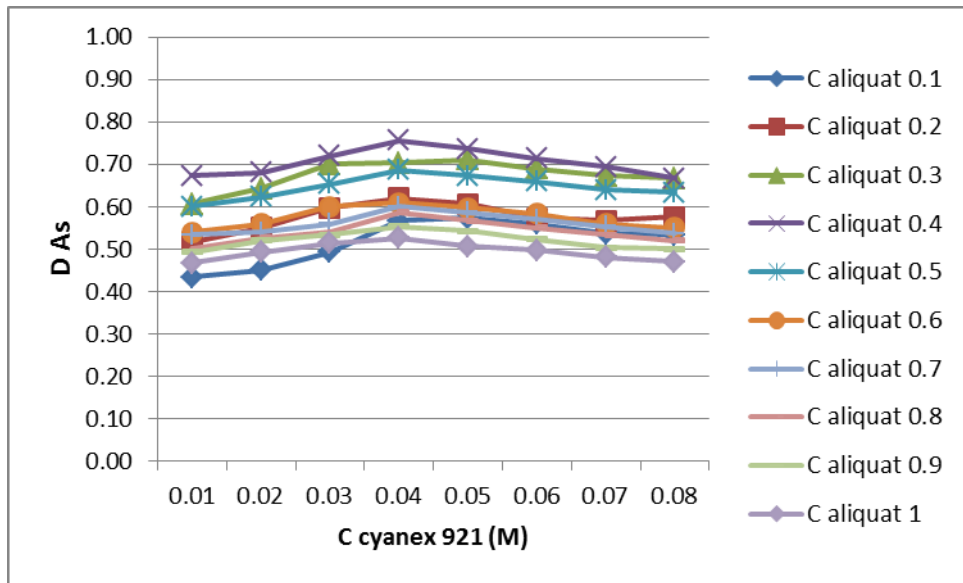
ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนสารหนู จะทำการปรับความเข้มข้นของไทโอยูเรียตั้งแต่ 0.05 โมล ถึง 0.5 โมล โดยจะละลายไทโอยูเรียในน้ำ DI รูปที่ 4.7 จะแสดงผลการทดลองโดยพบว่าที่ความเข้มข้นของไทโอยูเรียเท่ากับ 0.1 โมล จะมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนสารหนูมากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้พบว่า หากเพิ่มความเข้มข้นของไทโอยูเรียมากขึ้นจะไม่ทำให้เปอร์เซ็นต์การนำกลับสูงขึ้นเนื่องจากมีข้อจำกัดทางพื้นที่การถ่ายเทมวลภายในเยื่อแผ่นเหลว



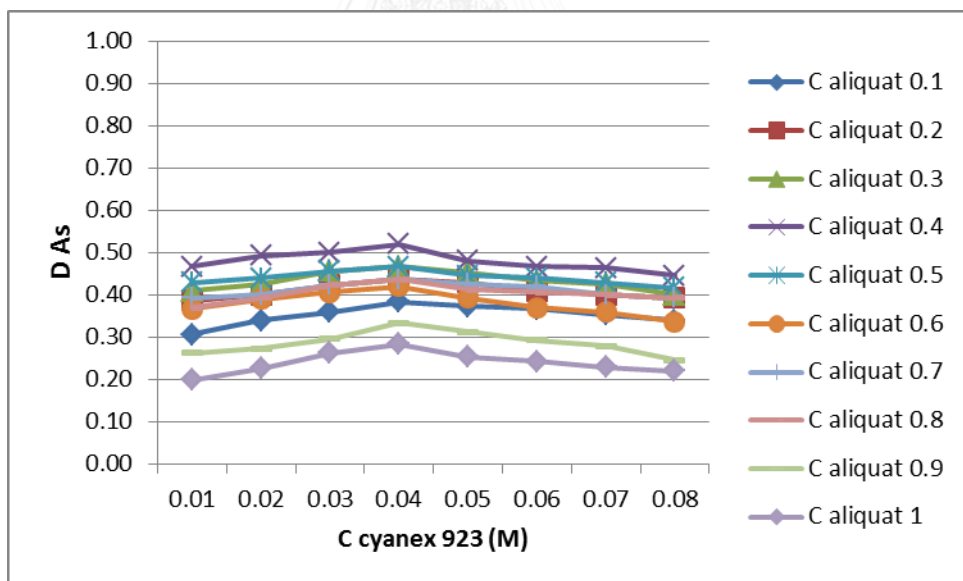
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการนำกลับไอออนสารหนูกับความเข้มข้นของ ไทโอยูเรียในสารละลายนำกลับที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

4.1.8 การคำนวณค่า Distribution coefficient (D_{As}) และค่า Synergistic coefficient (S.C.)

จากข้อมูลในรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะนำเสนอผลของการคำนวณค่า Distribution coefficient ของการทดลองระหว่างสารสกัด Aliquat 336 ผสมกับ Cyanex 921 และ Aliquat 336 ผสมกับ Cyanex 923 ตามลำดับโดยจะพบว่าค่า D_{As} ,มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Cyanex 921 ขึ้นจาก 0.01 โมล จนถึง ความเข้มข้น 0.04 โมล หลังจากเพิ่มความเข้มข้นของ Cyanex 921 มากกว่า 0.04 โมลนั้น ค่า D_{As} จะค่อยๆลดลง โดยที่ ความเข้มข้นของ Aliquat 336 เท่ากับ 0.4 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 921 ที่ 0.04 โมลจะให้ค่า D_{As} สูงที่สุด



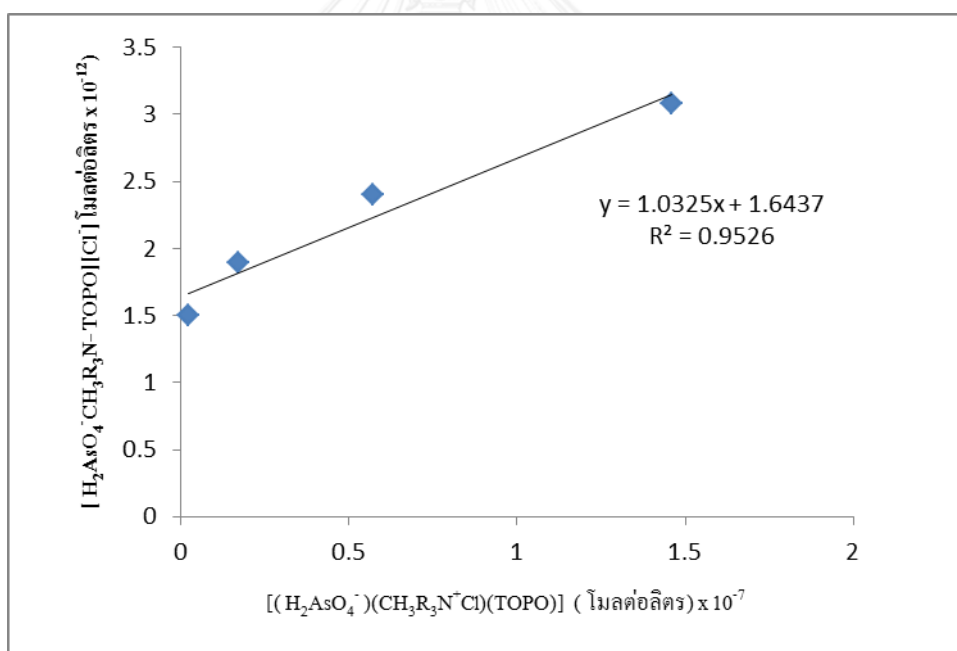
รูปที่ 4.9 ค่า Distribution coefficient ของการผสมสารสกัด Aliquat 336 กับ Cyanex 921 ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.10 ค่า Distribution coefficient ของการผสมสารสกัด Aliquat 336 กับ Cyanex 923 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.2 การคำนวณค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของปฏิกิริยาการสกัดสารหนู

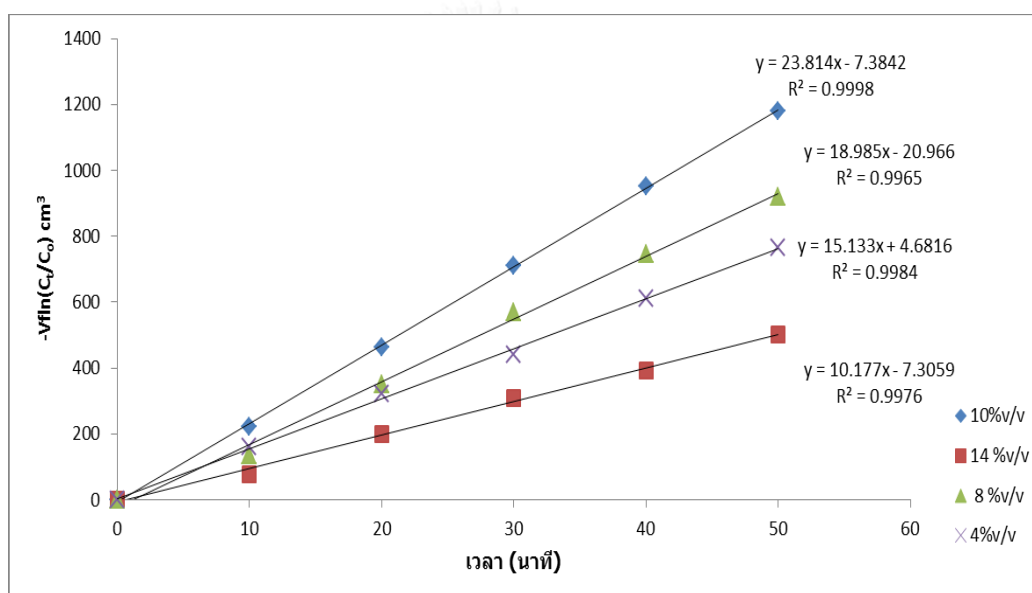
จากผลการทดลองการเก็บค่าความเข้มข้นของไอออนสารหนู ณ เวลาที่แตกต่างกันรวมถึงค่าความเข้มข้นของไอออนสารหนูในรูปสารประกอบเชิงซ้อนที่มีอยู่ในสารสกัดจากนั้นนำมาคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดโดยสามารถคำนวณได้การนำผลคูณของไอออนสารหนูในรูปสารประกอบเชิงซ้อนคูณความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนมา plot กราฟในแนวแกน y และ นำผลคูณของไอออนสารหนูกับความเข้มข้นของสารสกัดมา plot กราฟในแนวแกน x จากการหาค่าความชันของกราฟตามรูปที่ 4.11 โดยจากรูปจะได้ค่าคงที่สมดุล (K_{ex}) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูเท่ากับ 1.0325×10^{-5}



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและสุดท้ายของสารสกัด Aliquat 336 รวมกับสารสกัด Cyanex 921 ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนู

4.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนู

จากผลการทดลองนำความเข้มข้นของไอออนสารหนูที่เวลาใดๆมาเทียบกับความเข้มข้นของสารหนู ณ เวลาเริ่มต้นจากนั้นคำนวณค่า $-V_f \ln (C_f/C_{t,0})$ แล้วนำมา plot กราฟในแนวแกน y โดยแกน x จะแทนด้วยเวลาใด ๆ และการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูที่เวลาและความเข้มข้นต่างๆของสารสกัดจากความชันของกราฟระหว่าง กับเวลาโดยมีผลการคำนวณดังรูปที่ 4.11 มีความชันของกราฟคือ $AP * \emptyset / (\emptyset + 1)$

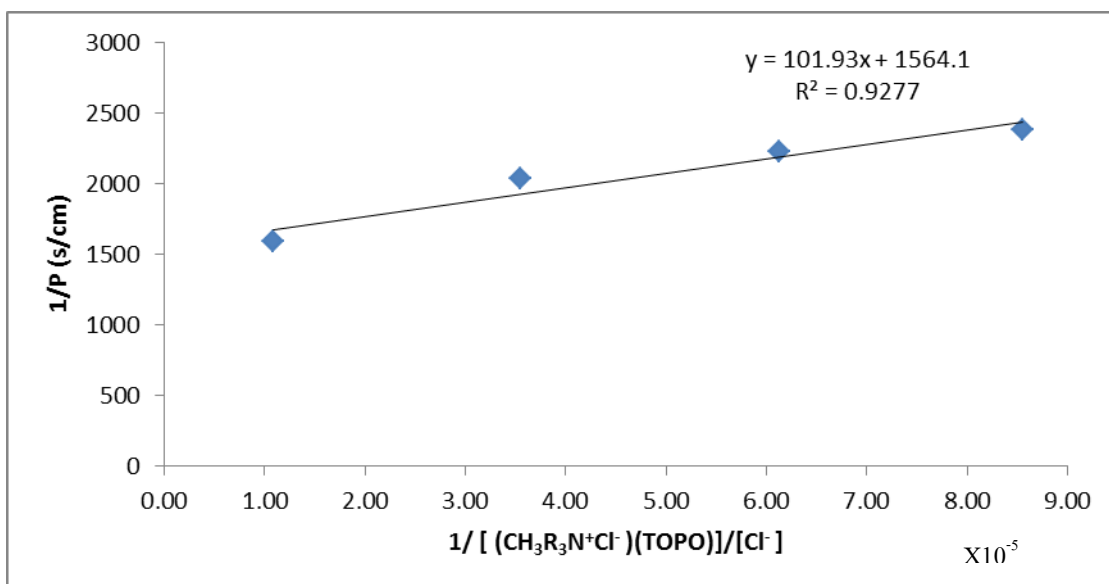


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $-V_f \ln (C_f/C_{t,0})$ ของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน กับเวลาเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดที่ค่าความเข้มข้นต่างๆกัน

4.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในเยื่อแผ่นเหลวของปฏิกิริยาการสกัดสารหนู

นำผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในข้อ 4.3 มา plot กราฟ $1/P$ ในแนวแกน y และนำผลจากการทดลองมาคำนวณค่า $1/ [(CH_3R_3N^+Cl^-)(TOPO)/[Cl^-]]$ เพื่อที่จะ plot กราฟใน

แนวแกน x จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในฝั่งสารละลายป้อนได้จากจุดตัดแกน 1/P และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในเยื่อแผ่นเหลวความชันของกราฟ โดยความชันที่ได้จากกราฟรูป 4.13 คือเทอมของ $\frac{r_i}{r_{lm} K_{ex} K_m} \frac{1}{}$

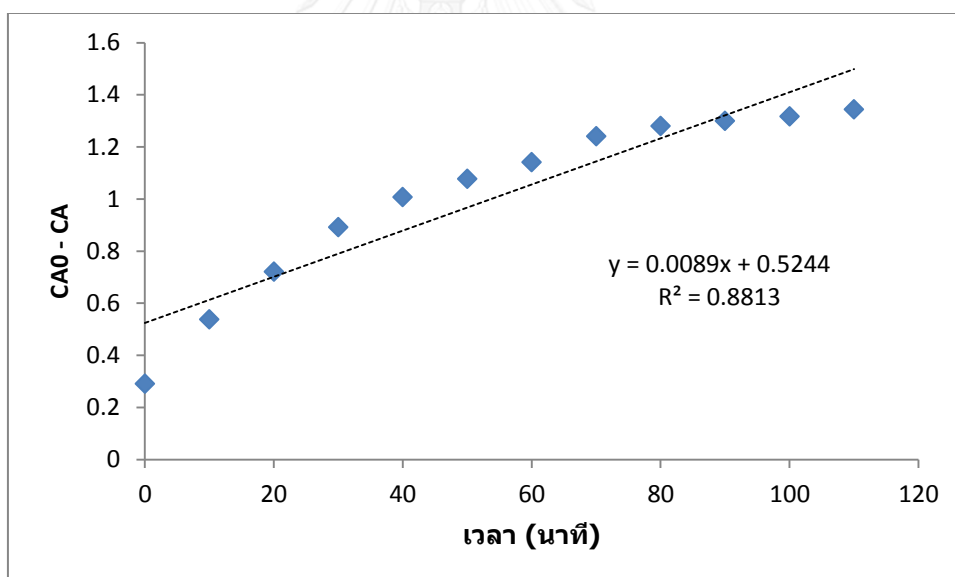


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1/P กับ $1/[(\text{CH}_3\text{R}_3\text{N}^+\text{Cl}^-)(\text{TOPO})]/[\text{Cl}^-]$ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 และ Cyanex921 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.5 อันดับของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูและการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาและการแพร่

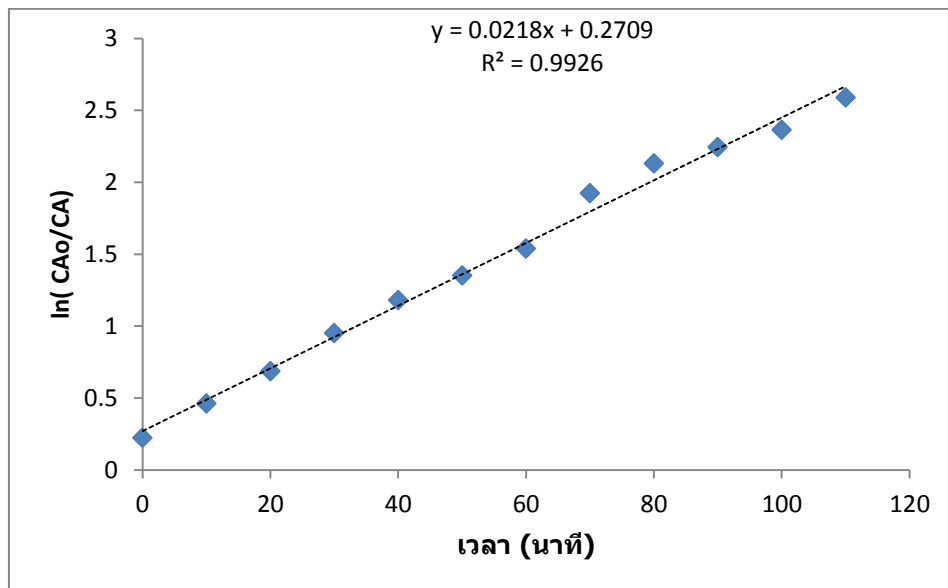
จากผลการทดลองนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างของเวลากับผลต่างของ $C_{A0}-C_A$, และเวลากับ $\ln (C_{A0}/C_A)$ และเวลากับ $1/C_A -1/C_{A0}$ เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูจะเป็นปฏิกิริยาอันดับ ศูนย์ หนึ่ง หรือสองตามลำดับ โดยผลการคำนวณที่แสดงตามรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 พบว่าความสัมพันธ์ของ $\ln (C_{A0}/C_A)$ ที่เวลาใด ๆ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9926 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงเส้นตรงมากที่สุด เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูสำหรับการทดลองนี้จึงเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

จากรูปที่ 4.14 plot กราฟระหว่าง $C_{A0}-C_A$ กับเวลาผลคือกราฟที่ได้มานั้นไม่เป็นเส้นตรง เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูจึงไม่เป็นปฏิกิริยาลำดับที่ ศูนย์



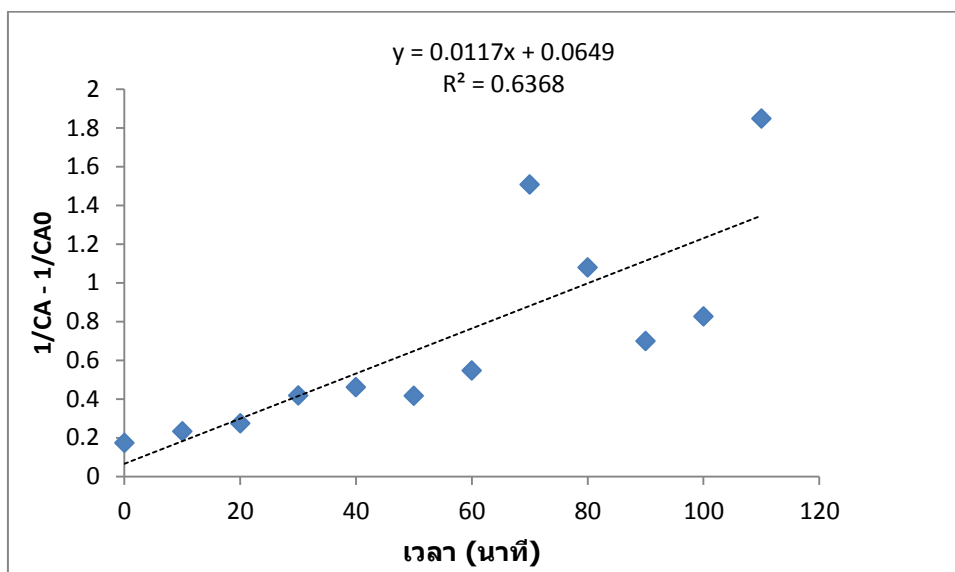
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนกับเปรียบเทียบเวลา

จากรูปที่ 4.15 plot กราฟระหว่าง $\ln(C_{A0}/C_A)$ กับเวลาผลคือกราฟที่ได้มานั้นมีค่าใกล้เคียงกับเส้นตรงมากที่สุดโดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9926 เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูจึงเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ หนึ่ง



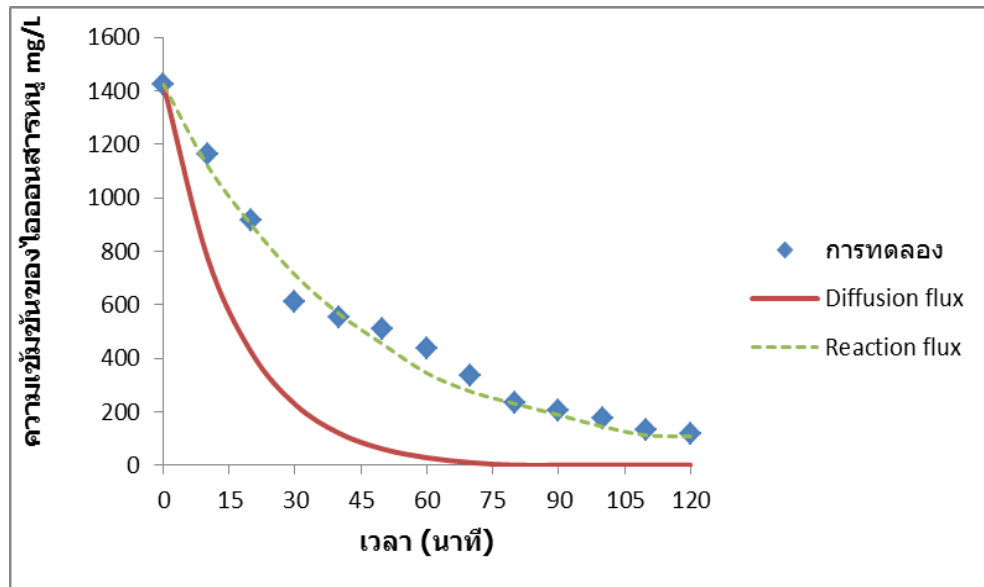
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_A - 1/C_{A0}$ ของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนกับเวลา

จากรูปที่ 4.16 plot กราฟระหว่าง $\ln(C_{A0}/C_A)$ กับเวลาเพื่อยืนยันผลโดยพบว่ากราฟของ $\ln(C_{A0}/C_A)$ กับเวลาไม่เป็นเส้นตรงเพราะฉะนั้นจึงยืนยันได้ว่าปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูไม่เป็น จึงเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ สอง



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_A - 1/C_{A0}$ ของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนกับเวลา

และจากการนำผลการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนสารหนูกับเวลาและเปรียบเทียบผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการแพร่ตามสมการ 2.37 และแบบปฏิกิริยาตามสมการ 2.39 นั้นพบว่าเส้นกราฟที่ได้มาจากการทดลองมีผลที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองแบบปฏิกิริยามากกว่าแบบจำลองแบบการแพร่แสดงว่าการถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาการสกัดเป็นหลัก



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายกับเวลาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองแบบปฏิกิริยากับแบบจำลองการแพร่

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการศึกษาตัวแปร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนู ชนิดของสารสกัด ความเป็นกรด เบสของสารละลายป้อน ผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ ต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนสารหนูได้สรุปและแสดงผลต่าง ๆ ไว้ตามผลในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลของงานวิจัย

หัวข้อที่ศึกษา	สถานะที่ทำการศึกษา	สถานะที่เหมาะสม
ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน	0.2-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร	0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ชนิดของสารสกัด	Aliquat 336, Cyanex 921, Cyanex 923	Aliquat 336
ความเป็นกรด เบสของสารละลายป้อน	1-14	6
ผลของสารสกัดเสริมฤทธิ์	Aliquat 336+Cyanex 921 Aliquat 336+Cyanex 923	0.4 โมล Aliquat 336+ 0.04 โมล Cyanex 921
ความเข้มข้นของไทโอยูเรียในสารละลายนำกลับ	0.05 -0.5 โมล	0.1 โมล
อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ	50-400 มิลลิลิตร/นาที	100 มิลลิลิตร/นาที
เวลาการสกัด	10-150 นาที	120 นาที
การถ่ายเทมวลไอออนสารหนูในสารละลายป้อน	แบบปฏิกิริยา Reaction flux หรือแบบการแพร่ Diffusion flux	แบบปฏิกิริยา (Reaction flux)

1. ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนูเท่ากับ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่าเหมาะต่อการสกัดด้วยระบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์มากที่สุดทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลภายในเยื่อแผ่นเหลวนั้นลดลง
2. สภาวะความเป็นกรดเบส ของสารละลายป้อนที่ pH เท่ากับ 6 ให้ผลการสกัดไอออนสารหนูมากที่สุดเนื่องจากที่สภาวะนี้สารหนูจะอยู่ในรูปที่เป็นไอออนประจุลบซึ่งสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับ Aliquat 336 ที่เป็นสารสกัดชนิดเบส
3. สารสกัด Aliquat 336 สามารถทำปฏิกิริยาการสกัดและให้ผลการสกัดไอออนสารหนูมากกว่า Cyanex 921 และ Cyanex 923 ตามลำดับเนื่องจาก Aliquat 336 ซึ่งเป็นสารสกัดชนิดเบสจะสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับไอออนโลหะลบดังนั้นจึงให้ผลการสกัดที่สูงมากกว่า Cyanex 921 และ Cyanex 923 เนื่องจากในระบบของการสกัดนั้นได้ทำการปรับค่า pH ของสารละลายป้อนเท่ากับ 6 ซึ่งในสภาวะนี้ไอออนสารหนูส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของ H_3AsO_3 , $H_2AsO_4^-$ และ $HAsO_4^{2-}$ ในขณะที่สารสกัด Aliquat 336 มีคุณสมบัติเป็นสารสกัดชนิดเบสและสามารถทำปฏิกิริยาการสกัดได้ดีกับสารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในรูปเหล่านี้
4. การผสมระหว่างสารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล และ สารสกัด Cyanex 921 ความเข้มข้น 0.04 โมลละลายในคิโรซีนให้ผลการสกัดแบบเสริมฤทธิ์สูงที่สุดเท่ากับ 92 % และมีค่า Synergistic coefficient จากการคำนวณเท่ากับ 0.325
5. ความเข้มข้นของไทโอยูเรียในน้ำ DI 0.1 โมลให้เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนสารหนูสูงสุดที่ 30% โดยหากเพิ่มความเข้มข้นของไทโอยูเรียมากขึ้นจะไม่ทำให้เปอร์เซ็นต์การนำกลับสูงขึ้นเนื่องจากมีข้อจำกัดทางพื้นที่การถ่ายเทมวลภายในเยื่อแผ่นเหลว
6. การควบคุมอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีให้ผลการสกัดสูงสุด เนื่องจากมี residual time ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาการสกัด ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลที่มากกว่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที จะทำให้ residual time ของไหลในระบบลดน้อยลงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลงตามไปด้วย
7. เวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการสกัดไอออนสารหนูด้วยระบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์มีค่าเท่ากับ 120 นาทีทั้งนี้เนื่องจากเกิดสมดุลทางเคมีระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ขึ้นทำให้ผลของการสกัดไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมสารละลายป้อนต้องให้แน่ใจว่าไม่มีอนุภาคปนเปื้อนเพื่อป้องกันการอนุภาคเหล่านี้ไปอุดตันภายในรูพรุนของเส้นใย
2. การล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ต้องให้แน่ใจว่ามีความสะอาดเพียงพอเนื่องจากหากยังไม่สะอาดพอจะส่งผลทำให้การทดลองในครั้งถัดไปมีผลการทดลองที่คลาดเคลื่อนได้



รายการอ้างอิง

1. <Standard of discharge industrial wastewater, Ministry of industry of Thailand >. http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html, Access date 15/08/2013.
2. Ng JC, Wang J, Shraim A. A global health problem caused by arsenic from natural sources. *Chemosphere*. 2003 ; 52 (9) : 1353-9.
3. Milton A, Johnson M. Arsenic in the food chains of a revegetated metalliferous mine tailings pond. *Chemosphere*. 1999 ; 39 (5) : 765-79.
4. Liao C-M, Shen H-H, Lin T-L, Chen S-C, Chen C-L, Hsu L-I, et al. Arsenic cancer risk posed to human health from tilapia consumption in Taiwan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2008 ; 70 (1) : 27-37.
5. Pancharoen U, Poonkum W, Lothongkum AW. Treatment of arsenic ions from produced water through hollow fiber supported liquid membrane. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009 ; 482 (1-2) : 328-34.
6. Ahmad SA, Khan MH. 2 - Ground Water Arsenic Contamination and Its Health Effects in Bangladesh. In: Flora SJS, editor. *Handbook of Arsenic Toxicology*. Oxford: Academic Press; 2015. p. 51-72.
7. Bailey KA, Fry RC. 17 - Health Effects of Prenatal and Early-Life Exposure to Arsenic. In: Flora SJS, editor. *Handbook of Arsenic Toxicology*. Oxford: Academic Press; 2015. p. 405-28.
8. Hall AH. Chronic arsenic poisoning. *Toxicology Letters*. 2002 ; 128 (1-3) : 69-72.
9. de Lourdes Ballinas M, Rodriguez de San Miguel E, de Jesus Rodriguez MT, Silva O, Munoz M, de Gyves J. Arsenic(V) removal with polymer inclusion membranes from sulfuric acid media using DBBP as carrier. *Environmental science & technology*. 2004 ; 38 (3) : 886-91.
10. Soldenhoff K, Shamieh M, Manis A. Liquid-liquid extraction of cobalt with hollow fiber contactor. *Journal of Membrane Science*. 2005 ; 252 (1-2) : 183-94.

11. Perez MEM, Reyes-Aguilera JA, Saucedo TI, Gonzalez MP, Navarro R, Avila-Rodriguez M. Study of As(V) transfer through a supported liquid membrane impregnated with trioctylphosphine oxide (Cyanex 921). *Journal of Membrane Science*. 2007 ; 302 (1–2) : 119-26.
12. Atanassova M, Dukov IL. Solvent extraction and separation of lanthanoids with mixtures of chelating extractant and 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol. *Separation and Purification Technology*. 2006 ; 49 (1) : 101-5.
13. Wannachod P, Chaturabul S, Pancharoen U, Lothongkum AW, Patthaveekongka W. The effective recovery of praseodymium from mixed rare earths via a hollow fiber supported liquid membrane and its mass transfer related. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011 ; 509 (2) : 354-61.
14. Klaassen R, Feron PHM, Jansen AE. Membrane Contactors in Industrial Applications. *Chemical Engineering Research and Design*. 2005 ; 83 (3) : 234-46.
15. Lothongkum AW, Suren S, Chaturabul S, Thamphiphit N, Pancharoen U. Simultaneous removal of arsenic and mercury from natural-gas-co-produced water from the Gulf of Thailand using synergistic extractant via HFSLM. *Journal of Membrane Science*. 2011 ; 369 (1–2) : 350-8.
16. Fouad EA, Bart HJ. Emulsion liquid membrane extraction of zinc by a hollow-fiber contactor. *Journal of Membrane Science*. 2008 ; 307 (2) : 156-68.
17. Ambare DN, Ansari SA, Anitha M, Kandwal P, Singh DK, Singh H, et al. Non-dispersive solvent extraction of neodymium using a hollow fiber contactor: Mass transfer and modeling studies. *Journal of Membrane Science*. 2013 ; 446 (0) : 106-12.
18. Kertész R, Schlosser Š. Design and simulation of two phase hollow fiber contactors for simultaneous membrane based solvent extraction and stripping of organic acids and bases. *Separation and Purification Technology*. 2005 ; 41 (3) : 275-87.
19. Lazarova Z, Syska B, Schügerl K. Application of large-scale hollow fiber membrane contactors for simultaneous extractive removal and stripping of penicillin G. *Journal of Membrane Science*. 2002 ; 202 (1–2) : 151-64.

20. Bhuyan R. Arsenic user. <http://www.buzzle.com/articles/arsenic-uses.html>. Access date . 20/4/2012.
21. Emadi A, Gore SD. Arsenic Trioxide – An Old Drug Rediscovered. *Blood reviews*. 2010 ; 24 (4-5) : 191-9.
22. Sritakool M. <Arsenic Trioxide as A Selective Anticancer Agent Rational.pdf>. *Thai Journal of Hematology and Transfusion Medicine* 2004 ; 14.
23. Helsen L, Van den Bulck E. Review of disposal technologies for chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste, with detailed analyses of thermochemical conversion processes. *Environmental pollution* (Barking, Essex : 1987). 2005 ; 134 (2) : 301-14.
24. Tanaka A. Toxicity of indium arsenide, gallium arsenide, and aluminium gallium arsenide. *Toxicology and applied pharmacology*. 2004;198 (3) :405-11.
25. <http://en.wikipedia.org/wiki/Arsenic>.Wikipedia,/Arsenic. Access date , 20/4/2011.
26. Hu YC, Cheng HL, Hsieh BS, Huang LW, Huang TC, Chang KL. Arsenic trioxide affects bone remodeling by effects on osteoblast differentiation and function. *Bone*. 2012 ; 50 (6) : 1406-15.
27. Björkgren V. Arsenic. <http://www.kemise/en/Content/Statistics/Statistics-in-brief/Statistics-in-brief---Substances-and-substance-groups/Arsenic/>. Access date 7/8/2013.
28. Fujino Y, Guo X, Liu J, You L, Miyatake M, Yoshimura T. Mental health burden amongst inhabitants of an arsenic-affected area in Inner Mongolia, China. *Social Science & Medicine*. 2004 ; 59 (9) : 1969-73.
29. Prapasawat T, Ramakul P, Satayaprasert C, Pancharoen U, Lothongkum A. Separation of As(III) and As(V) by hollow fiber supported liquid membrane based on the mass transfer theory. *Korean J Chem Eng*. 2008 ; 25 (1) : 158-63.
30. Bogacki MB, Wiśniewski M, Szymanowski J. Effect of extractant on arsenic(V) recovery from sulfuric acid solutions. *J Radioanal Nucl Chem*. 1998 ; 228 (1-2) : 57-61.

31. Bey S, Criscuoli A, Figoli A, Leopold A, Simone S, Benamor M, et al. Removal of As(V) by PVDF hollow fibers membrane contactors using Aliquat-336 as extractant. *Desalination*. 2010 ; 264 (3) : 193-200.
32. Gabelman A, Hwang S-T. Hollow fiber membrane contactors. *Journal of Membrane Science*. 1999 ; 159 (1-2) : 61-106.
33. Mohamed Khayet Souhaimi TM. *Membrane Distillation principle and application* , Elsevier B.V. ; 2011.
34. Rattana Jiratananon. *Separation process via membrane*, Bangkok. 2/2000
35. Porter MC. *Handbook of industrial membrane technology*, William Andrew Publishing/Noyes; 1990.
36. Soontarapa K. *Membrane separation technology*. Chulalongkorn University Printing House. 2000.
37. Kasemsestha I. *Extraction of Copper Ion from an Extremely Dilute Solution with Hollow Fiber Supported Liquid Membrane* , Master Thesis, Chulalongkorn University. 1998.
38. Li Y-L, Tung K-L. The effect of curvature of a spacer-filled channel on fluid flow in spiral-wound membrane modules. *Journal of Membrane Science*. 2008 ; 319 (1-2) : 286-97.
39. Tavlarides LL, Bae JH, Lee CK. *Solvent Extraction, Membranes, and Ion Exchange in Hydrometallurgical Dilute Metals Separation*. *Separation Science and Technology*. 1987 ; 22 (2-3) : 581-617.
40. U.Pancharoen. Chapter 22 *Mass TRansfer in Hollow Fiber Supported Liquid Membrane for As and Hg Removal from produced Water in Upstream Petroleum Operation in the gulf of Thailand*. *Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications* , INTECH. 2011.
41. ChemIDPlus. www.chem.sis.nlm.nih.gov , Access date 20/6/2015.
42. Desreux DGaJF. *Recent Development and New Combinations of Extractants in Synergistic Process*. *Proceedings of the International Solvent Extraction Conference ISEC 77, Toronto, 9-6th September. 1977*; Canadian Institute of Mining ad Metallurgy.

43. Bothun GD, Knutson BL, Strobel HJ, Nokes SE. Mass transfer in hollow fiber membrane contactor extraction using compressed solvents. *Journal of Membrane Science*. 2003 ; 227 (1–2) : 183-96.
44. Kubišová Lu, Sabolová E, Schlosser Š, Marták J, Kertész R. Membrane based solvent extraction and stripping of a heterocyclic carboxylic acid in hollow fiber contactors. *Desalination*. 2002 ; 148 (1–3) : 205-11.
45. Estay H, Bocquet S, Romero J, Sanchez J, Rios GM, Valenzuela F. Modeling and simulation of mass transfer in near-critical extraction using a hollow fiber membrane contactor. *Chemical Engineering Science*. 2007 ; 62 (21) : 5794-808.
46. Wongsawa T, Sunsandee N, Pancharoen U, Lothongkum AW. High-efficiency HFSLM for silver-ion pertraction from pharmaceutical wastewater and mass-transport models. *Chemical Engineering Research and Design*. 2014 ; 92 (11) : 2681-93.
47. Chaturabul S. Selective Transport of Palladium through a Hollow Fiber Supported Liquid Membrane and Prediction Model Based on Reaction Flux. *Separation Science and Technology*. 2013 ; 48 : 93-104.
48. Wongsawa T. A Reaction Flux Model for Extraction of Cu(II) with LIX84I in HFSLM. *Separation Science and Technology*. 2011 ; 46 (14,2011) : 2183-90.
49. Kislík VS. *Liquid Membranes: Principles and Applications in Chemical Separations and Wastewater Treatment*. Elsevier. 2009.
50. Jirjis BF, Luque S. Chapter 9 - Practical Aspects of Membrane System Design in Food and Bioprocessing Applications. In: Cui ZF, Muralidhara HS, editors. *Membrane Technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2010. p. 179-212.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละของการนำกลับ

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของการสกัด} = \frac{C_{f,in} - C_{f,out}}{C_{f,in}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละของการนำกลับ} = \frac{C_{s,out}}{C_{f,in}} \times 100$$

เมื่อ

$C_{f, in}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนฝั้งขาเข้า (หน่วย ppb)

$C_{f, out}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนฝั้งขาออก (หน่วย ppb)

$C_{s, out}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายนำกลับฝั้งขาออก (หน่วย ppb)

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตาราง ข-4 สภาวะที่ทดลอง ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อนเท่ากับ 6 อัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับ 100 มิลลิลิตร/นาที ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.1 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสายของสารละลายป้อนฝั้งขาออกเท่ากับ 842.57 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\text{ร้อยละของการสกัด} = \frac{(1,452.7 - 842.57) \times 100}{1,452.7}$$

$$= 42$$

$$\text{ร้อยละของการนำกลับ} = \frac{(188.85) \times 100}{1,452.7}$$

$$= 13$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.2M และความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 595.61 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7 - 595.61) \times 100}{1,452.7} \\ &= 59 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(203.38) \times 100}{1,452.7} \\ &= 14 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.3 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วนและความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 537.50 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7 - 537.50) \times 100}{1,452.7} \\ &= 63 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(203.38) \times 100}{1,452.7} \\ &= 14 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.4 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 522.97 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-522.97) \times 100}{1,452.7} \\ &= 64 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(188.85) \times 100}{1,452.7} \\ &= 13 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.5 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 566.55 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-566.55) \times 100}{1,452.7} \\ &= 61 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(188.85) \times 100}{1,452.7} \\ &= 13 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.6 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 581.08 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-581.08) \times 100}{1,452.7} \\ &= 60 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(174.32) \times 100}{1,452.7} \\ &= 12 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.7 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั้งขาออกเท่ากับ 610.13 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-610.13) \times 100}{1,452.7} \\ &= 58 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(159.80) \times 100}{1,452.7} \\ &= 11 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.8 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั้งขาออกเท่ากับ 624.66 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-624.66) \times 100}{1,452.7} \\ &= 57 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(145.27) \times 100}{1,452.7} \\ &= 10 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.9 โมลและความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วนและความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั้งขาออกเท่ากับ 639.19 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-624.66) \times 100}{1,452.7} \\
 &= 56 \\
 \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(145.27) \times 100}{1452.7} \\
 &= 10
 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 1.0 โมลและความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 682.77 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-682.77) \times 100}{1,452.7} \\
 &= 53 \\
 \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(145.27) \times 100}{1,452.7} \\
 &= 10
 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.1 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 566.55 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-566.55) \times 100}{1,452.7} \\
 &= 61
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(249.96) \times 100}{1,452.} \\ &= 17 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.2 โมลและความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 217.91 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-217.91) \times 100}{1,452.7} \\ &= 85 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(261.49) \times 100}{1,452.7} \\ &= 18 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.3 โมลและความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 188.8 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{1,452.7-217.91) \times 100}{1,452.7} \\ &= 87 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(392.23) \times 100}{1,452.7} \\ &= 27 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.4 โมลและความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 116.22 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-116.22) \times 100}{1,452.7} \\ &= 92 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(421.28) \times 100}{1,452.7} \\ &= 29 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.5 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 246.96 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-246.96) \times 100}{1,452.7} \\ &= 83 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(305.07) \times 100}{1,452.7} \\ &= 21 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.6 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 276.01 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-276.01) \times 100}{1,452.7} \\
 &= 81 \\
 \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(305.07) \times 100}{1,452.7} \\
 &= 21
 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.7 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 290.54 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-290.54) \times 100}{1,452.7} \\
 &= 80 \\
 \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(290.54) \times 100}{1,452.7} \\
 &= 20
 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.8 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 348.65 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7-348.65) \times 100}{1,452.7} \\
 &= 76
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(261.49) \times 100}{1,452.7} \\ &= 18 \end{aligned}$$

ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.9 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วนและความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 363.18 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7 - 363.18) \times 100}{1,452.7} \\ &= 75 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(261.49) \times 100}{1,452.7} \\ &= 18 \end{aligned}$$

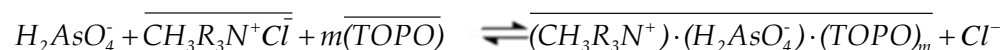
ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 1.0 โมล และความเข้มข้นของ Cyanex 921 เท่ากับ 0.04 โมล มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนเท่ากับ 1,452.7 ส่วนในพันล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสายของสารละลายป้อนฝั่งขาออกเท่ากับ 377.70 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการสกัด} &= \frac{(1,452.7 - 377.70) \times 100}{1,452.7} \\ &= 74 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของการนำกลับ} &= \frac{(232.43) \times 100}{1,452.7} \\ &= 16 \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant, K_{ex}) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient, D) ของปฏิกิริยา การสกัดไอออนสารหนู

จากสมการ 2.13 และ 2.14 สามารถนำมาคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาได้ดังนี้



$$K_{ex,As} = \frac{[(CH_3R_3N^+) \cdot (H_2AsO_4^-) \cdot (TOPO)] [Cl^-]}{[H_2AsO_4^-] [CH_3R_3N^+Cl^-] [TOPO]}$$

$$[H_2AsO_4^-] \text{ ที่มีอยู่ในสารละลายขาเข้า} = 1.0396 \times 10^{-5} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$[H_2AsO_4^-] \text{ ที่อยู่ในสารละลายขาออก} = 0.6514 \times 10^{-5} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$\text{เพราะฉะนั้นไอออนของสารหนูที่เข้าทำปฏิกิริยา} = 0.3282 \times 10^{-5} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

ความเข้มข้นของไอออนสารหนูที่เข้าทำปฏิกิริยาจะเท่ากับความเข้มข้นของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น เพราะฉะนั้นจะได้ $[(CH_3R_3N^+) \cdot (H_2AsO_4^-) \cdot (TOPO)]$ เท่ากับ 3.282×10^{-6} โมลต่อลิตร และ $[Cl^-]$ เท่ากับ 3.282×10^{-6} โมลต่อลิตร นำความสัมพันธ์ระหว่าง $[(CH_3R_3N^+) \cdot (H_2AsO_4^-) \cdot (TOPO)] \cdot [Cl^-]$ กับ $[(H_2SO_4^-) \cdot (CH_3R_3N^+) \cdot (TOPO)]$ ไปสร้างกราฟโดยที่ความชันของกราฟเท่ากับค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา K_{ex} เท่ากับ 1.0325×10^{-5}

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient , D)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายใช้สมการ

$$D = \frac{[(CH_3R_3N^+) \cdot (H_2AsO_4^-) \cdot (TOPO)]}{[H_2AsO_4^-]} = K_{ex} \frac{[(CH_3R_3N^+ Cl^-) \cdot (TOPO)]}{[Cl^-]}$$

เมื่อ K_{ex} เท่ากับค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดสารหนูมีค่าเท่ากับ 1.0325×10^{-5} ความเข้มข้นของ $[(CH_3R_3N^+Cl^-)(TOPO)]$ มีค่าเท่ากับ 0.0474 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของ $[Cl^-]$ มีค่าเท่ากับ 3.825×10^{-6} โมลต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } D &= 1.0325 \times 10^{-5} \times (0.0474 / 3.825 \times 10^{-6}) \\ &= 0.128 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว, D ของปฏิกิริยาการสกัดสารหนูมีค่าเท่ากับ 0.128

การคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient, P)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_f \ln \left(\frac{C_t}{C_{(t,0)}} \right) = -AP \frac{(\emptyset)}{(\emptyset + 1)} t$$

โดยที่ \emptyset หาได้จาก $\frac{Q_f}{PLN\tau\pi\varepsilon}$

เมื่อ

P	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตร/วินาที)
V_f	=	ปริมาตรของสารละลายป้อน (ลบ.ซม.)
C_t	=	ความเข้มข้นของสารหนูที่เวลา t (โมลต่อลิตร)
$C_{t,0}$	=	ความเข้มข้นของสารหนูที่เวลาเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)
A	=	พื้นที่การถ่ายเทมวล (ตร.ซม.)
t	=	เวลาที่ t (วินาที)
Q_f	=	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลบ ม./วินาที)
L	=	ความยาวของเส้นใยคอนแทคเตอร์ (เซนติเมตร)

ϵ	=	0.25
π	=	3.1416
N	=	จำนวนเส้นใยกลาง (เส้น)
ri	=	รัศมีภายในเส้นใยกลาง (เซนติเมตร)

โดยความชันของกราฟระหว่าง $-V_f \ln (C_t/C_{t_0})$ กับ เวลาคือค่า $AP(\emptyset/\emptyset+1)$ ซึ่งตัวอย่างของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

V_f	=	1,000 ลบ.ซม.
C_t	=	8.2716×10^{-6} โมลต่อลิตร
C_{t_0}	=	1.0339×10^{-5} โมลต่อลิตร
A	=	14,000 ตร.ซม.
t	=	3,000 วินาที
Q_f	=	1.67 ลบ ม./วินาที
L	=	15 เซนติเมตร
ϵ	=	0.25
π	=	3.1416
N	=	35,000 เส้น
ri	=	0.012 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.12 จะพบว่าความชันของกราฟ ของความเข้มข้นของสารสกัดที่ 10% เท่ากับ 23.814 ซึ่งค่าที่ได้มาคือค่า $AP(\emptyset/\emptyset+1)$ เมื่อนำไปแทนค่าหา P จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน P เท่ากับ 4.21×10^{-4} เซนติเมตรต่อวินาที

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารหนูในสารละลายป้อน (K_f)
และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารหนูในเยื่อแผ่นเหลว (K_m)

จากสมการ

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{K_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \times \frac{1}{K_{ex}K_m([CH_3R_3N^+Cl][TOPO])/[Cl^-]}$$

เมื่อ P คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)

K_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารหนูในสารละลายป้อน (เซนติเมตรต่อวินาที)

r_i คือ รัศมีภายในเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

r_{lm} คือ รัศมีแบบ log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

K_{ex} คือ ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดสารหนู

K_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสารหนูภายในเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)

นำค่าจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน, P ของสารหนูในสารละลายป้อน ไปสร้างกราฟระหว่าง $1/P$ กับ $1/([CH_3R_3N^+Cl][TOPO])/[Cl^-]$ โดยผลจากการสร้างกราฟได้แสดงในรูป 4.12 โดยนำจุดตัดแกน $1/P$ ไปคำนวณค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารหนูในสารละลายป้อน (K_f) และ K_m ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสารหนูภายในเยื่อแผ่นเหลว (K_m) โดยที่ค่าความชันของกราฟในรูป 4.12 คือค่า

$$\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex}K_m}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน, K_i สามารถหาได้จาก จุดตัดแกน $1/P$ ตามรูปที่ 4.13 คือ 1564.1

เพราะฉะนั้นจะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในสารละลายป้อน

$$\frac{1}{K_i} = 1564.1$$

$$K_i = 6.39 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูวนเยื่อแผ่นเหลว (K_m)

จากรูปที่ 4.13 ความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 101.9×10^{-5} ซึ่งเท่ากับเทอม $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} K_m}$

โดยที่

$$r_{lm} = \frac{(r_o - r_i)}{\ln(r_o/r_i)}$$

เมื่อ r_o คือ รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวงมีค่าเท่ากับ 0.015 เซนติเมตร

r_i คือ รัศมีภายในของเส้นใยกลวงมีค่าเท่ากับ 0.012 เซนติเมตร

แทนค่า

$$r_{lm} = \frac{(0.015 - 0.012)}{\ln(0.015/0.012)} = \frac{(0.015 - 0.012)}{\ln(0.015/0.012)}$$

ได้

$$r_{lm} = 0.0134 \text{ เซนติเมตร}$$

เมื่อแทนค่า K_{ex} , r_{lm} และ r_i ลงใน

$$\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} K_m} = 101.9 \times 10^{-5}$$

จะได้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูบนเยื่อแผ่นเหลว K_m เท่ากับ 0.01587 เซนติเมตรต่อวินาที

ตัวอย่างการคำนวณหาความเข้มข้นของไอออนสารหนูที่เวลาต่างๆโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบการแพร่ (Diffusion flux Model)

จากสมการ 2.37

$$[As^{5+}]_f = -R_f \frac{[CH_3R_3N^+ TOPO]}{R_m} + \left[[As^{5+}]_{fo} + \frac{R_f [CH_3R_3N^+ TOPO]}{R_m} \right] \exp\left[\frac{-A}{2R_f R_m V_f} t \right]$$

เมื่อ $R_f = \frac{1}{K_f}$ จาก $K_f = 6.39 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$

แทนค่า $R_f = \frac{1}{(0.000639)}$ ได้ R_f เท่ากับ 1564.945 s/cm

และ $R_m = \frac{1}{K_m}$ จาก $K_m = 1.587 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

แทนค่า $R_m = \frac{1}{0.01587}$ ได้ R_m เท่ากับ 63.012 s/cm

A คือ พื้นที่ผิว มีค่าเท่ากับ $14,000 \text{ cm}^2$

V_f คือ พื้นที่รูพรุน เท่ากับ $2\pi r_i(ro - ri)(L)(N)(\epsilon)$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } V_f &= 2 \times (22/7) \times 0.0024 \times (0.0030 - 0.0024) \times (15) \times (35,000) \times (0.25) \\ &= 1.118 \end{aligned}$$

แทนในสมการที่ 2.37 จะได้ $[As^{5+}]$ เท่ากับ 779.46

ตัวอย่างการคำนวณหาความเข้มข้นของไอออนสารหนูที่เวลาต่างๆโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบปฏิกิริยา (Reaction flux Model)

เนื่องจากปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูสำหรับการทดลองนี้เป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ($n = 1$) เพราะฉะนั้นในทางการคำนวณหาความเข้มข้นของไอออนสารหนูโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบปฏิกิริยาจึงใช้สมการ 2.39 และ 2.40 โดยตัวอย่างการคำนวณหาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เวลา $t = 0$

$$C_A(L, 0) = CA(0,0) \exp\left(\frac{K_f A_c L}{Q}\right)$$

โดย $C_A(0,0)$ เท่ากับ 1,452.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

k_f เท่ากับ 1.035×10^{-5}

L ความยาวท่อ เท่ากับ 15 เซนติเมตร

A_c เท่ากับ 0.05346 ตารางเมตร

Q เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } C_A(L, 0) &= 1,452.7 \exp\left(\frac{(1.035 \times 10^{-5} \times 0.05346 \times 0.15)}{100}\right) \\ &= 1,452.700001 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างข้อมูลจากการทดลองและผลการคำนวณ

ตาราง ข-1 ปริมาณของไอออนสารหนูและไอออนโลหะอื่นๆในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันที่ pH 6-6.5

ชนิดโลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
As	1.4527
Mg	4.9752
Hg	0.254
Fe	0.4269
Na	1,185.32
Ca	15.8152

ตาราง ข-2 ผลของชนิดของสารสกัดต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ
สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.5 โมล ในคีโรซีน Cyanex 921 ความเข้มข้น 0.5 โมล ในคีโรซีน และ Cyanex 923 ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 5 อัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับ 100 มิลลิลิตร/นาที

ชนิดของสารสกัด	ชนิดของตัวทำละลาย	ความเข้มข้นของไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
Aliquat 336	คีโรซีน	215	57	25
Cyanex921	คีโรซีน	335	33	13
Cyanex923	คีโรซีน	370	26	18

ตาราง ข-3 ผลของความเข้มข้นของสารหนูในสารละลายป้อนต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.5 โมล รวมกับ Cyanex 921 ความเข้มข้น 0.5 โมล ใน คีโรซีน และ Cyanex 923 ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6 อัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับ 100 มิลลิลิตร/นาที

ความเข้มข้นเริ่มต้นของ ไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ความเข้มข้นของ ไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
200	86	57	18
300	78	74	27
400	92	77	29
500	90	82	30
600	120	80	28
700	140	80	28
800	160	80	25
900	180	80	24
1000	200	80	25

ตาราง ข-4 ผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่อร้อยละของการสกัด

สภาวะที่ทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6 อัตราการไหลของสารละลายป้อน เท่ากับ 100 มิลลิลิตร/นาที

Aliquat336 (โมล)	Cyanex923 (โมล)	ความเข้มข้นของ ไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการ สกัด	ร้อยละการ นำกลับ
0	0.04	1075.00	26	10
0.1	0.04	842.57	42	13
0.2	0.04	595.61	59	14
0.3	0.04	537.50	63	13
0.4	0.04	522.97	64	13
0.5	0.04	566.55	61	12
0.6	0.04	581.08	60	11
0.7	0.04	610.13	58	10
0.8	0.04	624.66	57	10
0.9	0.04	639.19	56	10
1	0.04	682.77	53	10

ตารางที่ ข-4 (ต่อ) ผลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ต่อร้อยละของการสกัด

สภาวะที่ทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6 อัตราการไหลของสารละลายป้อน เท่ากับ 100 มิลลิลิตร/นาที

Aliquat336: (โมล)	Cyanex921 (โมล)	ความเข้มข้น ของไอออนสาร หนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการ สกัด	ร้อยละการ นำกลับ
0	0.04	973.31	33	12
0.1	0.04	566.55	61	17
0.2	0.04	217.91	85	18
0.3	0.04	188.85	87	27
0.4	0.04	116.22	92	29
0.5	0.04	246.96	83	21
0.6	0.04	276.01	81	21
0.7	0.04	290.54	80	20
0.8	0.04	348.65	76	18
0.9	0.04	363.18	75	18
1	0.04	377.70	74	16

ตาราง ข-5 ผลของความเป็นกรด เบสของสารป้อนต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ
 สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.5 โมล สารละลายนำกลับไทโอยูเรีย
 ความเข้มข้น 0.1 โมล ในน้ำ DI อัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับ 100 มิลลิลิตร/นาที

pH	ความเข้มข้นของ ไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	ร้อยละการนำกลับ
1	987.84	32	16
2	929.73	36	18
3	828.04	43	21
4	668.24	54	26
5	610.13	58	29
6	435.81	70	30
7	522.97	64	25
8	668.24	54	22
9	726.35	50	20
10	857.09	41	19
11	871.62	40	16
12	958.78	34	14
13	1016.89	30	12
14	1031.42	29	11

ตาราง ข-6 ผลของอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัด
และร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล รวมกับ Cyanex 921
ความเข้มข้น 0.04 โมล ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6

เวลา	ความเข้มข้นของ ไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	อัตราการไหลของ สารละลายป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)
10	1162.16	20	100
20	915.20	37	100
30	610.13	58	100
40	552.03	62	100
50	508.45	65	100
60	435.81	70	100
70	334.12	77	100
80	232.43	84	100
90	203.38	86	100
100	174.32	88	100
110	130.74	91	100
120	116.22	92	100
130	116.22	92	100
140	116.22	92	100
150	116.22	92	100

ตารางที่ ข-6 (ต่อ) ผลของอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล รวมกับCyanex 923 ความเข้มข้น 0.04 โมล ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6

เวลา	ความเข้มข้นของ ไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	อัตราการไหลของ สารละลายป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)
10	1205.74	17	150
20	1031.42	29	150
30	726.35	50	150
40	682.77	53	150
50	581.08	60	150
60	493.92	66	150
70	406.76	72	150
80	334.12	77	150
90	261.49	82	150
100	232.43	84	150
110	188.85	87	150
120	159.80	89	150
130	145.27	90	150
140	145.27	90	150
150	145.27	90	150

ตารางที่ ข-6 (ต่อ) ผลของอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล รวมกับ Cyanex 923 ความเข้มข้น 0.04 โมล ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6

เวลา	ความเข้มข้นของไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)
10	1191.21	18	200
20	958.78	34	200
30	697.30	52	200
40	595.61	59	200
50	552.03	62	200
60	508.45	65	200
70	450.34	69	200
80	363.18	75	200
90	348.65	76	200
100	348.65	76	200
110	261.49	82	200
120	188.85	87	200
130	159.80	89	200
140	159.80	89	200
150	159.80	89	200

ตารางที่ ข-6 (ต่อ) ผลของอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล รวมกับ Cyanex 923 ความเข้มข้น 0.04 โมล ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6

เวลา	ความเข้มข้นของไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)
10	1205.74	17	250
20	987.84	32	250
30	726.35	50	250
40	639.19	56	250
50	581.08	60	250
60	537.50	63	250
70	493.92	66	250
80	435.81	70	250
90	406.76	72	250
100	377.70	74	250
110	348.65	76	250
120	290.54	80	250
130	261.49	82	250
140	261.49	82	250
150	246.96	83	250

ตารางที่ ข-6 (ต่อ) ผลของอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล รวมกับ Cyanex 923 ความเข้มข้น 0.04 โมล ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6

เวลา	ความเข้มข้นของไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)
10	1205.74	17	300
20	1002.36	31	300
30	755.40	48	300
40	668.24	54	300
50	639.19	56	300
60	581.08	60	300
70	552.03	62	300
80	479.39	67	300
90	450.34	69	300
100	421.28	71	300
110	392.23	73	300
120	334.12	77	300
130	334.12	77	300
140	334.12	77	300
150	334.12	77	300

ตารางที่ ข-6 (ต่อ) ผลของอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล รวมกับ Cyanex 923 ความเข้มข้น 0.04 โมล ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6

เวลา	ความเข้มข้นของไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)
10	1220.27	16	350
20	1031.42	29	350
30	784.46	46	350
40	740.88	49	350
50	697.30	52	350
60	653.72	55	350
70	624.66	57	350
80	610.13	58	350
90	581.08	60	350
100	522.97	64	350
110	464.86	68	350
120	464.86	68	350
130	464.86	68	350
140	464.86	68	350
150	435.81	70	350

ตารางที่ ข-6 (ต่อ) ผลของอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล รวมกับ Cyanex 923 ความเข้มข้น 0.04 โมล ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6

เวลา	ความเข้มข้นของไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการสกัด	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)
10	1249.32	14	400
20	1104.05	24	400
30	871.62	40	400
40	842.57	42	400
50	813.51	44	400
60	740.88	49	400
70	697.30	52	400
80	697.30	52	400
90	668.24	54	400
100	595.61	59	400
110	581.08	60	400
120	552.03	62	400
130	537.50	63	400
140	508.45	65	400
150	508.45	65	400

ตาราง ข-7 ผลขอเวลาการสกัดในเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์ต่อร้อยละของการสกัดและร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล รวมกับ Cyanex 921 ความเข้มข้น 0.04 โมล ในซีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน 6

เวลา	ความเข้มข้นของ ไอออนสารหนู ฝั่งสารละลายป้อนขา ออก (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการ สกัด	ความเข้มข้นของ สารหนูฝั่ง สารละลาย นำกลับ (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละของการ นำกลับ
10	871.62	40	159.80	11
20	682.77	53	203.38	14
30	610.13	58	217.91	15
40	552.03	62	246.96	17
50	508.45	65	290.54	20
60	435.81	70	305.07	21
70	334.12	77	319.59	22
80	232.43	84	348.65	24
90	203.38	86	392.23	27
100	174.32	88	435.81	30
110	130.74	91	435.81	30
120	116.22	92	435.81	30
130	116.22	92	435.81	30
140	116.22	92	435.81	30
150	116.22	92	435.81	30

ตาราง ข-8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อร้อยละของการสกัด

และร้อยละของการนำกลับ

สภาวะที่ทดลอง : สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมล รวมกับ
Cyanex 921 ความเข้มข้น 0.04 โมล ในคีโรซีน ค่าความเป็นกรด-เบส
ในสารละลายป้อน 6

ความเข้มข้นของไทโอ ยูเรีย (โมล)	ความเข้มข้นของ ไอออนสารหนู (ส่วนในพันล้านส่วน)	ร้อยละการนำกลับ
0.05	203.38	14
0.1	392.23	27
0.15	392.23	27
0.2	392.23	27
0.25	392.23	27
0.3	348.65	24
0.35	348.65	24
0.4	334.12	23
0.45	319.59	22
0.5	261.49	18

ตาราง ข-9 ผลคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ระหว่าง
Aliquat 336 และ Cyanex 921 ที่ความอัตราส่วนความ
เข้มข้นต่าง ๆ

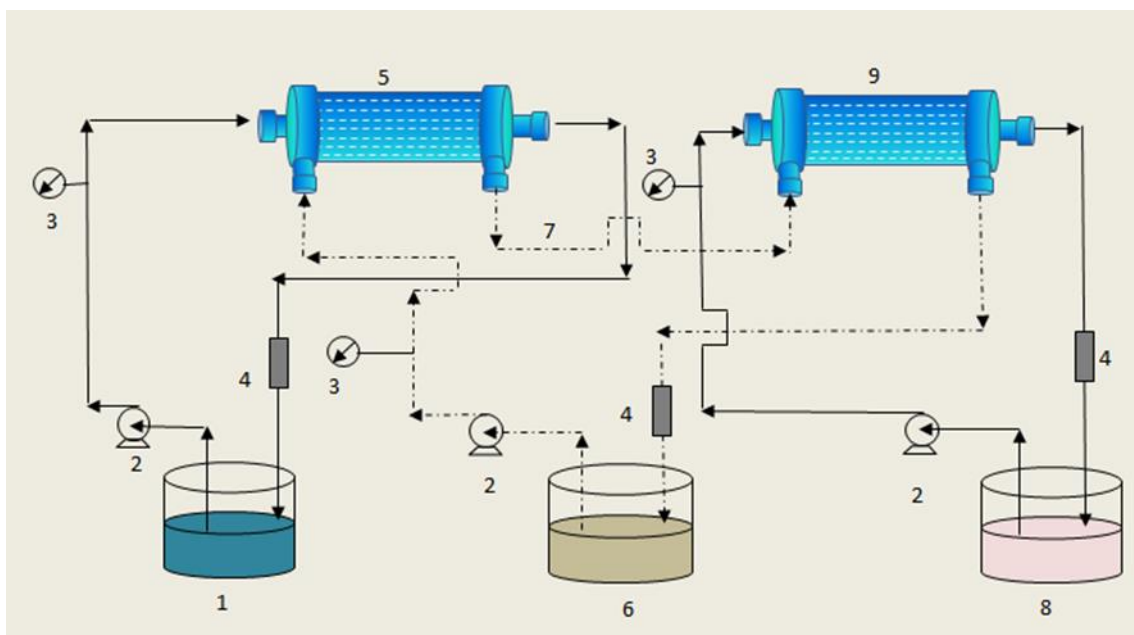
Aliquat 336	Cyanex 921 (โมล)			
(โมล)	0.02	0.04	0.06	0.08
0.1	0.019	0.151	0.116	0.140
0.2	0.077	0.169	0.117	0.148
0.3	0.111	0.184	0.126	0.170
0.4	0.118	0.325	0.133	0.184
0.5	0.124	0.264	0.138	0.172
0.6	0.194	0.322	0.142	0.180
0.7	0.209	0.284	0.144	0.176
0.8	0.218	0.277	0.136	0.173
0.9	0.260	0.269	0.130	0.170
1.0	0.249	0.249	0.123	0.164

ตาราง ข-10 ผลคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ระหว่าง
Aliquat 336 และ Cyanex 923 ที่ความอัตราส่วนความ
เข้มข้นต่าง ๆ

Aliquat 336	Cyanex 923 (โมล)			
(โมล)	0.02	0.04	0.06	0.08
0.1	0.016	0.039	0.005	0.001
0.2	0.026	0.046	0.027	0.040
0.3	0.044	0.054	0.031	0.057
0.4	0.051	0.062	0.036	0.059
0.5	0.058	0.053	0.041	0.065
0.6	0.062	0.069	0.053	0.071
0.7	0.064	0.078	0.062	0.075
0.8	0.069	0.076	0.070	0.086
0.9	0.079	0.085	0.075	0.071
1.0	0.072	0.080	0.101	0.048

ภาคผนวก ค

รูปของระบบปฏิบัติการแบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์แบบ 2 มอดูล



รูปที่ ค.1 ระบบเส้นใยกลางชนิดคอนแทคเตอร์แบบสองมอดูลโดยใช้ Celgard®x-30 240
 (1) ถังของสารละลายป้อน; (2) ปั๊ม ; (3) มาตรวัดความดัน; (4) มาตรวัดอัตราการไหล
 (5) คอนแทคเตอร์มอดูลที่ 1 สำหรับสกัด (6) ถังของสารละลายอินทรีย์; (7) ท่อของ
 สารละลายอินทรีย์ที่ออกจากมอดูลที่ 1 ต่อเข้ากับ มอดูลที่ 2 ; (8) ถังของสารละลาย
 น้ำกลั้บ; (9) คอนแทคเตอร์มอดูลที่ 2 (สำหรับสารละลายน้ำกลั้บ)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายชเนษณ์ วรบุตร

เกิด วันที่ 5 ตุลาคม 2525 ที่จังหวัดอำนาจเจริญ

การศึกษา

พ.ศ. 2538 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นประถมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย

จากโรงเรียนอนุบาลพนา (อุดมวิทยากร) จังหวัดอำนาจเจริญ

พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย

จากโรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช จังหวัดอุบลราชธานี

พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วศ.บ)

สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

พ.ศ. 2554 เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนสนับสนุนงานวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2556 รับทุนในโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม

(พวอ.)ระดับปริญญาโท (MSD5610016)

จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย