

การสกัดแยกไอออนปรอทในรูปของ $(\text{HgCl}_4)^{2-}$ ออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางและ การทำนายผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นายสินทร์ ยางทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

**SEPARATION OF MERCURY AS $(\text{HgCl}_4)^2$ FROM NATURAL GAS WELL PRODUCED
WATER VIA HFSLM AND PREDICTION BY MATHEMATICAL MODEL**

MR. YASIN YANGTHONG

**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 2011
Copyright of Chulalongkorn University**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดแยกไอออนปรอทในรูปของ $(\text{HgCl}_2)^2$ ออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและ การทำนายผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
โดย	นายศินทร์ ยางทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราธร มงคลศรี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกร รามกุล)

ยศินทร์ ยางทอง: การสกัดแยกไอออนปรอทในรูปของ $(\text{HgCl}_4)^{2-}$ ออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและ การทำนายผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. (SEPARATION OF MERCURY AS $(\text{HgCl}_4)^{2-}$ FROM NATURAL GAS WELL PRODUCED WATER VIA HFSLM AND PREDICTION BY MATHEMATICAL MODEL) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.อุรา ปานเจริญ, อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, 124 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการสกัดแยกไอออนปรอทในรูปของ $(\text{HgCl}_4)^{2-}$ ออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดและนำกลับไอออนปรอท อาทิเช่น ค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 และสารสกัด TOA ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ Thiourea และ อัตราการไหล โดยดำเนินการในระบบกะ ทั้งยังศึกษาถึงประสิทธิภาพของการใช้โมดูลเส้นใยกลวงแบบ 2 โมดูล จากผลการทดลองพบว่าระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล ให้ประสิทธิภาพการสกัดไอออนปรอทสูงกว่าการใช้ระบบการสกัดแบบ 1 โมดูล จากผลการทดลองพบว่า ในการทดลองที่ใช้สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้ง โมดูลที่ 1 และ 2 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ Thiourea เท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร และ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทสูงที่สุด คือ 99.89 และ 95.45 ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัดไอออนปรอทออกจากน้ำทิ้งได้ตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้มีแนวความคิดหลักจากการถ่ายโอน ณ สภาวะความเข้มข้นต่ำ ที่มีพฤติกรรมเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยมีค่าคงที่ของการสกัด (k_f) และค่าคงที่ในการนำกลับ (k_b) ที่สภาวะสมดุล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 215.43 และ 0.236 ตามลำดับ ในการทดลองการสกัดด้วย Aliquat 336 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายค่าความเข้มข้นปรอท ในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกได้อย่างแม่นยำ ในสภาวะคงตัวของกระบวนการ

ภาควิชา...วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา...วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา... 2554..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

##5270460021: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MERCURY / SEPARATION / HFSLM / NATURAL-GAS WELLS
PRODUCED WATER/MATHEMATIC MODEL

YASIN YANGTHONG: SEPARATION OF MERCURY AS $(\text{HgCl}_4)^{2-}$ FROM
NATURAL GAS WELL PRODUCED WATER VIA HFSLM AND PREDICTION BY
MATHEMATICAL MODEL. ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN,
D. Eng, Sc. D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. GOBBOON LOTHONGKUM, Ph.D.,
124 pp

Separation of mercury ions $(\text{HgCl}_4)^{2-}$ from natural gas well produced water through hollow fiber supported liquid membrane (HFSLM) is the main objective of this research. The several parameters were investigated: concentration of extractant (Aliquat 336 and TOA), concentration of HCl in feed solution, concentration of thiourea in stripping solution and flow rate. In addition, the separation system efficiency of 2 hollow fiber modules in batch system was also studied. As a result, the separation system of 2 modules obtains the efficiency of mercury ion separation higher than the separation system of 1 module also obtains. From the experiment, the maximum percentages of extraction and recovery at: 4% (v/v) Aliquat 336 in both the first and second hollow fiber modules, 0.2 M HCl in feed solution, 0.1 M thiourea as the stripping solution and the flow rate of 100 mL/min were 99.89% and 95.45%, respectively. The mercury level in feed decreased to below waste water discharge limit issued by Ministry of Industry, Thailand. For the mathematical model, the mass transfer at low concentration conditions with linear equation behavior is the main idea. At steady state condition, the constant of extraction (k_f) and recovery (k_r) as 215.43 and 0.236, respectively were achieved. The mathematical model can predict the concentration of mercury ions in the output feed and stripping at various times to be accurately obtained at steady state condition.

Department: Chemical Engineering Student's Signature.....
Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature.....
Academic Year: 2011 Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เกิดขึ้นได้จาก ความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างมากจึงขอกล่าวขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอย สั่งสอน ตักเตือนเมตตา ข้าพเจ้า ตลอดจนคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธารธร มงคลศรี ประธานกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประกร รามกุล กรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำชี้แนะซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้สัญญาเลขที่ **MRG-WI535E004** ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ คุณ เศรษฐา จตุระบุค และ บริษัท ซาลามานเดอร์ เอนเนอจี้ จำกัด (โครงการบัวหลวง) ที่ได้อนุเคราะห์นำทิ้งจากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ และ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ได้อนุเคราะห์สารเคมีและเครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ปัทมวิคกคา รวมทั้งรุ่นพี่ และเพื่อนๆ ทุกคนจากห้องวิจัย **Separation Technology** รวมถึงเพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยช่วยเหลือ คอยให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และ ครอบครัว ที่ได้ให้กำเนิด คอยเลี้ยงดูอบรม สั่งสอน ปลูกฝังความคิดต่างๆ ตลอดจนสนับสนุนทุนในการศึกษาของข้าพเจ้า

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
สัญลักษณ์.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ปรอท.....	3
1.21 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท.....	3
1.22 การใช้ประโยชน์ของปรอท.....	5
1.23 สารปรอทและความเป็นพิษ.....	6
1.3 กระบวนการแยกมวลสาร.....	7
1.31 กระบวนการไดอะไลซิส.....	8
1.32 กระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส.....	8
1.33 กระบวนการอัลตราฟิวเตรชัน.....	8
1.34 กระบวนการไมโครฟิวเตรชัน.....	9
1.35 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	10
1.36 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	10
1.361 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ.....	11
1.362 เยื่อแผ่นเหลวที่พองบนตัวรองรับ.....	13
1.4 สารสกัด.....	15
1.41 สารสกัดชนิดกรด.....	15
1.42 สารสกัดชนิดเบส.....	16

	หน้า
1.43 สารสกัดชนิดกลาง.....	17
1.5 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	18
1.51 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนปรอท.....	18
1.52 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนโลหะ.....	20
1.6 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	23
1.7 ขอบเขตงานวิจัย.....	23
1.8 ระเบียบวิธีวิจัยโดยย่อ.....	24
1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	24
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	25
21 กลไกการถ่ายเทมวล.....	25
21.1 การถ่ายโอนมวลอย่างง่าย.....	25
21.1.1 การแพร่ซึมอย่างง่ายที่มีสารสกัด.....	25
21.1.2 การแพร่ซึมอย่างง่ายที่มีสารสกัดและปฏิกิริยาเคมี.....	26
21.2 การถ่ายเทแบบสวนทาง.....	27
21.3 การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน.....	28
22 ทฤษฎีการออกแบบจำลองการถ่ายโอนมวล.....	29
221 สมมติฐานการออกแบบจำลองการถ่ายโอนมวล.....	31
222 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในการสกัดแบบ 1 โมดูล.....	31
223 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในการสกัดแบบ 2 โมดูล.....	33
23 ขั้นตอนการสร้างสมการความสัมพันธ์.....	34
231 สมการความสัมพันธ์การสกัดและการนำกลับไอออนโลหะใน 1 โมดูล.....	34
232 สมการความสัมพันธ์การสกัดและการนำกลับไอออนโลหะใน 2 โมดูล.....	35
24 สมบัติที่ปริมาณสารสัมพันธ์ และ อันดับของปฏิกิริยา.....	37
25 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Pancharoen และคณะ.....	41

บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	44
31 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	44
32 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	45
321 การทดลองด้วยวิธี Solvent Extraction	45
322 การทดลอง Hollow Fiber Supported Liquid Membrane	45
33 วิธีการทดลอง.....	46
331 ศึกษาความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลสารโปรตีนในแต่ละวัฏภาค ณ สภาวะสมดุลด้วยวิธี Solvent Extraction	46
332 ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกใน สารละลายป้อนต่อ การสกัดและนำกลับไอออนโปรท.....	47
333 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายอินทรีย์ต่อการสกัด และนำกลับไอออนโปรท.....	48
334 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ Thiourea ต่อการสกัด และนำกลับไอออนโปรทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	49
335 ศึกษาผลของอัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับต่อการสกัดและ นำกลับไอออนโปรทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	50
336 ศึกษาผลของระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล ต่อการสกัดและนำกลับ ไอออนโปรทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	52
34 ขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลวง.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	54
41 ผลการทดลอง.....	55
41.1 ผลของความเป็นกรดในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนโปรทด้วย เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	55
41.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายอินทรีย์ต่อการสกัดและ นำกลับไอออนโปรท ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	57
41.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ Thiourea ต่อการสกัดและ นำกลับไอออนโปรทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	60

41.4	ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่าน โมดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอท.....	62
41.5	ผลของระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล ต่อการสกัดและนำกลับไอออน ปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	64
41.6	สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ และ อันดับของปฏิกิริยา.....	66
42	การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	69
421	ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลสารปรอทในแต่ละวัฏภาค ณ สภาวะ สมดุลด้วยวิธี Solvent Extraction	69
422	การทำนายผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการสกัดไอออนปรอท ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบ 1 โมดูล.....	72
423	การทำนายผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการสกัดไอออนปรอท ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบ 2 โมดูล.....	75
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง.....	82
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	82
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	85
	รายการอ้างอิง.....	86
	ภาคผนวก.....	91
	ภาคผนวก ก. สูตรการคำนวณและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา.....	92
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ.....	97
	ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณ.....	114
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	124

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	สมบัติทางกายภาพของปรอท..... 5
ตารางที่ 1.2	รูปแบบทางเคมีและความเป็นพิษของปรอท..... 7
ตารางที่ 1.3	แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนปรอทโดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว..... 22
ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 44
ตารางที่ 3.2	สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลวง โพลีโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง..... 46
ตารางที่ 4.1	สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการสกัดของไอออนปรอทด้วยสารสกัด Aliquat 336 67
ตารางที่ ข-1	ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด Aliquat 336 97
ตารางที่ ข-2	ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA 98
ตารางที่ ข-3	ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท..... 99
ตารางที่ ข-4	ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท..... 100
ตารางที่ ข-5	ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Thiourea ในสารละลายนำกลับต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด Aliquat 336 101
ตารางที่ ข-6	ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Thiourea ในสารละลายนำกลับต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA 102
ตารางที่ ข-7	ผลการทดลองการศึกษาผลของอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่าน โมดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด Aliquat 336 103

ตารางที่ ข-8	ผลการทดลองการศึกษาผลของอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่าน โมดูลของเส้นใยกลางต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA.....	104
ตารางที่ ข-9	ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้น ไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการสำหรับการทดลองที่ใช้สารสกัด Aliquat 336.....	105
ตารางที่ ข-10	ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้น ไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการสำหรับการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA.....	106
ตารางที่ ข-11	ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้น ไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการสำหรับการทดลองที่ใช้ระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล โดยใช้สารสกัด Aliquat 336.....	107
ตารางที่ ข-12	ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้น ไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการสำหรับการทดลองที่ใช้ระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล โดยใช้สารสกัด TOA.....	108
ตารางที่ ข-13	ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้น ไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการสำหรับการทดลองที่ใช้ระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และสารสกัด TOA ใน โมดูลที่ 2.....	109
ตารางที่ ข-14	ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้น ไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการสำหรับการทดลองที่ใช้ระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล โดยใช้สารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และสารสกัด Aliquat 336 ใน โมดูลที่ 2.....	110
ตารางที่ ข-15	ผลการคำนวณความเข้มข้น ไอออนปรอทขาออกของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจากข้อมูลของการทดลองการสกัดไอออนปรอทด้วยสารสกัด Aliquat 336 และ สารสกัด TOA ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	111

ตารางที่ ข-16	ผลการคำนวณความเข้มข้นไอออนปรอทขาออกของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจากข้อมูลของการทดลองการสกัดไอออนปรอทในการสกัดแบบ 2 โมดูล ด้วยสารสกัด Aliquat 336 และ สารสกัด TOA ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	112
ตารางที่ ข-17	ผลการคำนวณความเข้มข้นไอออนปรอทขาออกของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจากข้อมูลของการทดลองการสกัดไอออนปรอทในการสกัดแบบ 2 โมดูล ด้วยสารสกัด Aliquat 336 และ สารสกัด TOA ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	113

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 เชื้อแผ่นเหลวอีมีลชัน.....	11
รูปที่ 1.2 ระบบของเชื้อแผ่นเหลวที่ขมแบบอาศัยกระแสไฟฟ้า.....	12
รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลาย นำกลับบนเส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเชื้อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลวง	15
รูปที่ 2.1 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของค์ประกอบในการสกัดอย่างง่าย.....	26
รูปที่ 2.2 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของค์ประกอบในการสกัดอย่างง่ายที่มีสารสกัดและ ปฏิกิริยาเคมี.....	27
รูปที่ 2.3 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของ ไอออน โลหะและไฮโดรเนียมไอออนของการถ่ายเท แบบสวนทาง	28
รูปที่ 2.4 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของ ไอออน โลหะและไฮโดรเนียมไอออนของการถ่ายเท แบบทางเดียวกัน.....	29
รูปที่ 2.5 รูปแบบสมดุลการเคลื่อนที่ของ I ระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อน (F) และวัฏภาค เชื้อแผ่นเหลว (M) จากเวลา j-1 และ j.....	30
รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเชื้อแผ่น เหลว.....	31
รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคสารละลายนำกลับกับวัฏภาคเชื้อ แผ่นเหลว.....	32
รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการถ่ายโอนมวลภายในระบบการสกัด ไอออนโลหะด้วยเชื้อแผ่น เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในการสกัดแบบ 1 โมดูล.....	32
รูปที่ 2.9 แสดงกระบวนการถ่ายโอนมวลภายในระบบการสกัด ไอออนโลหะด้วยเชื้อแผ่น เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในการสกัดแบบ 2 โมดูล.....	33
รูปที่ 2.10 แสดงความเข้มข้นในแต่ละตำแหน่งของการถ่ายโอนมวล.....	38
รูปที่ 2.11 การถ่ายเทมวลของ ไอออนโลหะในเส้นใยกลวง.....	41
รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารสกัด Aliquat 336 และ TOA.....	44
รูปที่ 3.2 โมดูลของเชื้อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง.....	45

รูปที่ 33 แสดงการทดลองด้วยการไหลแบบ **counter-current** สำหรับการดำเนินการระบบแบบกะ (**Batch system**) ในเชื้อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง..... 50

รูปที่ 34 แสดงการทดลองด้วยการไหลแบบ **counter-current** สำหรับการดำเนินการระบบแบบกะ (**Batch system**) ในเชื้อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง แบบ 2 โมดูล..... 51

รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อ ร้อยละการสกัดและน้ำกลับไอออนโปรท สภาพะการทดลอง: ความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336 = 3%** โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายน้ำกลับ **Thiourea = 0.3** โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและน้ำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที..... 56

รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อ ร้อยละการสกัดและน้ำกลับไอออนโปรท สภาพะการทดลอง: ความเข้มข้นสารสกัด **TOA = 3%** โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายน้ำกลับ **Thiourea = 0.3** โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและน้ำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที..... 56

รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด **Aliquat 336** ในเชื้อแผ่นเหลวต่อ ร้อยละการสกัดและน้ำกลับไอออนโปรท สภาพะการทดลอง: ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = **0.2** โมลต่อลิตร โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายน้ำกลับ **Thiourea = 0.3** โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและน้ำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที..... 58

รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด **TOA** ในเชื้อแผ่นเหลวต่อ ร้อยละการสกัดและน้ำกลับไอออนโปรท สภาพะการทดลอง: ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = **0.2** โมลต่อลิตร โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายน้ำกลับ **Thiourea = 0.3** โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและน้ำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที..... 59

- รูปที่ 45 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ **Thiourea** ในสารละลายนำกลับต่อ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = **0.2** โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336** = **4%** โดยปริมาตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที..... 60
- รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ **Thiourea** ในสารละลายนำกลับต่อ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = **0.2** โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด **TOA** = **2%** โดยปริมาตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที..... 61
- รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = **0.2** โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336** = **4%** โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ **Thiourea** = **0.1** โมลต่อลิตร และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที..... 62
- รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = **0.2** โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด **TOA** = **2%** โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ **Thiourea** = **0.2** โมลต่อลิตร และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที..... 63
- รูปที่ 49 ความสัมพันธ์ของรูปแบบระบบการสกัดแบบ **1** โมดูล และ **2** โมดูลกับ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท..... 66
- รูปที่ 410 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log[HCl]$ กับ $\log J$ 67
- รูปที่ 411 แสดงความสัมพันธ์ของส่วนกลับของความเข้มข้นไอออนปรอทในสารละลายป้อนกับเวลาของกระบวนการ ณ ปฏิกริยาอันดับ **2**..... 68
- รูปที่ 412 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลของไอออนปรอทระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่สภาวะสมดุล ในการสกัดด้วยสารสกัด **Aliquat 336** โดยเทคนิค **Solvent Extraction**..... 69

รูปที่ 413 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลของไอออนโปรทระหว่างวัฏภาคสารละลาย นำกลับ กับวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวที่สภาวะสมดุล ในการสกัดด้วยสารสกัด Aliquat 336 โดยเทคนิค Solvent Extraction	70
รูปที่ 414 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลของไอออนโปรทระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อน กับวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวที่สภาวะสมดุล ในการสกัดด้วยสารสกัด TOA โดยเทคนิค Solvent Extraction	71
รูปที่ 415 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลของไอออนโปรทระหว่างวัฏภาคสารละลาย นำกลับ กับวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวที่สภาวะสมดุล ในการสกัดด้วยสารสกัด TOA โดย เทคนิค Solvent Extraction	72
รูปที่ 416 ผลการทำนายความเข้มข้นของไอออนโปรทในสารละลายป้อนและสารละลาย นำกลับขาออกด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	75
รูปที่ 417 ผลการทดลองและผลการทำนายความเข้มข้นของไอออนโปรทในสารละลาย ป้อนขาออกเทียบกับเวลาในการสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล ด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	78
รูปที่ 418 ผลการทดลองและผลการทำนายความเข้มข้นของไอออนโปรทในสารละลาย นำกลับขาออกเทียบกับเวลาในการสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล ด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	81

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

$C_{f,in}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาเข้า
$C_{f,out}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาออก
$C_{s,in}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับขาเข้า
$C_{s,out}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับขาออก
D	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
r	รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน
Y_f	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อน
X_f	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารสกัดบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับวัฏภาคสารละลายป้อน
Y_s	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายนำกลับ
X_s	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารสกัดบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ
k_f	ค่าคงที่สมดุลในการถ่ายโอนมวล
k_s	ค่าคงที่สมดุลในการถ่ายโอนมวล
V_f, V_s	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับตามลำดับ
V_{fb}, V_{sb}, V_m	ปริมาตรสุทธิในกระบวนการของสารละลายป้อน สารละลายนำกลับ และสารสกัดตามลำดับ
Y_{Rf-1}	ความเข้มข้นของสารละลายป้อนใน residual ก่อนป้อนเข้าสู่กระบวนการ
Y_{Rs-1}	ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับใน residual ก่อนป้อนเข้าสู่กระบวนการ

อักษรกรีก

e	ความพรุนของเส้นใยกลวง
p	ค่าคงที่ในสมการของ Stokes และ Einstein มีค่า 3.1416
h	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ตัวห้อย

<i>f</i>	สารละลายป้อน
<i>s</i>	สารละลายนำกลับ
<i>m</i>	สารละลายเชื้อแผ่นเหลว
R	residual
T	Total
In	ขาเข้า
Out	ขาออก
A	โมดูล A
B	โมดูล B
i	จำนวนวัฏจักรในกระบวนการ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

โลหะปรอทจัดเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีพิษร้ายแรงส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศ โดยสาเหตุส่วนหนึ่งของการปนเปื้อนของโลหะปรอทมาจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม ซึ่งอุตสาหกรรมสำคัญที่มีไอออนปรอทปนเปื้อนในกระบวนการผลิตคือ อุตสาหกรรมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติและน้ำมันปิโตรเลียม เพราะในชั้นของแหล่งน้ำมันมักจะมีชั้นของน้ำอยู่ใต้ชั้นของไฮโดรคาร์บอน โดยชั้นน้ำดังกล่าวจะถูกดูดขึ้นมาพร้อมกับน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ จากการสำรวจแหล่งขุดเจาะก๊าซธรรมชาติและน้ำมันปิโตรเลียมที่สำคัญของประเทศไทย ในบริเวณอ่าวไทย พบว่าจะมีน้ำจากกระบวนการขุดเจาะ (**Produce water**) ประกอบอยู่ประมาณ 90,000 บาร์เรลต่อวัน และมีการปนเปื้อนของสารปรอทในน้ำประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (**Gallup และ Strong 2007**) ซึ่งเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมที่กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของสารปรอทในน้ำทิ้งมีค่าไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร (**Ministry of Industry Thailand, 1996**)

โดยทั่วไปปรอทที่พบในหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติมักจะอยู่ในรูปของธาตุปรอท (Hg^0) (**Gallup and Strong 2007**) และในรูปสารประกอบของปรอท อาทิเช่น CH_3HgCH_3 , $C_2H_5HgC_2H_5$, $ClHgCH_3$ และ $HgCl_2$ (**Corvini และคณะ, 2007**) ทั้งนี้ธาตุปรอท (Hg^0) ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวเป็นสารประกอบได้อย่างง่ายกับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในธรรมชาติ ได้แก่ **Methylmercury** (CH_3Hg^+) และ **Dimethylmercury** (CH_3HgCH_3) ซึ่ง **Methylmercury** เป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ สามารถสะสมในสาหร่าย ปลา รวมทั้งสามารถส่งทอดความเป็นพิษไปตามห่วงโซ่อาหาร (**Huggett, 2001**) ในส่วนของ **Dimethylmercury** ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นสารประกอบที่ไม่เสถียรและมักจะถูกเปลี่ยนเป็น **Methylmercury** ในที่สุด สำหรับสารปรอทและสารประกอบอื่นๆ ที่มีปรอทเป็นองค์ประกอบ อยู่่นั้นเป็นสารที่มีพิษร้ายแรงมาก อันเนื่องมาจากสารดังกล่าวสามารถดูดซึมผ่านเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ (**Souza de Assis และคณะ, 2003**) ได้ทั้งทางระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร และซึมผ่านทางผิวหนัง (**Bucio, 1995**) รวมถึงยังสามารถสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ของร่างกาย ซึ่งสารปรอท ที่มีพิษร้ายแรงที่สุดพบว่าจะอยู่ในรูปของสารประกอบ ได้แก่ เมทิลเมอร์คิวรี (CH_3Hg^+) และเมอร์คิวริกคลอไรด์ ($HgCl_2$) โดยเฉพาะในสารประกอบเมอร์คิวริกคลอไรด์นั้นสามารถระเหิดและมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง (**Samento, 2004**) เมื่อ

ร่างกายได้รับสารปรอทจากช่องทางต่างๆ สารปรอทมักจะทำความเสียหายกับเนื้อเยื่อในส่วนของตับ ปอด และระบบประสาท (Counter, 2004) รวมทั้งยังสามารถทำลายระบบภูมิคุ้มกันร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Moreira และคณะ, 2003) และสัตว์จำพวกปลา (Huggett, 2001) ในส่วนของมนุษย์สารปรอทกระจายเข้าสู่เซลล์สมองซึ่งจะระงับการสื่อสารของเซลล์สมอง (Seixas, 2005) เป็นผลให้เกิดอาการบกพร่องทางการมองเห็น จิตใจ การสื่อสาร การควบคุมส่วนต่างๆ ของร่างกาย และอาจเกิดการหมดสติอันเนื่องมาจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสมอง (Betti และคณะ, 1992)

จากผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยอันเนื่องมาจากการได้รับสารปรอทที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ จึงมีการคิดค้น พัฒนา และวิจัยเพื่อหาวิธีการต่างๆ ในการกำจัดสารปรอท โดยวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดสารปรอทออกจากรูปร่างที่ได้อาจจากการขุดเจาะก๊าซธรรมชาติและอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับสารปรอท ได้แก่ เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) (Gubbuk และคณะ, 2010) แต่เทคนิคนี้มักมีข้อเสียของค่าการเลือกสกัด (Selectivity) ที่จำกัด รวมถึงอัตราการสกัดที่ช้ามากจนส่งผลให้ต้องใช้สารสกัดและพื้นที่ในการถ่ายเทมวลสูง, วิธีการกรองสารประกอบปรอทโดยใช้เมมเบรนชนิด Ultrafiltration (Lu and Schroeder, 1999) แต่มักจะเกิดปัญหาการสะสมของอนุภาคแขวนลอยที่อุดตันอยู่บริเวณเยื่อกรอง, วิธีการสกัดด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) (Dujardin และคณะ, 2000), วิธีการสกัดด้วยการดูดซับ (Adsorption) (Wang และคณะ, 2011), เทคนิคการสกัดในวัฏภาคของแข็ง (Solid phase extraction) (Chai และคณะ, 2010) และเทคนิคการอัดน้ำที่มีสารปรอทปนเปื้อนกลับเข้าไปในหลุมขุดเจาะซึ่งมักจะมีข้อจำกัดของลักษณะทางกายภาพของหลุมขุดเจาะรวมถึงค่าใช้จ่ายในการจัดการที่เกิดขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นตลอดจนการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการแยกไอออนปรอทจากน้ำทิ้งในการขุดเจาะก๊าซธรรมชาติและน้ำมันปิโตรเลียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow fiber supported liquid membrane) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการแยกมวลสาร ณ ความเข้มข้นต่ำ (Lothongkum และคณะ, 2009) เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงมีค่าการคัดเลือกสูง สามารถสกัดและนำกลับได้ในขั้นตอนเดียว (Pancharoen และคณะ, 2009) ใช้สารสกัดในปริมาณน้อย มีอัตราการถ่ายโอนมวลสูง (Ramakul และคณะ, 2009) ใช้พลังงานในปริมาณต่ำ ค่าการดำเนินการต่ำ และสามารถดัดแปลงการใช้งานและขยายขนาดได้ง่าย (Van de Voorde และคณะ, 2004) โดยเทคนิคดังกล่าวเป็นการประยุกต์มาจากเทคนิคการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาครอบคลุมไปถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการถ่ายโอนมวลที่ สภาวะสมดุลซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในรูปชุดสมการทางคณิตศาสตร์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้พัฒนามาจากหลักการของ McCabe-Thiele

Diagram ที่มีวิธีการพื้นฐานมาจากสมมูลมวลสาร ณ สภาวะสมดุล (McCABE, 2005) ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรต่างๆ กับความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อน เยื่อแผ่นเหลว และสารละลายนำกลับ เพื่อให้แบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้ทำนายผลการสกัด ณ ช่วงเวลาการสกัด และทำนายประสิทธิภาพการสกัดที่สภาวะคงตัวของกระบวนการสกัด สำหรับนำไปใช้ทำนายผลการสกัดและประสิทธิภาพการสกัดของไอออนโลหะชนิดอื่น ๆ แทนการทดลองต่อไป

1.2 ปรอท

1.2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท

ปรอทเป็นธาตุที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่อดีต โดยถูกนำมาใช้ในอาณาจักรอียิปต์โบราณตั้งแต่ 1,500 ปีก่อนคริสตกาล และถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ในประเทศจีนและทิเบตโบราณ ปรอทเป็นธาตุลำดับที่ 80 ในตารางธาตุมีสัญลักษณ์คือ Hg อยู่ในกลุ่มของโลหะทรานสิชัน หมู่ 2B อยู่แถวท้ายสุดของแถว d ในตารางธาตุ โดยทั่วไปปรอทอาจอยู่ในรูปของโลหะ (Metallic form) บริสุทธิ์ในสภาวะของเหลวที่มีความหนาแน่นสูงและไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก รวมถึงอาจอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ (Organic Mercury Compound) หรือในรูปของสารอนินทรีย์ (Inorganic Mercury compound) ปรอทที่อยู่ในรูปของโลหะ โดยส่วนมากจะบริสุทธิ์และไม่ผสมกับสารอื่นแต่สามารถเกิดเกลือเป็นสารประกอบเฮไลด์ได้โดยสารประกอบเฮไลด์ที่สำคัญคือ เมอร์คิวรัสคลอไรด์ (Mercurous Chloride) มีสูตร Hg_2Cl_2 มีลักษณะเป็นตะกอนสีขาว สามารถละลายน้ำได้ $HgCl_2$ เป็น โมเลกุลโคเวเลนต์ หลอมเหลวแล้วไม่นำไฟฟ้า และสามารถระเหิดได้ง่าย แต่เมื่ออยู่ในสารละลายมักจะไม่ค่อยแตกตัวเป็นไอออน ดังนั้นในการเตรียมไอออนปรอทจากสารประกอบ $HgCl_2$ ต้องใช้สารละลายกรด เช่น สารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เป็นตัวทำละลาย โดยสารประกอบของปรอทมักมีเลขออกซิเดชันได้ทั้ง +1 และ +2 โดยเมื่อเลขออกซิเดชันเป็น +1 สารประกอบนั้นจะถูกเรียกว่า เมอร์คิวรัส (Mercurous) เมื่อเป็น +2 เรียกว่า เมอร์คิวริก (Mercuric) อย่างไรก็ตามสารประกอบเมอร์คิวรัสมีปรอทสองอะตอมอยู่คู่กันเสมอ เรียกว่าเกิดเป็นไดเมอร์ (Dimer) ดังนั้นเมื่อสารเมอร์คิวรัสละลายน้ำจะอยู่เป็นประจักษ์เสมอคือเป็น Hg_2^{2+} แต่สมบัติทางเคมีอื่นๆ คล้ายคลึงกับประจักษ์เดี่ยวทั่วไป ส่วนสารประกอบเฮไลด์ของปรอท

ที่เสถียรในรูปสารละลายได้แก่ Hg_2X_2 ($X = Cl, Br, I$) อาจพบเป็นแร่อิสระหรือพบในรูปของ HgS ซึ่งมีสีแดงกระจายอยู่ในเนื้อหินที่เรียกว่า 'Cinnabar' โดยลักษณะดังกล่าวมักพบอยู่ในธรรมชาติ

โดยทั่วไปปรอทที่พบในก๊าซธรรมชาติจะอยู่ในรูปของธาตุปรอท ($Hg(0)$) (Gallup and Strong 2007) และสารประกอบของปรอทเช่น CH_3HgCH_3 , $C_2H_5HgC_2H_5$, $ClHgCH_3$ และ $HgCl_2$ (Corvini และคณะ, 2007) โดย $Hg(0)$ สามารถรวมเป็นสารประกอบ (Complex) กับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้อย่างแข็งแรง จากนั้นจึงตกตะกอนรวมกับตะกอนอื่นๆ ปรอท ($Hg(0)$) จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น Bivalent (Hg^{2+}) โดย Hg^{2+} จะถูกเปลี่ยนไปเป็น Methylmercury (CH_3Hg^+) และ Dimethylmercury (CH_3HgCH_3) ในขณะที่ Methylmercury จะจมอยู่ในน้ำ และสะสมในปลา สัตว์น้ำ และสิ่งมีชีวิตอื่นที่อาศัยอยู่ในน้ำ ส่วน Dimethylmercury จะไม่เสถียรและจะถูกเปลี่ยนไป Methylmercury ในที่สุด

ปรอทจะอยู่ในสถานะของเหลว มีความหนืดต่ำ ระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายและมักจะอยู่ในสภาพเป็น Mono atomic ในอุณหภูมิห้อง ปรอทมีจุดหลอมเหลวต่ำ มีจุดเดือดสูง สามารถละลายในน้ำได้ดีกว่าโลหะอื่น และจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มออกซิเจนลงไป สามารถกลายเป็นไอได้ง่ายจากสาเหตุที่ว่าปรอทมี Inter atomic force ต่ำมาก นอกจากนี้ปรอทยังละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เช่น นอร์มัลเฮกเซน ($2.7 \times 10^{-7} g/100 g$ ที่ $40^\circ C$) ในเบนซีน ($2.0 \times 10^{-7} g/100 g$ ที่ $20^\circ C$) ในเมทานอล ($3.6 \times 10^{-7} g/100 g$ ที่ $63^\circ C$) และในไดออกเซน ($7.0 \times 10^{-7} g/100 g$ ที่ $25^\circ C$) ปรอททำปฏิกิริยากับฮาโลเจนโดยตรงที่อุณหภูมิห้องแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ถ้าที่อุณหภูมิ $350^\circ C$ จะได้ HgO ปรอทไม่ทำปฏิกิริยากับไฮโดรด์ของ $HF, HCl, H_2S, NH_3, PH_3$ และ AsH_3 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $200^\circ C$ แต่ทำปฏิกิริยากับ HBr, HI ที่อุณหภูมิห้อง สมบัติต่างๆ ทางกายภาพของปรอทแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สมบัติทางกายภาพของปรอท

สมบัติทางกายภาพ	ค่าที่วัดได้
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)	200.59
จุดหลอมเหลว (Melting Point, °C)	-38.87
H_{FUSION} , (Enthalpy of Fusion, kcal mole ⁻¹)	0.5486
S_{FUSION} , (Entropy of Fusion, cal deg ⁻¹ mole ⁻¹)	2.37
จุดเดือด (Boiling Point, °C)	356.57
ความดันไอ (Vapor Pressure)	1 mmHg ที่ 126°C, 10 mmHg ที่ 184°C, 100 mmHg ที่ 261°C
ความหนาแน่น (Density)	13.534 g/cm ³ ที่ 25°C
ค่าการละลายน้ำ (Solubility in Water 100 g)	6x10 ⁶ g ที่ 25°C
Ohmic resistance	95.76x10 ⁸ ohm m ที่ 20°C
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	13.545

1.2.2 การใช้ประโยชน์ของปรอท

ปรอทมักจะใช้ในการผลิตเคมีทางอุตสาหกรรมหรือในการประยุกต์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ก็มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นเช่น

- ใช้เป็นโลหะผสมในกระบวนการอุดฟัน
- **Mercury(I) chloride** เคยถูกใช้เป็นส่วนประกอบในสารฆ่าเชื้อ
- ปรอทบริสุทธิ์ในรูปของเหลวถูกใช้ในเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ เครื่องวัดความดันเลือด บาริโอมิเตอร์ปรอท ปัมป์สุญญากาศ (**Diffusion pump**) เครื่องวัดปริมาณไฟฟ้า, และอุปกรณ์ห้องปฏิบัติการอื่นๆ
- สารประกอบปรอท **Thimerosal** ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ถูกใช้เป็นสารกันบูดในวัคซีน และหมึกสำหรับทำรอยสัก (**Thimerosal in vaccines**)
- จุด **triple point** ของปรอท คือ -38.8344 °C ถูกใช้เป็นอุณหภูมิมาตรฐานสำหรับมาตราอุณหภูมินานาชาติ (**International Temperature Scale, ITS-90**)

- เป็นส่วนประกอบในหลอดอิเล็กตรอนบางชนิด รวมถึงเครื่องปรับกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง (**Mercury arc rectifier**)

1.2.3 สารปรอทและความเป็นพิษ

เนื่องจากโลหะปรอทสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบได้ทั้ง รูปสารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบอนินทรีย์ พิษของสารปรอทจึงมีลักษณะแตกต่างกันไปตามรูปของสารประกอบนั้นๆ โดยสารประกอบอินทรีย์ของปรอท (**Organo Mercury Compound**) เป็นสารประกอบปรอทที่เป็นพิษมากที่สุด อาทิเช่น สารประกอบจำพวกอัลคิลเมอร์คิวรี (**Alkyl Mercury**) ซึ่งได้แก่ เมทิลเมอร์คิวรี ที่มีพิษและความสามารถในการจัดขวางปฏิกิริยาในร่างกายได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังมีสารประกอบจำพวก **Aryl mercury** โดยเฉพาะ **CH₃Hg⁺** (**Methyl Mercury**) ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายได้ดีในไขมัน ซึ่งเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ร่างกายสามารถดูดซึม **Methyl mercury** ในทางเดินอาหารได้สูงถึง **95-98%** แต่ร่างกายสามารถขับออกมาเป็นของเสียได้น้อยมาก ปรอทรูปนี้ยังมีความสามารถในการยึดติดกับเม็ดเลือดแดงและแพร่กระจายไปยังทุกส่วนของร่างกาย โดยพบว่าประมาณ **15%** มักจะถูกสะสมอยู่ในสมอง เนื่องจากสารประกอบดังกล่าวสามารถผ่านเนื้อเยื่อ **Blood-brain Barrier (BBB)** ที่ช่วยป้องกันไม่ให้สารพิษผ่านจากกระแสโลหิตเข้าสู่เนื้อเยื่อสมองในส่วนของระบบประสาทส่วนกลาง สารปรอทอินทรีย์จึงสามารถทำอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลางได้อย่างถาวร โดยส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในสมองส่วนเซเลเบลลัม (**Cerebellum**) และเซเลเบลคอร์เทกซ์ (**Cerebral Cortex**) ซึ่งทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อสมองส่วนที่ควบคุมการมองเห็นและความรู้สึก ทำให้ผู้รับสารปรอทมีอาการผิดปกติเกี่ยวกับระบบประสาทการมองเห็นและความรู้สึก

ในส่วนสารประกอบปรอทที่อยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ที่สำคัญได้แก่ เมอร์คิวรัสคลอไรด์ (**Mercurous Chloride, Hg₂Cl₂**) ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนสีขาวมีพิษอย่างร้ายแรง เรียกว่าคาโลเมล (**Calomel**) ซึ่งสามารถระเหิดได้และมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง แต่ถูกดูดซึมผ่านทางเดินอาหารได้น้อย ส่วนปรอทในรูปโลหะสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังและลมหายใจได้ง่ายปรอทรูปที่อันตรายต่อชีวิตมนุษย์มากที่สุดคือ ในรูปไอระเหยซึ่งสามารถทำให้เกิดพิษเฉียบพลันถ้าหายใจเข้าไปในช่วง **1,200-8,500** ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพราะฉะนั้นความเป็นพิษของสารปรอทมักขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีที่ปรากฏในสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ **1.2**

ตารางที่ 1.2 รูปแบบทางเคมีและความเป็นพิษของปรอท

รูปแบบ	ความเป็นพิษ
Hg	โลหะปรอทบริสุทธิ์: ค่อนข้างเฉื่อยและไม่เป็นพิษแต่ไอปรอทเป็นพิษอย่างร้ายแรงเมื่อสูดเข้าไป
Hg ₂ ²⁺	ประจุมอร์คิวรัส: ไม่ละลายน้ำ สามารถรวมตัวเป็นสารประกอบคลอไรด์ มีความเป็นพิษน้อย
Hg ²⁺	ประจุมอร์คิวริก: เป็นพิษ มีสัมพรรคภาพ (Affinity) สูงกับกลุ่มไทออล (Thiol Group, SH) สามารถจับตัวกับซัลเฟอร์ในเม็ดเลือดแดง เซรัม (Serum) และในโปรตีนชนิดต่างๆ แต่ไม่สามารถที่จะเคลื่อนย้ายข้ามเนื้อเยื่อกีดกัน เช่น Blood-brain Barrier ได้ สะสมและทำอันตรายต่อไต
RHg ⁺	สารปรอทอินทรีย์เชิงเดี่ยว: ความเป็นพิษสูงโดยเฉพาะ CH ₃ Hg ⁺ (Methyl Mercury) ทำลายระบบประสาทและสมองอย่างถาวร สามารถเคลื่อนย้ายข้ามเนื้อเยื่อกีดกัน เช่น Blood-brain Barrier ได้ สะสมได้ดีในเนื้อเยื่อไขมัน
R ₂ Hg	สารปรอทอินทรีย์เชิงคู่: ความเป็นพิษต่ำ แต่สามารถถูกเปลี่ยนรูปแบบเป็น RHg ⁺ ได้ในตัวกลางที่เป็นกรด
HgS	สารประกอบปรอทซัลไฟด์ ไม่ละลายในน้ำและไม่เป็นพิษ พบตามธรรมชาติในดิน

1.3 กระบวนการแยกมวลสาร

กระบวนการแยกมวลสารถือเป็นองค์ความรู้ที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในเชิงวิศวกรรมเคมี ซึ่งถูกพัฒนาเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากในกระบวนการผลิตต่างๆ มักจะมีองค์ประกอบที่ไม่ต้องการรวมอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอยู่ด้วยจึงจำเป็นต้องใช้องค์ความรู้ดังกล่าวมาใช้ในการแยกสารที่ไม่ต้องการออกไป สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแยกไอออนโลหะจึงมีความจำเป็นต้องใช้องค์ความรู้ทางด้านการแยกมวลสาร โดยเฉพาะมวลสารที่เป็นลักษณะของไอออนโลหะ ซึ่งกระบวนการแยกมวลสารที่เป็นไอออนโลหะนั้นมีหลากหลายวิธีด้วยกัน

1.31 กระบวนการไดอะไลซิส

กระบวนการไดอะไลซิสเป็นกระบวนการแยกตัวถูกละลายออกจากสารละลายด้วยเยื่อแผ่น โดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน ตัวถูกละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นไปได้จะเข้าไปอยู่ในสารละลายที่ทำหน้าที่รองรับรับตัวถูกละลายเรียกว่า ไดอะไลเซต การทำงานของกระบวนการนี้ ต้องควบคุมความเข้มข้นทางด้านไดอะไลเซตให้ต่ำอยู่เสมอเพื่อรักษาระดับของแรงขับเคลื่อน ด้วยการเปลี่ยนสารไดอะไลเซตใหม่ หรือป้อนไดอะไลเซตสวนทางกับสารป้อน ตัวถูกละลายแต่ละชนิดจะแยกออกจากกันโดยอาศัยความแตกต่างของการละลายและอัตราการแพร่ในเยื่อแผ่น โดยสารที่มีโมเลกุลเล็กจะมีอัตราการแพร่เร็วกว่าสารที่มีโมเลกุลใหญ่ (Panchareon, 2008)

1.32 กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิส

กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิสเป็นกระบวนการแยกทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เยื่อแผ่นที่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยแรงขับเคลื่อนในการแยกองค์ประกอบที่มีประจุออกจากสารละลายคือความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อยู่สองข้างของเยื่อแผ่น ดังนั้นตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการนี้คือปริมาณไอออนที่สามารถถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นได้ ซึ่งจะแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า จึงต้องมีการคำนวณกระแสที่ต้องใช้ในการแยกไอออน กระบวนการนี้ประกอบด้วย เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบและประจุบวก ต่ออนุกรมสลับกันอยู่ระหว่างขั้วลบและขั้วบวก ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนบวกไปสู่ขั้วลบได้ และจะถูกกักไว้ด้วยเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนลบ ในขณะที่ขั้วลบ ไอออนลบจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนไอออนไปสู่ขั้วบวกได้ (Panchareon, 2008)

1.33 กระบวนการอัลตราฟิวดเรชัน

กระบวนการอัลตราฟิวดเรชันเป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลใหญ่ออกจากสารที่มีโมเลกุลเล็ก เช่น โปรตีน เอนไซม์ และแป้ง ออกจากสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ เช่น น้ำผลไม้ นํ้านม สารละลายเอนไซม์ สารปฏิชีวนะ เยื่อแผ่นที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นที่ไม่สมมาตรที่มีชั้นผิวหนา $Q_1 - 2$ ไมโครเมตร โดยใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อน ในการดำเนินงานใช้ความดันในการป้อนสารละลายผ่านเยื่อแผ่นในช่วง $2 - 10$ บรรยากาศ โดยเมื่อสารละลายไหลผ่านเยื่อแผ่นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะสามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ ในขณะที่สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นไปได้

กรณีที่เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นสารที่โมเลกุลขนาดใหญ่มักเรียกว่าการเพิ่มความเข้มข้น หรือเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่ารีเทนเทท กรณีผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นสารโมเลกุลเล็กมักเรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่าเพอมีเอท กระบวนการอัลตราฟิเตรชันจะใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 2- 20 นาโนเมตร (20- 200 อังสตรอม) (Pancharoen, 2008)

1.34 กระบวนการไมโครฟิเตรชัน

กระบวนการไมโครฟิเตรชันใช้สำหรับแยกสารที่ขนาดของมวลเชิงโมเลกุลมากกว่า 300,000 amu ขึ้นไป เช่น สารแขวนลอย สารคอลลอยด์ ออกจากสารที่ขนาดของมวลเชิงโมเลกุลเล็กกว่า 300,000 amu โดยสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเท่านั้นที่สามารถผ่านเยื่อแผ่นไปได้ กระบวนการไมโครฟิเตรชันจะใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดของรูพรุนประมาณ 0.1 - 10 ไมโครเมตร ในการดำเนินการใช้ผลต่างของความดันเป็นแรงขับเคลื่อน โดยใช้ความดันประมาณ 1 - 5 บรรยากาศ มอดูลที่ใช้อาจจะเป็นแบบท่อ แบบเส้นใยกลวง หรือแบบท่อม้วน ตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่น ใช้สำหรับกรองน้ำผลไม้ให้ใส ใช้แยกตะกอนโปรตีนออกจากร้านมถั่วเหลือง ใช้แยกแบคทีเรียออกจากน้ำนม (Pancharoen, 2008)

โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้เฉพาะเจาะจงไปที่กระบวนการแยกมวลสารด้วยเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane) โดยเทคนิคทั้งสองล้วนอาศัยหลักการเดียวกันกล่าวคือ ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายจะประกอบไปด้วยขั้นตอนอย่างน้อย 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ สำหรับกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวนั้นจะรวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับให้เกิดขึ้นพร้อมกันภายในขั้นตอนเดียว ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ากระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวคือกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายที่มีขั้นตอนการสกัดและการนำกลับเกิดขึ้นพร้อมๆกันนั่นเอง ซึ่งในแต่ละเทคนิคการสกัดมีรายละเอียดดังนี้

1.35 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) เป็นการสกัดขั้นพื้นฐานซึ่งจะประกอบด้วยวัฏภาคสารละลาย 3 วัฏภาคได้แก่

วัฏภาคสารละลายป้อน (Feed phase) เป็นวัฏภาคที่มีองค์ประกอบของไอออนโลหะที่ต้องการแยกละลายอยู่ปกติจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

วัฏภาคสารละลายอินทรีย์ (Organic phase) เป็นวัฏภาคที่ประกอบด้วยสารสกัด (Extractant) ซึ่งจะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

วัฏภาคสารละลายนำกลับ (Strip phase) เป็นวัฏภาคที่ทำหน้าที่รองรับองค์ประกอบซึ่งในที่นี้คือ ไอออนโลหะที่ต้องการแยก

ดังนั้นกระบวนการสกัดจะเสร็จสิ้นสมบูรณ์ได้ใน 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นขั้นตอนการสกัด องค์ประกอบที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อนจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดซึ่งละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ โดยอาจเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขององค์ประกอบที่ต้องการแยกกับสารสกัดขึ้น หรือเป็นสารละลายของเกลือในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เท่านั้น

ขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนการนำกลับ สารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์จะเกิดการถ่ายเทมวลและทำปฏิกิริยาย้อนกลับ โดยองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะเข้าไปละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายนำกลับเป็นลักษณะของไอออนเช่นเดียวกับที่เคยอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อน

ดังนั้นเทคนิคดังกล่าวมีขีดจำกัดทางด้านประสิทธิภาพโดยขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลมาจาก ค่าสัดส่วนระหว่างสารละลายป้อนกับตัวทำละลาย (Feed to solvent ratio) ค่าสัดส่วนการกระจายไอออนโลหะระหว่างวัฏภาคต่างๆ (Distribution ratio) พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ขณะเกิดปฏิกิริยา และปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคสารละลายอินทรีย์กับวัฏภาคสารละลายนำกลับ (Meera และคณะ, 2001)

1.36 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวเป็นกระบวนการที่อิงหลักการของเทคนิคที่สกัดด้วยตัวทำละลายจึงมีวัฏภาคและขั้นตอนสกัดเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนการสกัดในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในขั้นตอนเดียว กล่าวคือ กระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่น

เหลวได้รวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับไว้ในขั้นตอนเดียวกันจึงเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงในการคัดเลือกการสกัด และสามารถนำไปพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้ง่าย (Patthaveekongka และคณะ, 2006)

โดยกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

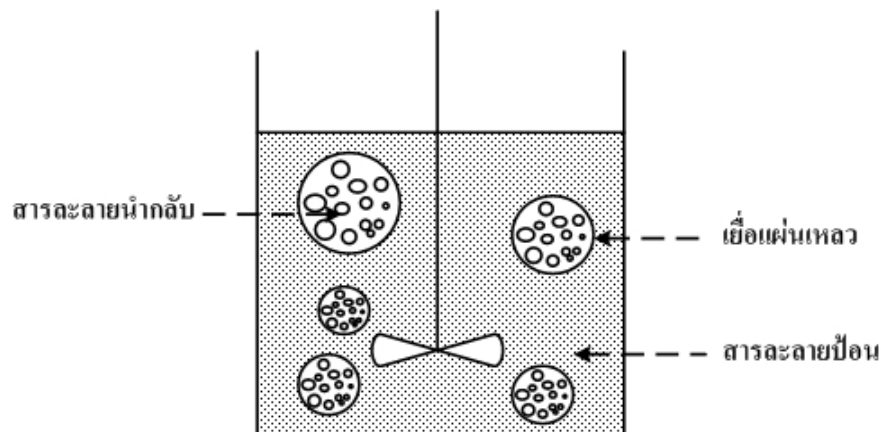
1. เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ (Unsupported liquid membrane)
2. เยื่อแผ่นเหลวที่พองบนตัวรองรับ (Supported liquid membrane)

1.3.6.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ (unsupported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ เยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นจะสามารถเคลื่อนที่ได้เกือบทุกทิศทาง จึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “เยื่อแผ่นเหลวแบบเครื่องที่ได้ (Mobilized liquid membrane) ตัวอย่างเยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ เช่น

1. เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane, ELM)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันจะประกอบไปด้วย 2 วัฏภาค คือ วัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (Dispersion Phase) โดยสารละลายป้อนซึ่งมีองค์ประกอบของไอออนโลหะที่ต้องการแยกจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) ในส่วนของวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (Dispersion Phase) จะเป็นระหว่างสารละลายอิมัลชันของสารสกัดและสารละลายนำกลับ ซึ่ง ไอออนโลหะในสารละลายป้อนจะเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดแล้วเกิดปฏิกิริยาผันกลับถ่ายโอนไอออนกลับไปอยู่ในสารละลายนำกลับซึ่งอยู่ในสารสกัดดังรูปที่ 1.1



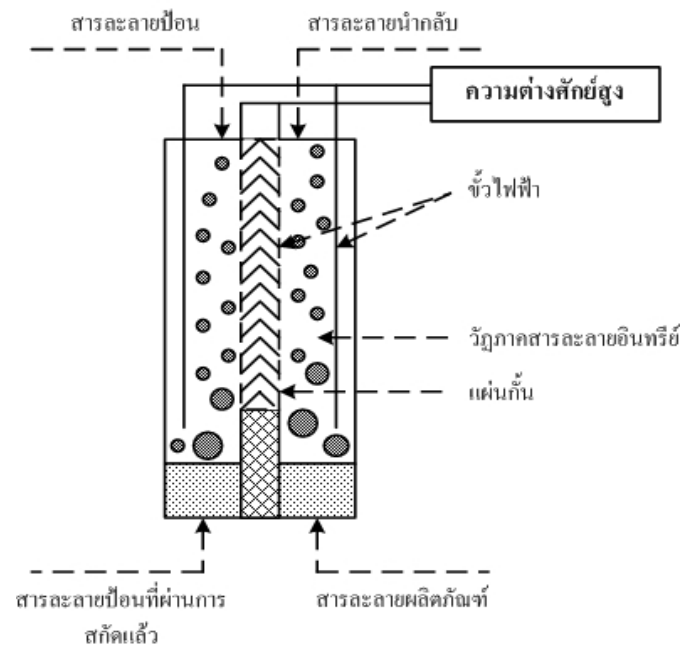
รูปที่ 1.1 เยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน (Pancharoen, 2008)

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (**Water in Oil (W/O) Emulsion**) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ
- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (**Oil in Water (O/W) Emulsion**) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน

2 เยื่อแผ่นเหลวเทียมแบบอาศัยสนามไฟฟ้า (electrostatic pseudo liquid membrane, ELPLIM)

เป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากหอสกัดที่ กิดค้นขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิว และลดความยุ่งยากของระบบเยื่อแผ่นเหลว โดยอาศัยหลักการที่ว่าภายใต้สนามไฟฟ้ากำลังสูง หยดน้ำในวัฏภาคน้ำมันจะแตกกระจายออกเป็นหยดเล็กๆ จำนวนมาก เมื่อนำสนามไฟฟ้ามาใช้กับเยื่อแผ่นเหลวเทียม โดยอาศัยสนามไฟฟ้าจึงทำให้เกิดวัฏภาคสารละลายน้ำกระจายตัวในสารละลายอินทรีย์ ได้ดีขึ้น (Gu, 1992) ระบบนี้แสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ระบบของเยื่อแผ่นเหลวเทียมแบบอาศัยกระแสไฟฟ้า (Pancharoen, 2008)

วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะถูกบรรจุอยู่ในหอสกัดซึ่งแบ่งออกเป็นฝั่งสกัดและฝั่งนำกลับ ส่วนล่างของหอสกัดออกแบบมาเพื่อรองรับการรวมตัวของหยดสารละลายในฝั่งสกัดและฝั่งสตริป

วิกฤตเยื่อแผ่นเหลวในฝั่งสกัดจะมีอิสระในการเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสองฝั่ง ขณะที่หยดของวิกฤตสารละลายละลายน้ำกลับและหยดของวิกฤตสารละลายละลายป้อนแยกออกจากกันโดยเด็ดขาด ฝั่งสกัดและฝั่งน้ำกลับจะถูกต่อกร้อมด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้ว เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงสารละลายของน้ำใน 2 ฝั่ง จะแตกกระจายเป็นเม็ดเล็กๆ จำนวนมากในวิกฤตเยื่อแผ่นเหลวทำให้ห้องค้ประกอบที่ต้องการแยกในวิกฤตสารละลายป้อนฝั่งหนึ่งเกิดการถ่ายเทผ่านวิกฤตเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายน้ำกลับอีกฝั่งหนึ่งได้

1.3.6.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงบนตัวรองรับ (supported liquid membrane)

ลักษณะของเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้จะมีหลักการเดียวกันกับเยื่อแผ่นเหลวชนิดอื่นๆคือ วิกฤตเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นตัวกลางในการส่งผ่านไอออนโลหะจากวิกฤตสารละลายป้อนไปยังวิกฤตสารละลายน้ำกลับ โดยวิกฤตเยื่อแผ่นเหลวจะถูกบรรจุอยู่ในตัวรองรับที่มีรูพรุนโดยอาศัยแรงคาร์ปิลลารี(Capillary force) ในการยึดตรึงอยู่ในรูพรุนซึ่งตัวรองรับนี้จะกั้นอยู่ระหว่างวิกฤตสารละลายป้อนและวิกฤตสารละลายน้ำกลับ (Marr และ Kopp, 1982) โดยตัวรองรับที่นำมาใช้นี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

- a เป็นพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ วิกฤตที่บรรจุอยู่ในรูพรุนจึงเป็นวิกฤตสารละลายอินทรีย์
- b เป็นพอลิเมอร์ที่รูพรุนชนิดชอบน้ำ วิกฤตที่บรรจุอยู่ในรูพรุนจะต้องเป็นวิกฤตสารละลายน้ำ

ตัวรองรับที่มีรูพรุนที่มีรูปร่างแตกต่างกันหลายแบบ ได้แก่

1. เยื่อแผ่นที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (flat sheet supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ใช้ตัวรองรับชนิดแผ่นบางที่มีความพรุน (Porosity) สูงส่วนใหญ่ทำจากวัสดุพอลิเมอร์ เช่น Polypropylene (PP) Polyethylene (PE) Polytetrafluoroethylene (PTFE) เป็นต้น เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายโอนมวลเนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่ไม่ซับซ้อน แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้มีอัตราการถ่ายโอนมวลต่ำเนื่องจากรูพรุนที่ในการถ่ายโอนมวลน้อย

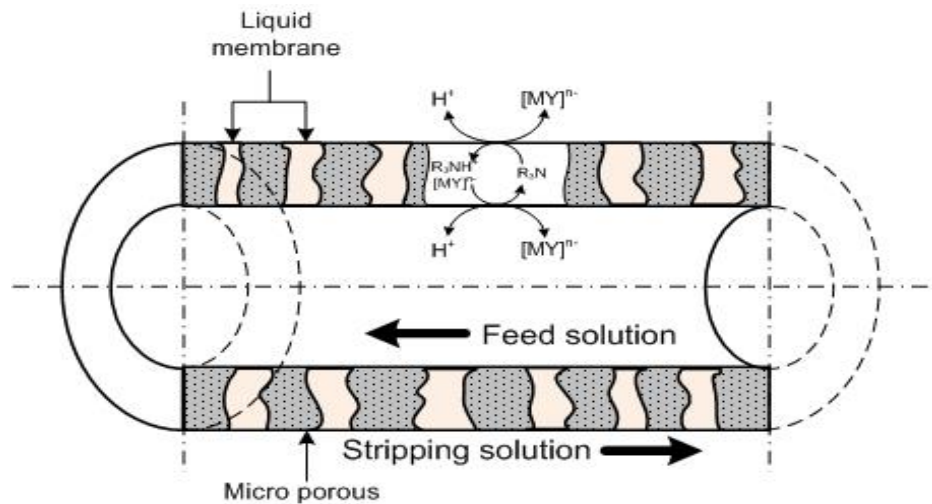
2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยแผ่นม้วน (spiral-type supported liquid membrane)

ตัวรองรับชนิดแผ่นม้วนผลิตขึ้น โดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และแผ่นตาข่าย (Mesh Spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อ นำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของ โมดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้วและสารละลายนำกลับที่ได้จะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของ โมดูลจุดเด่นของกระบวนการนี้ คือ โมดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน

3 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane, HFSLM)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีรูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง ซึ่งเหมาะสมในการใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงประกอบด้วย 3 ภูมิภาคหลัก คือ ภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ภูมิภาคสารละลายป้อน และ ภูมิภาคสารละลายนำกลับ โดยภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นภูมิภาคที่ได้จากการนำสารสกัดละลายในตัวทำละลายแล้วนำไปเคลือบฝังในรูพรุนของเส้นใยกลวงโดยจะกั้นอยู่ระหว่างภูมิภาคของสารละลายป้อน และ ภูมิภาคของสารละลายนำกลับ โดยภูมิภาคของสารละลายป้อนจะมีองค์ประกอบของไอออนโลหะที่ต้องการแยกละลายอยู่ ส่วนภูมิภาคของสารละลายนำกลับจะทำหน้าที่รองรับองค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งผ่านการถ่ายโอนมวลและการแพร่ซึม

มอดูลของเส้นใยกลวงประกอบด้วยเส้นใยกลวงจำนวนมากเรียงในแนวขนานกันแล้วนำไปบรรจุในแท่งทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของมอดูลด้วยเรซิน (Resin) โดยปกติเส้นใยกลวงมักเป็นตัวรองรับชนิดไม่ชอบน้ำ ดังนั้นเส้นใยกลวงจึงถูกอุดรูพรุนไว้ด้วยภูมิภาคสารละลายอินทรีย์ ในการสกัดจะให้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลอยู่ภายในเส้นใยกลวง โดยอาจจะให้สารละลายป้อนไหลอยู่ในฝั่งท่อ (Tube side) แล้วให้สารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือก (Shell side) หรือให้สารละลายป้อนไหลอยู่ในฝั่งท่อ (Shell side) แล้วให้สารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือก (Tube side) และทิศทางการไหลอาจจะเป็นการไหลแบบทิศทางเดียวหรือเป็นแบบสวนทางกันก็ได้ (Panchareon, 2008) ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ทำการวิจัย ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ บนเส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1.4 สารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัดคือ

1.4.1 สารสกัดชนิดกรด

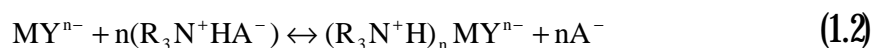
สารสกัดชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารสกัดชนิดกรด (**Acidic Extractant**) และสารสกัดชนิดคีเลต (**Chelate Extractant**) ในส่วนของสารสกัดชนิดกรดจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-\text{COOH}$, $=\text{P(O)OH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ ส่วนสารสกัดชนิดคีเลตสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (**Chelation**) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลางและสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์



ในสมการที่ (1.1) แสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างไอออนไฮโดรเนียมกับไอออนโลหะ โดยเครื่องหมายขีดด้านบนหมายถึงสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ จากสมการพบว่าค่าความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคสารละลายอินทรีย์และธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ โดยความสามารถในการสกัดจะสูงขึ้นเมื่อไอออนโลหะมีประจุบวก

1.42 สารสกัดชนิดเบส

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดชนิดเบสที่ใช้เชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium halides) ทั้งนี้มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary, RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary, R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary, R_3N) และชนิดจตุภูมิ (Quaternary, R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นกับความสามารถในการรวมตัวของสารประกอบไอออนโลหะที่อยู่ในรูปประจุลบ (Anionic species) ซึ่งอยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำ ปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดชนิดเบสแสดงดังสมการที่ (1.2)



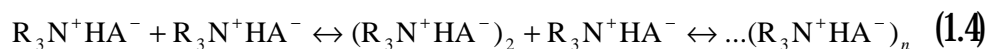
เพื่อให้การแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะเกิดขึ้นเอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสม ดังสมการที่ (1.3)



จากสมการที่ (1.3) เอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว ($R_3N^+HA^-$) ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ (MY^{n-}) จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการที่ (1.2)

ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้สารสกัดเอมีนคือการรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นกับสมบัติของตัวทำ

ละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียที่มีประจุบวกและประจุลบ (**Ammonium cation** และ **Ammonium anion**) การรวมตัวของเกลือเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการที่ (1.4)



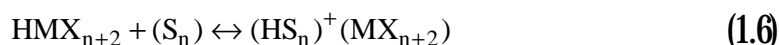
การเกิดวัฏภาคที่สามจะทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (**Modifier**) เช่น **Long-chain aliphatic alcohol**

1.43 สารสกัดชนิดกลาง (solvating extractant)

สารสกัดชนิดขอลเวทหรือสารสกัดชนิดกลาง (**Neutral Extractant**) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะหมู่ที่ให้ไอออนลบ ไอออน โลหะ ในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (**Central Metal Atom**) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังสมการที่ (1.5)



เมื่อ **S** เป็นสารสกัดชนิดขอลเวท ความสามารถในการละลายของสารอนินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดขอลเวทดังสมการที่ (1.6)



ตัวอย่างสารสกัดชนิดซอลเวทในปัจจุบัน เช่น สารสกัด **Trisobutylphosphine sulphide** โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า **Cyanex 471** และสารสกัด **Triocetyl phosphine oxide** โดยใช้ชื่อทางการค้าว่า **Cyanex 921** เป็นต้น

1.5 งานวิจัยที่ผ่านมา

1.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนปรอท

Quamin Li และคณะ (1996) เป็นการศึกษาการสกัดแยกไอออน **Hg(II)** ด้วยเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน ซึ่งใช้สารสกัด **Tri-n-octylanine (TOA)** ผสมกับ **Sorbital monooleate (Span 80)** เป็นเยื่อแผ่นเหลว และใช้สายละลาย **NaOH** เป็นสารละลายนำกลับ โดยศึกษาค่าความเข้มข้นของ **HCl, KCl, TOA, Span80** และ **NaOH** ที่มีผลต่อการสกัด ซึ่งพบว่าสภาวะการทดลองที่สามารถสกัดไอออนปรอทได้ดีที่สุดคือ ใช้ความเข้มข้นของกรด **HCl** และ **KCl** ในสารละลายป้อนเป็น **0.01** โมลต่อลิตร และ **2.5×10^2** โมลต่อลิตร ตามลำดับ ในส่วนของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวให้ **TOA** มีความเข้มข้น **2.5×10^2** โมลต่อลิตร ผสมกับ **Span80** (สารลดแรงตึงผิว) **3** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความเข้มข้น **NaOH** ในสารละลายนำกลับเท่ากับ **0.05** โมลต่อลิตร

Jabbari และคณะ (2001) เป็นการศึกษาการสกัดแยกไอออน **HgCl₄²⁻** ออกจากไอออนโลหะ **Li⁺, Tl⁺, Ca²⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Zr²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺, Fe³⁺** และ **Cr³⁺** ด้วยเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน โดยใช้สารสกัด **Dicyclohexyl-18-crown-6 (DC18C6)** และใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ สารละลายนำกลับใช้ **Ammonium thiocyanate (NH₄SCN)** ในการวิเคราะห์ไอออนปรอทใช้วิธี **Cold vapor atomic absorption spectrometry** การสกัดของไอออนปรอทผ่านเยื่อแผ่นเหลวภายหลัง **2** ชั่วโมง ได้ **95.4 ± 1.5** เปอร์เซ็นต์

Fontas และคณะ (2005) ศึกษาการแยกและนำกลับไอออนปรอทโดยใช้โมดูลของเส้นใยกลวง **4** ชนิด ได้แก่ **Accurel PP-2E, Celgard 2402, Celgard 2500** และ **Durapore** โดยเตรียมสารละลายไอออนโลหะ **Pb(NO₃)₂, Cu(NO₃)₂ 3H₂O, Cd(NO₃)₂ 4H₂O** และ **HgCl₂** ใน **NaNO₃** ที่ความเข้มข้น **0.1** โมลต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสด้วยกรดไนตริกใช้สารละลายของควิมีน และ **Decaline** เป็นสารสกัด สารละลายนำกลับ คือ **Thiourea** ความเข้มข้น **0.3** โมลต่อลิตร พบว่า

สามารถแยกและนำกลับไอออนปรอทได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

Seewalee และคณะ (2007) ศึกษาการแยกปรอทและสารหนูออกจากสารละลายคลอไรด์ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (**Hollow Fiber Supported Liquid Membrane, HFSLM**) ซึ่งใช้สารสกัด **Tri-n-octylamine (TOA)** ละลายในตัวทำละลายโทลูอิน **NaOH** เป็นสารละลายนำกลับ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ผลของความเข้มข้นของ **HCl** ในสารละลายป้อน ผลของความเข้มข้นของ **TOA** ในสารละลายอินทรีย์ ผลของความเข้มข้นของ **NaOH** ผลของความเข้มข้นของ ไอออนปรอทและสารหนู และ ผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว จากผลการทดลองพบว่า ไอออนปรอทเท่านั้นที่สามารถถูกสกัดและนำกลับมีค่าการคัดเลือก 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากปรอทจะแตกตัวให้ไอออนประจุลบ (HgCl_4^{2-}) จึงเกิดปฏิกิริยากับสารสกัด **TOA** ซึ่งเป็นสารสกัดชนิดเบส ส่วนไอออนของสารหนู (H_2AsO_3) มีประจุเป็นกลางจึงไม่เกิดการสกัดและนำกลับ และจากการทดลองพบว่าสามารถนำกลับไอออนปรอทได้ 95 เปอร์เซ็นต์

Fabrega และคณะ (2007) ศึกษาการสกัด **Hg(II)** จากสารละลายกรดไฮดรอกลอริกด้วยวิธี **Liquid-liquid extraction** โดยใช้ **Aliquat 336** ในตัวทำละลาย **Kerosene Exxsol D-80** เป็นสารสกัด โดยในเฟสของสารละลายอินทรีย์ได้เติม **1-octanol 15%v/v** ลงไปเพื่อช่วยไม่ให้เกิดเป็นสามเฟส ใช้ **Thiourea** เป็นสารละลายนำกลับ ในการศึกษาได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25°C จากการทดลองพบว่า **Hg(II)** ถูกสกัดอย่างรวดเร็วภายในเวลา 5 นาที ที่ $\text{pH}=1$ การหาพฤติกรรมของไอออนคลอไรด์และความเข้มข้นของสารสกัดที่มีต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยสารสกัด **Aliquat 336** นั้นจะใช้การวิเคราะห์จากความชันของกราฟ

Pancharoen และคณะ (2010) ศึกษาการสกัด ไอออนปรอท HgCl_4^{2-} จากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติ โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้ **Tri-n-octylamine (TOA)** ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์โทลูอินเป็นสารสกัด และใช้สารละลาย **NaOH** เป็นสารละลายนำกลับ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน, ความเข้มข้นสารสกัด, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ, จำนวนรอบในการสกัด และผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับสูงที่สุด เท่ากับ 99.8 เปอร์เซ็นต์

และ 62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรดเบสในสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของสารสกัด TOA เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ NaOH 0.5 โมลต่อลิตร เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการสกัด 6 รอบ เป็นเวลา 300 นาที สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับได้

Chakrabarty และคณะ (2010) ศึกษาการสกัดไอออนปรอทด้วยเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นที่พองด้วยเส้นใยกลวงชนิดแผ่นม้วน โดยใช้สารสกัดชนิด TOA ซึ่งมีน้ำมันมะพร้าวเป็นสารละลายอินทรีย์ และใช้ NaOH เป็นสารละลายนำกลับ โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อน, ความเข้มข้นสารสกัด และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โดยพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการสกัดไอออนปรอท คือ TOA ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สารละลายนำกลับ NaOH ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร และค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลายป้อนเท่ากับ 1 โดยมีร้อยละการสกัดอยู่ที่ 95 เปอร์เซ็นต์

1.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนโลหะ

Yang และคณะ (2002) ศึกษาการแยก Zirconium และ hafnium ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่ พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้ Tri-n-octylamine (TOA) และ Trioctylmethyl ammonium chloride (Aliquat 336) เป็นสารสกัด ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของกรด HCl ในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ความยาวของเส้นใยกลวง อัตราการไหลของสารละลาย พบว่าอัตราส่วนฟลักซ์ของ Zr/Hf มีค่าประมาณ 160 เมื่อความเข้มข้นของกรด HCl ในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นค่า Separation factor จะลดลง โดยขั้นตอนควบคุมการถ่ายโอนมวลในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวคือ ขั้นตอนการแพร่ในเยื่อแผ่นเหลว ยกเว้นในกรณีที่อัตราการไหลต่ำๆ

Ramakul และ Pancharoen (2005) ศึกษาการแยกไอออนแลนทานัมและนีโอดีเมียมออกจากสารละลายด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้ Thenoyl tri fluoro acetone (HTTA) ในตัวทำละลายเบนซีนเป็นสารสกัด และศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ โดยเติม Tri octyl anine (TOA) ในสารสกัด HTTA ผลการทดลองพบว่าเมื่อค่า pH ในสารละลายป้อนมีค่าเท่ากับ 2.5 จะได้ร้อยละการสกัดสูงสุด เมื่อเติม (TOA) ในสารสกัด HTTA ร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับจะ

สูงขึ้นแบบเสริมฤทธิ์ ทั้งนี้ร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของแฉกทานัมจะสูงกว่านีโอดีเมียม เมื่อความเข้มข้นของ HTTA สูงขึ้นร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับจะสูงขึ้นตาม และเมื่อใช้มอดูลเชื่อมแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเป็นแบบ **Multi-column** จะได้ร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับสูงกว่าการใช้มอดูลเชื่อมแผ่นเหลวแบบ **Single-column**

Fontas และคณะ (2008) ศึกษาการแยกพลาเดียม ออกจากสารละลายคลอไรด์ที่มี SCN⁻ โดยใช้ **Cyanex 471** เป็นสารสกัด โดยสารป้อนที่ใช้ในการศึกษาจะใช้สารละลายที่คลอไรด์ที่เตรียมขึ้นมาซึ่งมีองค์ประกอบของ **Pd(II)**, **Pt(II)** และ **Rh(III)** และเติม **Thiocyanate** ลงไปเล็กน้อย ซึ่งพบว่าพลาเดียมเท่านั้นที่มีการสกัด รวมถึงได้ศึกษาตัวทำละลายที่มีผลต่อความเสถียรของเยื่อแผ่นเหลว พบว่า **Decaline** เป็นตัวทำละลายที่ดีที่สุดที่ทำให้เยื่อแผ่นเหลวเสถียรที่สุด สำหรับระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้นก็สามารนำไปประยุกต์ใช้ในการเลือกนำกลับพลาเดียมจากสารละลายที่ได้จากการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยา

Dessouky และคณะ (2008) ศึกษาการสกัด **Zn(II)**, **Fe(II)**, **Fe(III)** **Cd(II)** จากคลอไรด์ โดยใช้ **Tributylphosphate (TBP)** และ **Trioctyl phosphine oxide (Cyanex 921)** ใน **Kerosene** เป็นสารสกัด โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ กรด **HCl**, ไฮโดรเจนไอออน, สารสกัด, ความเข้มข้นของไอออนโลหะ, อุณหภูมิ และชนิดสารละลายนำกลับคือกรดไนตริก กรดซัลฟิวริก กรดไฮดรอกลอริก และน้ำกลั่น จากการศึกษาพบว่าเลข **Stoichiometry** ของการสกัดโลหะ **Zn**, **Fe** และ **Cd** ด้วย **TBP** จะเป็น **HZnCl₃•3TBP**, **HFeCl₄•2TBP** และ **H₂CdCl₄•3TBP** ตามลำดับ ส่วน **Stoichiometry** ของการสกัดโลหะ **Zn**, **Fe** และ **Cd** ด้วย **Cyanex 921 (C921)** จะเป็น **HZnCl₃•2C921**, **HFeCl₄•C921** และ **H₂CdCl₄•3C921** ตามลำดับ โดยสารสกัดที่เหมาะสมสำหรับการสกัด **Zn** ในสารละลาย **Pickling** คือสารสกัด **TBP** ที่ไม่ได้เจือจาง

Kasikova และคณะ (2010) ศึกษาการสกัดไอออนไนโอเบียมจากตัวกลางกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น **11.4 M** โดยใช้สารสกัดในกลุ่มของเอมีนสามชนิด ได้แก่ **Trioctylamine (TOA)**, **Triisooctylamine(TiOA)**, **Trioctylamine(TAA)** และตัวทำละลายอินทรีย์ได้แก่ **Toluene**, **o-Xylene**, **Ethylbenzene** โดยการเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวจากมากไปน้อย ได้ดังนี้ **TOA > TiOA > TAA**, **o-xylene > toluene > Ethylbenzene** เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดสาม

ชนิดพบว่า สารสกัด TOA และ TiOA 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ให้เปอร์เซ็นต์การสกัดในโอเลียมมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และ TAA ให้เปอร์เซ็นต์การสกัดในโอเลียมมากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1.3 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนปรอทโดยใช้เทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

ผู้เขียน	ชนิดของสารป้อน	ไอออนโลหะ	สารสกัด	วิธีการ
Li et al., (1996)	Synthetic water	Hg(II)	TOA+span 80	ELM
Jabbari et al. (2001)	Synthetic water	Hg(II)	DC18C6	ELM
Meera et al. (2001)	Synthetic water	Hg(II)	Cyanex 923	ELM
Fabrega et al. (2007)	Synthetic water	Hg(II)	Aliquat 336	ELM
Huebra et al. (2003)	Wastewater	Hg(II),Fe(III),etc	LIX 34	ELM
Francis et al. (2000)	Industrial wastewater	Hg(II)	Cyanex 471X	ELM
Jabbari et al. (2001)	Synthetic water	Hg(II),Ca(II),Fe(III),etc	DC18C6	ELM
Fontas et al. (2005)	Synthetic water, seawater	Hg(II),Cd(II),Pd(II)	N-benzoyl-N' N' diheptadecylthiourea	HFSLM
Sangtunrong et al. (2007)	Synthetic water	Hg(II),As(III)	TOA	HFSLM
Pancharoen et al. (2010)	Produced water from natural gas well	Hg(II)	TOA	HFSLM
Kabita et al. (2010b)	Synthetic water	Hg(II)	TOA	HFSLM

หมายเหตุ LM, liquid membrane; HFSLM, hollow fiber supported liquid membrane.

1.6 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.61 ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการแยกปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการขุดเจาะน้ำมันปิโตรเลียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.62 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการแยกปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการขุดน้ำมันปิโตรเลียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.63 ศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่สภาวะสมดุลเพื่อออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายผลการสกัดที่สภาวะคงตัวของกระบวนการ

1.7 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.71 ศึกษาการแยกไอออนปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติจากบริษัทชาลาแมนเดอร์เอ็นเนอร์ยี (โครงการบัวหลวง) จำกัด ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโพรไฟลีนชนิดมีรูพรุน **Celgard[®] X-30**
- 1.72 ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนกับสารละลายนำกลับเป็นลักษณะการไหลแบบสวนทางกัน
- 1.73 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่
 - ชนิดของสารสกัดที่ศึกษา **TOA** และ **Aliquat 336**
 - ความเข้มข้นของสารสกัด
 - ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน
 - ชนิดของสารละลายนำกลับที่ศึกษา **Thiourea**
 - ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ
 - การสกัดโดยใช้เส้นใยกลวง **2** โมดูล
- 1.74 ออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายผลการสกัดและการนำกลับ ในกระบวนการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.75 เปรียบเทียบผลการสกัดและการนำกลับระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.8 ระเบียบวิธีวิจัยโดยย่อ

- 1.81 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดแยกไอออน โลหะปรอทด้วยวิธีการต่างๆ รวมถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารปรอท
- 1.82 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผลการสกัดด้วยวิธีต่างๆ และกระบวนการถ่ายโอนมวล ณ สภาวะคงตัวของกระบวนการ
- 1.83 ทำการทดลองเพื่อคัดเลือกสารสกัด ตัวทำละลาย และสารละลายนำกลับ จากสารละลายปรอทสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
- 1.84 ศึกษาตัวแปรและปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิต่อประสิทธิภาพและพฤติกรรมต่อการสกัดไอออน โลหะปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
- 1.85 ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ณ สภาวะคงตัวของกระบวนการ
- 1.86 ทำการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ของตัวแปรและปัจจัยต่างๆ ที่ได้ศึกษาในข้อที่ 1.84 และ 1.85
- 1.87 ทำการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกไอออน โลหะปรอทที่ได้จากน้ำทิ้งในกระบวนการชุบเจาะน้ำมันปิโตรเลียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
- 1.88 วิเคราะห์ สรุปผล และเขียนบทความทางวิชาการ

1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.91 เกิดองค์ความรู้ในการแยกไอออนปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากอุตสาหกรรมชุบเจาะน้ำมันปิโตรเลียมและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง รวมทั้งยังเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในแยกไอออนโลหะชนิดอื่นๆ
- 1.92 เกิดองค์ความรู้ในเรื่องความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการถ่ายโอนมวลที่ สภาวะคงตัวของกระบวนการรวมทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายผลการสกัดซึ่งสามารถไปประยุกต์เพื่อทำนายผลการสกัดไอออน โลหะชนิดอื่นๆ
- 1.93 ก่อให้เกิดผลงานทางวิชาการและสามารถเผยแพร่ต่อสาธารณชนในรูปแบบการตีพิมพ์หรือการนำเสนอผลงาน ในการประชุมวิชาการทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติได้อย่างน้อย 1 ผลงาน

บทที่ 2

ทฤษฎี

21 กลไกการถ่ายโอนมวล

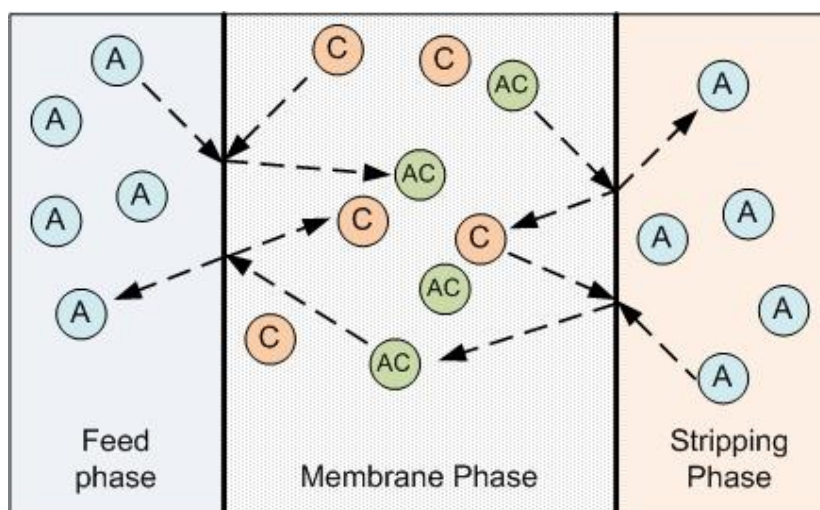
การถ่ายเทมวลในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ คือ กระบวนการถ่ายเทมวลของไอออนสองชนิดพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว เพื่อถ่ายโอนองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ ซึ่งแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลคือผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการได้เรื่อยๆ แม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านของสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อน การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบ่งเป็น 2 แบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนไฮโดรเนียม (H^+) ในสารละลายป้อนและสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะในเยื่อแผ่นเหลว

21.1 การถ่ายโอนมวลอย่างง่าย (Simple facilitated transport)

21.1.1 การแพร่ซึมอย่างง่ายที่มีสารสกัด (Simple carrier transport)

กลไกการแพร่ซึมอย่างง่ายที่มีสารสกัดแสดงในรูปที่ 21 โดยที่ องค์ประกอบ (A) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ต้องการสกัด ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยที่ผิวสัมผัสนี้สารสกัด (C) ซึ่งละลายอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ (A) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (AC) จากนั้นจึงแพร่ซึมผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจากด้านผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปด้านผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ซึ่งผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน (AC) จะเป็นแรงขับเคลื่อนให้สารประกอบเชิงซ้อน (AC) เกิดการเคลื่อนที่ดังกล่าวขึ้น โดยที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายนำกลับนี้เองสารประกอบเชิงซ้อน (AC) จะแตกตัวทำให้องค์ประกอบ (A) หลุดไปสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับ ส่วนสารสกัด (C) จะแพร่ซึมย้อนกลับไปยังผิวสัมผัสแรกคือผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเพื่อทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ (A) อีกครั้ง

เนื่องจากกลไกดังกล่าวเป็นกลไกที่ต้องอาศัยปฏิกิริยาเคมี สารสกัด (C) จึงมีส่วนช่วยให้ องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) เปลี่ยนเป็น สารประกอบเชิงซ้อน (AC) ได้มากขึ้นจึงเป็นการเพิ่ม อัตราการถ่ายเทมวล ดังนั้นการถ่ายเทมวลจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นของ องค์ประกอบ (A) เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารสกัด (C) ในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวด้วย ข้อจำกัดของกลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้ คือ กระบวนการถ่ายเทมวลจะหยุดเมื่อความเข้มข้นของ องค์ประกอบ (A) ทั้งสองฝั่งของภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้การแยกเกิดขึ้นอย่าง สมบูรณ์จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบให้มีหลายขั้นตอน

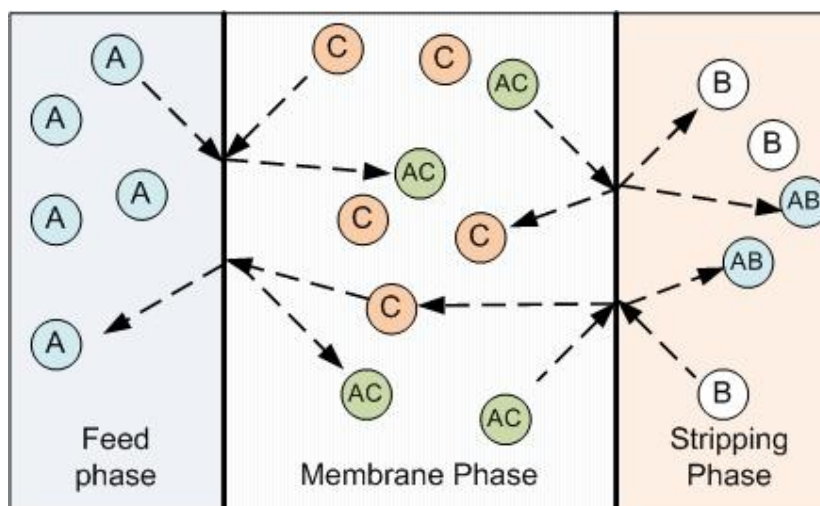


รูปที่ 21 แผนผังทิศทางการถ่ายเทองค์ประกอบในการสกัดอย่างง่าย

21.1.2 การแพร่ซึมอย่างง่ายที่มีสารสกัดและปฏิกิริยาเคมี (Simple carrier transport with chemical reaction)

กลไกการถ่ายโอนมวลลักษณะนี้ จะมีการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบที่เคลื่อนที่คล้อยกับการแพร่ซึมอย่างง่ายโดย องค์ประกอบ (A) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ต้องการสกัด ละลายอยู่ในภูมิภาค สารละลายป้อนจะแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ทำปฏิกิริยากับสารสกัด (C) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (AC) โดยผลต่างของความเข้มข้นของ สารประกอบเชิงซ้อน (AC) จะเป็นแรงขับเคลื่อนให้สารประกอบเชิงซ้อน (AC) เกิดการเคลื่อนที่แพร่ผ่านภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังด้านผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลาย

นำกลับ โดยที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายนำกลับสารประกอบเชิงซ้อน (AC) จะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ (B) ที่ละลายในสารละลายนำกลับ เกิดเป็นสารประกอบ (AD) ซึ่งไม่ละลายในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นจึงสามารถลดความเข้มข้นขององค์ประกอบ (A) ในฝั่งวัฏภาคสารละลายป้อนได้ทั้งหมดเนื่องจากองค์ประกอบ (A) จะไม่มีการถ่ายโอนมวลย้อนกลับจากวัฏภาคสารละลายนำกลับไปยังสรละลายป้อนดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 แผนผังทิศทางการถ่ายเทองค์ประกอบในการสกัดอย่างง่ายที่มีสารสกัดและปฏิกิริยาเคมี

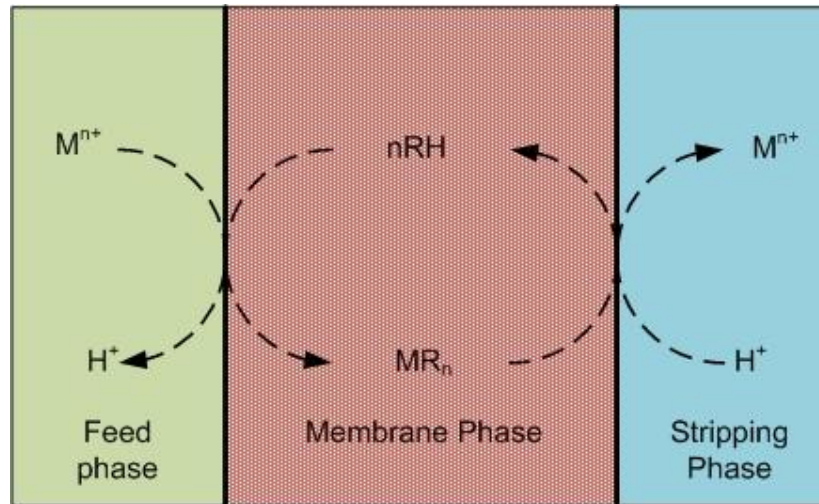
21.2 การถ่ายเทแบบสวนทาง (Coupled facilitated Counter-transport)

การถ่ายโอนมวลแบบสวนทางเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะ (M^{n+}) ผ่านเยื่อแผ่นเหลว โดยการทำปฏิกิริยากับสารสกัด (RH) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (MR_n) โดยในการทำปฏิกิริยาสารสกัดจะปลดปล่อยไอออนไฮโดรเนียม (nH^+) ในวัฏภาคสารละลายป้อน ดังสมการที่ (21)



สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลวจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยาแบบย้อนกลับกับไฮโดรเนียมไอออนที่อยู่ในสารละลายนำกลับดังสมการที่ (22) เกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่

ในสารละลายนำกลับ และได้สารสกัดกลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้งและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน ซึ่งเกิดเป็นวัฏจักรอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของไอออนโลหะและไฮโดรเนียมไอออนของการถ่ายเทแบบสวนทาง

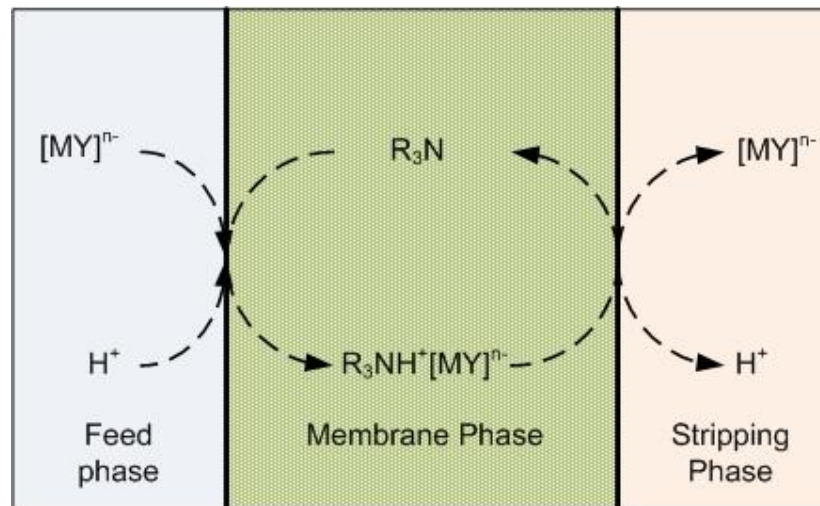
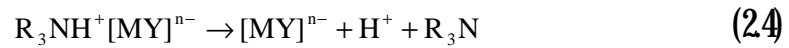
21.3 การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (Coupled facilitated Co-transport)

การถ่ายโอนมวลแบบไปทางเดียวกันเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของไอออนโลหะประจุลบ $[MY]^{n-}$ และไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายป้อน โดยสารสกัดชนิดเบส (R_3N) จะทำปฏิกิริยาไอออนไฮโดรเนียมซึ่งทำหน้าที่เป็นไอออนร่วม (Co-ions) เพื่อให้สารสกัดมีสถานะที่เหมาะสมก่อนจะไปทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) ดังสมการที่ (23)



การแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นไปยังอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดเป็นไอออนโลหะ

ออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด (R_3N) กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้ง และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน ดังสมการที่ (24) และเกิดวนเวียนอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 24



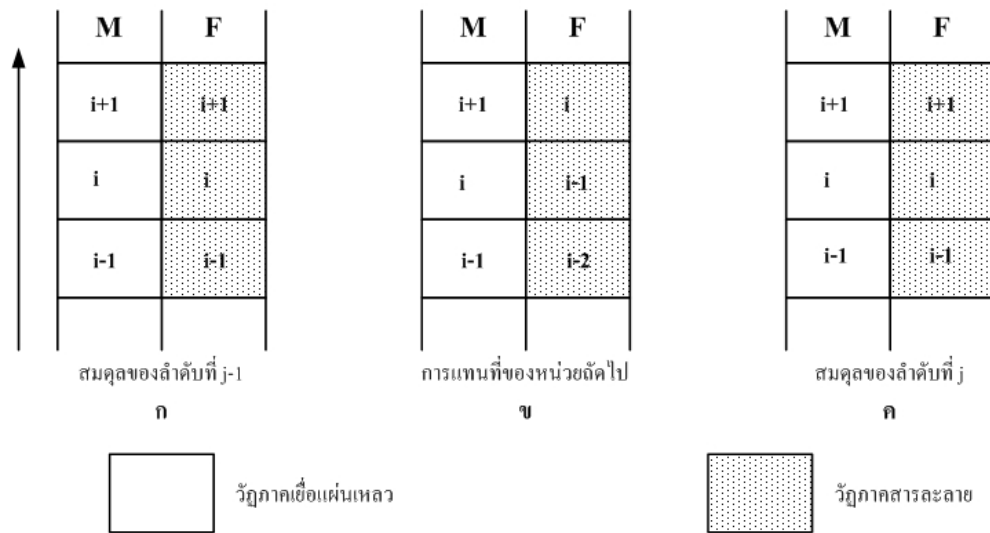
รูปที่ 24 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของไอออนโลหะและไฮโดรเนียมไอออนของการถ่ายเทแบบทางเดียวกัน

2.2 ทฤษฎีการออกแบบจำลองการถ่ายโอนมวล

หลักการสร้างแบบจำลองจะอาศัยการพิจารณากระบวนการโดยสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของวัฏภาคพบว่า วัฏภาคสารสกัดเป็นวัฏภาคที่ไม่เคลื่อนที่ แต่วัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับเป็นวัฏภาคที่เคลื่อนที่ ดังนั้นจึงมีการสะสมความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารสกัด ซึ่งมีค่าแตกต่างกันระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสโดยบริเวณสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารสกัดความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารสกัดจะลดลงเมื่อเวลาของกระบวนการเพิ่มขึ้น แต่ในบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารสกัดกับวัฏภาคสารละลายนำกลับความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารสกัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาของกระบวนการเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นและลดลงของความเข้มข้นไอออนโลหะทั้งสองบริเวณผิวสัมผัสจะถูก

ควบคุมด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวเป็นค่าคงที่ของการถ่ายโอนมวลที่สภาวะสมดุล เพราะฉะนั้นระบบจะเข้าใกล้สมดุลเมื่อค่าความเข้มข้นของโลหะของพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งสองมีค่าเท่ากัน

ในการพิจารณารูปแบบขั้นตอนสมดุลการถ่ายเทมวล จะทำการแบ่งมอดูลเส้นใยกลวงให้เป็นส่วนย่อยขนาดเล็ก (Stage) จำนวน “N” ส่วน โดยแต่ละขั้นตอนในการถ่ายโอนมวลจะแทนด้วย (i, j) โดยที่ “i” คือ ตำแหน่งของลำดับส่วนย่อย (Stage number) และ “j” คือ ระยะเวลาในการกระจัด (Displacement time) ดังแสดงในรูปที่ 25 ซึ่งเป็นสมดุลการเคลื่อนที่ในตำแหน่ง i จากเวลา j-1 (ก) ถึง j (ค) ซึ่งกรอบในการพิจารณากระบวนการจะเริ่มต้นจากสมดุลที่เวลา (j-1) ดังรูปที่ 25 (ก) ดังที่กล่าวไว้ว่าวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นวัฏภาคที่ไม่มีการเคลื่อนที่ (Stationary phase) ขณะที่วัฏภาคสารละลายป้อนเป็นวัฏภาคที่เคลื่อนที่ (Mobile phase) จึงมีการไหลเข้าเส้นใยกลวงตลอดเวลา ทำให้ตำแหน่งของลำดับส่วนย่อย i เคลื่อนที่ไปยังขั้นชั่วคราว (Instantaneous step) ซึ่งแสดงในรูปที่ 25 (ข) โดยสรุปได้ว่าทุกตำแหน่งจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า 1 ตำแหน่ง เข้าสู่ตำแหน่งสมดุลอีกครั้งที่เวลา j ดังแสดงในรูปที่ 25 (ค)



รูปที่ 25 รูปแบบสมดุลการเคลื่อนที่ของ i ระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อน (F) และวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (M) จากเวลา j-1 และ j

2.21 สมมติฐานการออกแบบจำลองการถ่ายโอนมวล

1. ความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลในแต่ละวัฏภาคเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงตามสมการ

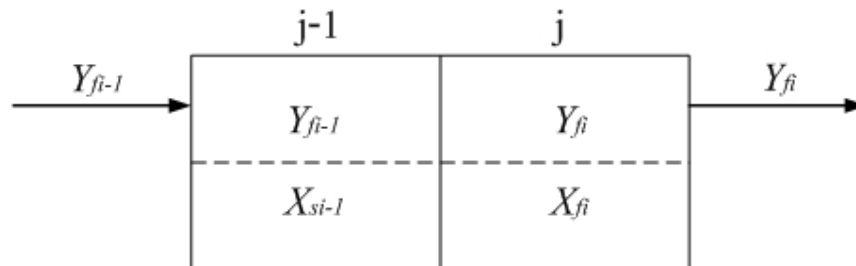
$$x = ky$$

2. ปฏิริยาการสกัดและการนำกลับ เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส และปฏิริยาที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่สถานะสมดุลในทุกๆ ตำแหน่ง
3. ความต้านทานการถ่ายโอนมวลของแต่ละวัฏภาคมีค่าน้อยมาก

2.22 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในการสกัดแบบ 1 โมดูล

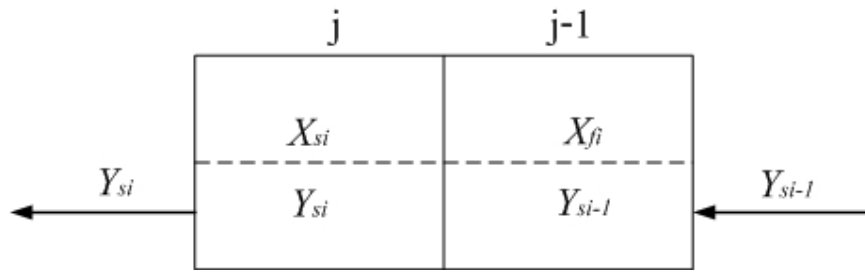
จากหลักการความสัมพันธ์ที่สถานะสมดุล หากกำหนดให้ Y_f เป็นความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อน และ X เป็นความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลว ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลจะเกิดขึ้น ณ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองวัฏภาค โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จากรูปที่ 2.6 สารละลายป้อนสัมผัสกับสารสกัดที่เวลา $j-1$ โดยความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารสกัดเป็นความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารสกัดบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับวัฏภาคสารละลายป้อนเริ่มต้น (X_{si-1}) ก่อนจะเข้าสู่ **Equilibrium** ที่เวลา j ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเป็น Y_{fi} และความเข้มข้นของสกัดเป็น X_{fi}

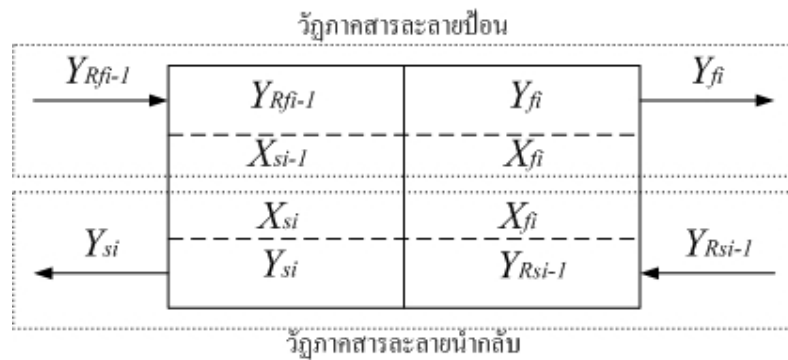


รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลว

ขั้นตอนที่ 2 จากรูปที่ 2.7 สารละลายนำกลับสัมผัสกับสารสกัดที่เวลา $j-1$ โดยความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารสกัดเป็นความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารสกัดบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับวัฏภาคสารละลายป้อนที่ **Equilibrium** (X_{fi}) ก่อนจะเข้าสู่ **Equilibrium** ที่เวลา j ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเป็น Y_{si} และความเข้มข้นของสกัดเป็น X_{si}



รูปที่ 27 แสดงกระบวนการถ่ายโอนมวลระหว่างภูมิภาคสารละลายนำกลับกับภูมิภาคเชื้อแผ่นเหลว



รูปที่ 28 แสดงกระบวนการถ่ายโอนมวลภายในระบบการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางด้วยการสกัดแบบ 1 โมดูล ในระบบแบบกะ

จากรูปที่ 28 คูลมวลสารในภูมิภาคสารละลายป้อนได้ว่า

$$X_{fi} = \left(-\frac{V_f}{V_m}\right)Y_{fi} + \left(\frac{V_f}{V_m}\right)Y_{Rfi-1} + X_{si-1} \tag{25}$$

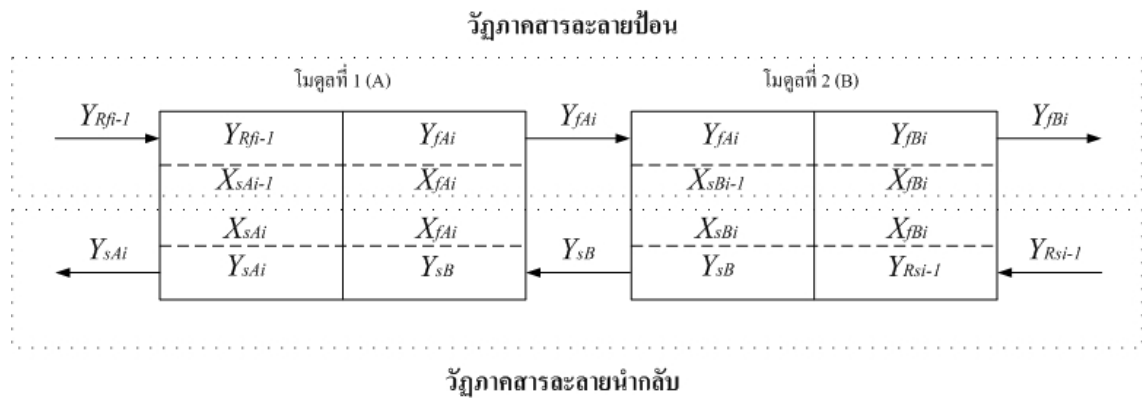
คูลมวลสารในภูมิภาคสารละลายนำกลับ

$$X_{si} = \left(-\frac{V_s}{V_m}\right)Y_{si} + \left(\frac{V_s}{V_m}\right)Y_{Rsi-1} + X_{fi} \tag{26}$$

โดยการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้นในกระบวนการตั้งแต่เข้ากระบวนการจนออกจากกระบวนการสกัดนับเป็น 1 วัฏจักร

2.2.3 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในการสกัดแบบ 2 โมดูล

จากความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลในการสกัดแบบ 1 โมดูล สามารถนำมาประยุกต์ใช้ระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล โดยที่สารละลายป้อนจะเข้าทาง โมดูล A ก่อน จากนั้นจึงเข้าโมดูล B แล้วจึงเข้าถังเก็บ ในส่วนของสารละลายนำกลับจะเข้าโมดูล B ก่อนจะไหลเข้าโมดูล A โดยลักษณะการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับมีลักษณะสวนทางกัน โดยระบบดังกล่าวเป็นการสกัดและนำกลับในระบบแบบกะ (Batch system)



รูปที่ 2.9 แสดงกระบวนการถ่ายโอนมวลภายในระบบการสกัดไอออนโลหะด้วยแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงด้วยการสกัดแบบ 2 โมดูล ในระบบแบบกะ

จากรูปที่ 2.9 สามารถลดมวลในวิภูภาคสารละลายป้อนได้ว่า

สำหรับ โมดูลที่ 1 (A)

$$X_{fAi} = \left(-\frac{V_f}{V_m}\right)Y_{fAi} + \left(\frac{V_f}{V_m}Y_{Rfi-1}\right) + X_{sAi-1} \quad (27)$$

โมดูลที่ 2 (B)

$$X_{fBi} = \left(-\frac{V_f}{V_m}\right)Y_{fBi} + \left(\frac{V_f}{V_m}Y_{fAi}\right) + X_{sBi-1} \quad (28)$$

ลดมวลสารในวิภูภาคสารละลายนำกลับสำหรับ โมดูลที่ 2 (B)

$$X_{sBi} = \left(-\frac{V_s}{V_m}\right)Y_{sBi} + \left(\frac{V_s}{V_m}Y_{Rsi-1}\right) + X_{fBi} \quad (29)$$

โมดูลที่ 1 (A)

$$X_{sAi} = \left(-\frac{V_s}{V_m}\right)Y_{sAi} + \left(\frac{V_s}{V_m}Y_{sBi}\right) + X_{fAi} \quad (210)$$

23 ขั้นตอนการสร้างสมการความสัมพันธ์

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นการถ่ายโอนมวลถูกควบคุมด้วยค่าคงที่การถ่ายโอนมวล ณ สภาวะสมดุล โดยค่าคงที่ดังกล่าวสามารถหาได้จากข้อมูลสมดุลมวลที่สภาวะสมดุล ซึ่งปกติเส้นกราฟที่สร้างจากข้อมูลที่สภาวะสมดุลจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง (**Equilibrium Curve**) แต่ในกระบวนการแยกไอออน โลหะที่ต้องการ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางดำเนินการที่ความเข้มข้นต่ำ ลักษณะของความต่ำพันธ์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นเส้นตรง (**Equilibrium Line**) โดยขั้นตอนการสร้าง **Equilibrium Line** จะทำการทดลองการถ่ายโอนมวลระหว่างวัสดุสารละลายป้อนกับวัสดุสารสกัด และวัสดุสารสกัดกับวัสดุสารละลายนำกลับ เพราะฉะนั้นในระบบกระบวนการแยกไอออนโลหะที่ต้องการ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางจะต้องมี **Equilibrium Line** อย่างน้อย 2 เส้น

2.31 สมการความสัมพันธ์การสกัดและการนำกลับไอออนโลหะใน 1 โมดูล

จากข้อมูลความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลแต่ละวัสดุภาคเป็นเส้นตรงจึงสามารถกำหนดความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลเป็นสมการเส้นตรงได้สองสมการดังนี้

$$X_{fi} = k_f Y_{fi} \quad (211)$$

เป็นความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างวัสดุสารละลายป้อนกับวัสดุสารสกัดที่สภาวะสมดุล

$$X_{si} = k_s Y_{si} \quad (212)$$

เป็นความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างวัสดุสารสกัดกับวัสดุสารละลายนำกลับที่สภาวะสมดุล

จากสมการดังกล่าวสามารถสร้างความสัมพันธ์กับสมการสมดุลมวลได้ดังนี้

$$Y_{fi} = \frac{1}{\left(k_f + \frac{V_f}{V_m}\right)} \left(\frac{V_f}{V_m} Y_{Rfi-1} + X_{si-1}\right) \quad (213)$$

$$Y_{si} = \frac{1}{\left(k_s + \frac{V_s}{V_m}\right)} \left(\frac{V_s}{V_m} Y_{Rsi-1} + X_{fi}\right) \quad (214)$$

จากสมการ (213) และ (214) เป็นสมการความสัมพันธ์ที่เกิดจากการคูณมวลในวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ โดยค่าที่คำนวณได้เป็นค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน (Y_{fi}) และค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ (Y_{si})

$$Y_{Rfi-1} = \frac{(V_{fT} - V_f)Y_{fi-1} + (V_f Y_{fi})}{V_{fT}} \quad (215)$$

$$Y_{Rsi-1} = \frac{(V_{sT} - V_s)Y_{si-1} + (V_s Y_{si})}{V_{sT}} \quad (216)$$

สำหรับสมการที่ (215) และ (216) เป็นการหาค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะใน **Residual** ของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

2.3.2 สมการความสัมพันธ์การสกัดและการนำกลับไอออนโลหะใน 2 โมดูล

จากข้อมูลความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลแต่ละวัฏภาคเป็นเส้นตรงจึงสามารถกำหนดความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลเป็นสมการเส้นตรงได้สองสมการดังนี้

$$X_{fAi} = k_{fA} Y_{fAi} \quad (217)$$

$$X_{fBi} = k_{fB} Y_{fBi} \quad (218)$$

สมการที่ (217) และ (218) เป็นความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อน กับวัฏภาคสารสกัด ที่สภาวะสมดุล ของการสกัดในโมดูล A และ โมดูล B ตามลำดับ

$$X_{sAi} = k_{sA} Y_{sAi} \quad (219)$$

$$X_{sBi} = k_{sB} Y_{sBi} \quad (220)$$

สมการที่ (219) และ (220) เป็นความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างภูมิภาคสารสกัดกับภูมิภาคสารละลายนำกลับที่สภาวะสมดุล ของการนำกลับในโมดูล A และ โมดูล B ตามลำดับ

จากสมการดังกล่าวสามารถสร้างความสัมพันธ์กับสมการสมดุลมวลได้ดังนี้

$$Y_{fAi} = \frac{1}{(k_{fA} + \frac{V_f}{V_m})} \left(\frac{V_f}{V_m} Y_{Rfi-1} + X_{sAi-1} \right) \quad (221)$$

$$Y_{fBi} = \frac{1}{(k_{fB} + \frac{V_f}{V_m})} \left(\frac{V_f}{V_m} Y_{fAi} + X_{sBi-1} \right) \quad (222)$$

จากสมการ (221) และ (222) เป็นสมการความสัมพันธ์ที่เกิดจากการดุลมวลในภูมิภาคสารละลายป้อนของการสกัดในโมดูล A และ โมดูล B ตามลำดับ โดยค่าที่คำนวณออกมาเป็นความเข้มข้นของโลหะในสารละลายป้อนขาออกของแต่ละโมดูล

$$Y_{sBi} = \frac{1}{(k_{sB} + \frac{V_s}{V_m})} \left(\frac{V_s}{V_m} Y_{Rsi-1} + X_{fBi} \right) \quad (223)$$

$$Y_{sAi} = \frac{1}{(k_{sA} + \frac{V_s}{V_m})} \left(\frac{V_s}{V_m} Y_{sBi} + X_{fAi} \right) \quad (224)$$

จากสมการ (223) และ (224) เป็นสมการความสัมพันธ์ที่เกิดจากการดุลมวลในภูมิภาคสารละลายนำกลับของการสกัดในโมดูล B และ โมดูล A ตามลำดับ โดยค่าที่คำนวณได้เป็นค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับขาออกของแต่ละโมดูล

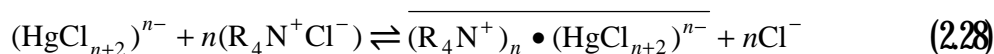
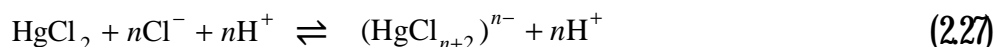
$$Y_{Rfi-1} = \frac{(V_{fT} - V_f)Y_{fi-1} + (V_f Y_{fBi})}{V_{fT}} \quad (2.25)$$

$$Y_{Rsi-1} = \frac{(V_{sT} - V_s)Y_{si-1} + (V_s Y_{sAi})}{V_{sT}} \quad (2.26)$$

สำหรับสมการที่ (2.25) และ (2.26) เป็นการหาค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะใน **Residual** ของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสำหรับการสกัดและการนำกลับไอออนโลหะใน 2 โมดูล

2.4 สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric coefficient) และ อันดับของปฏิกิริยา (Order of reaction)

สำหรับการสกัดไอออนปรอทในรูป $(\text{HgCl}_{n+2})^{n-}$ ด้วยสารสกัด **Aliquat 336** สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric coefficient) ได้จากความสัมพันธ์จากกฎของ **Flick** โดยในสมการที่ (2.27) แสดงถึงปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบปรอทคลอไรด์ (HgCl_2) ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กลายเป็นสารประกอบไอออนปรอทในรูป $(\text{HgCl}_{n+2})^{n-}$ โดยในสภาวะที่ไอออนคลอไรด์อิสระ (Cl^-) มากเกินพอ จากนั้นสารประกอบไอออนปรอทในรูป $(\text{HgCl}_{n+2})^{n-}$ จะทำปฏิกิริยากับสารสกัด **Aliquat 336** ซึ่งแสดงในรูป $(\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-)$ ที่บริเวณผิวสัมผัสตามสมการที่ (2.28)



โดยที่ n คือ สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric coefficient)

ค่าคงที่สมดุลการสกัด K_{ex} ของไอออนปรอทในการสกัดด้วยสารสกัด **Aliquat 336** โดยใช้ค่าจากการทดลองมาคำนวณได้ตามสมการที่ (2.29)

$$K_{\text{ex}} = \frac{\overline{[(\text{R}_4\text{N}^+)_n \bullet (\text{HgCl}_{n+2})^{n-}]} [\text{Cl}^-]^n}{[(\text{HgCl}_{n+2})^{n-}] [(\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-)]^n} \quad (2.29)$$

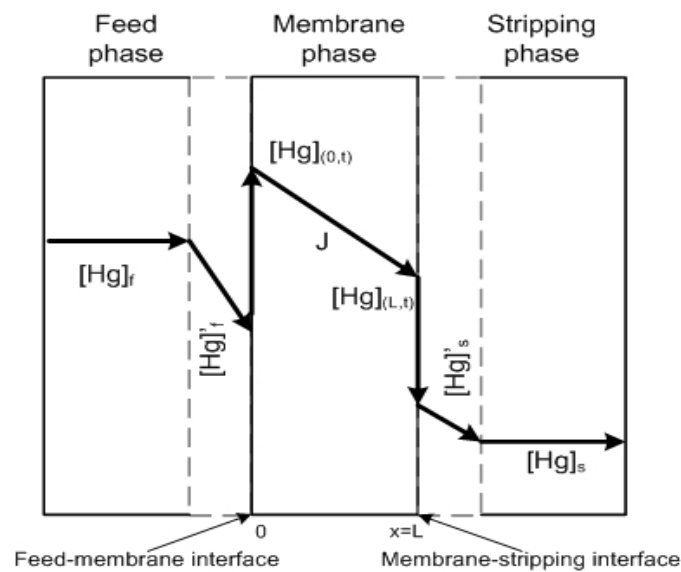
อัตราส่วนการกระจายตัว (**The distribution ratio**) ของไอออนปรอท แสดงในสมการที่ (2.30)

$$D = \frac{[(R_4N^+)_n \cdot (HgCl_{n+2})^{n-}]}{[HgCl_{n+2})^{n-}] = K_{ex} \frac{[(R_4N^+Cl^-)]^n}{[Cl^-]^n} \quad (2.30)$$

จากกฎของ **Fick** ได้นิยามความสัมพันธ์ของค่าฟลักซ์ดังสมการที่ (2.31)

$$J = -D * \frac{dc}{dx} \quad (2.31)$$

เมื่อ J คือ ค่าฟลักซ์ dc คือ ค่าแตกต่างความเข้มข้นของไอออนปรอท ในพื้นที่หน้าตัดเล็กๆ dx คือ ความหนาของเยื่อแผ่นเหลว และ D^* คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (**Diffusion coefficient**)



รูปที่ 2.10 แสดงความเข้มข้นในแต่ละตำแหน่งของการถ่ายโอนมวล

จากรูปที่ 2.10 แสดงถึงบริเวณการถ่ายโอนมวล โดยที่ แกน x เป็นแกนที่ตั้งฉากกับบริเวณผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งที่ $x=0$ เป็นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว และที่ $x=L$ เป็นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ โดยที่ $[Hg]_{(0,t)}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่บริเวณ $x=0$ และ $[Hg]_{(s,t)}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่บริเวณ $x=L$ โดยที่สภาวะคงตัวของกระบวนการ (**Steady state**) สามารถแสดงความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลได้ตามสมการดังนี้

$$-\frac{dc}{dx} = \frac{[\text{Hg}]_{\text{f,org}} - [\text{Hg}]_{\text{s,org}}}{L} \quad (2.32)$$

จากการกระจายตัวของไอออนปรอทระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการกระจายตัวของไอออนปรอทระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว เพราะฉะนั้นสามารถละทิ้งค่า $[\text{Hg}]_{\text{(s,org)}}$ ได้ สมการที่ (2.33) จึงเขียนได้ว่า

$$J = D * \frac{[\text{Hg}]_{\text{f,org}}}{L} \quad (2.33)$$

จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการกระจายตัว (**Distribution ratio**) ของไอออนปรอทสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.34)

$$D = \frac{[\text{Hg}]_{\text{f,org}}}{[\text{Hg}]_{\text{f}}} \quad (2.34)$$

$$[\text{Hg}]_{\text{f,org}} = D[\text{Hg}]_{\text{f}} \quad (2.35)$$

เมื่อ $[\text{Hg}]_{\text{f}}$ คือค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน เมื่อรวมสมการที่ (2.33) และ (2.35) ได้ว่า

$$J = D * \frac{D[\text{Hg}]_{\text{f}}}{L} \quad (2.36)$$

จากสมการที่ (2.30) จึงสามารถเขียนสมการที่ (2.37) ใหม่ได้ว่า

$$J = D * K_{\text{ex}} \frac{[(\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-)]^n}{[\text{Cl}^-]^n} \frac{[\text{Hg}]_{\text{f}}}{L} \quad (2.37)$$

จัดรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปของ **Log** ได้ว่า

$$\log J = \log D * + \log K_{\text{ex}} + n \log[(\text{R}_4\text{N}^+\text{Cl}^-)] - n \log[\text{Cl}^-] + \log \frac{[\text{Hg}]_{\text{f}}}{L} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ (2.27) และ (2.28) สมมติได้ว่า สารสกัด **Aliquat 336** ทำปฏิกิริยากับไอออนปรอทได้ทั้งหมด กรดไฮโดรคลอริกสามารถแตกตัวได้ **100**เปอร์เซ็นต์ และ ปรอทสามารถทำ

ปฏิกิริยากับไอออนคลอไรด์อิสระ (Cl) ได้ทั้งหมดดังสมการที่ (2.27) ซึ่งสรุปได้ว่า ไอออนคลอไรด์ (Cl) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนปรอทกับสารสกัด Aliquat 336 มีค่าเท่ากับไฮโดรเนียม (H⁺) ไอออนจากการแตกตัวของกรดไฮโดรคลอริก

โดยที่ [Hg]_f มีค่าคงที่ อุณหภูมิ และค่า K_{ex} มีค่าคงที่ ดังนั้นสมการที่ (2.38) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$\log J = n \log[H^+] + \text{constant} \quad (2.39)$$

ซึ่งจากสมการที่ n คือ สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric coefficient)

โดยค่าพังก์ซ์สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Pancharoen และคณะ, 2006)

$$J = \frac{\Delta[\text{Hg}]_f V_f}{\Delta t A} \quad (2.40)$$

เมื่อ V_f และ A คือ ปริมาตรของสารละลายป้อน และ พื้นที่ในการทำปฏิกิริยา ตามลำดับ จากปฏิกิริยาการสกัดในสมการที่ (2.28) สามารถเขียนปฏิกิริยาได้อย่างง่าย คือ



เมื่อ A คือ ไอออนปรอท, B คือ สารสกัด Aliquat 336, P คือ สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนปรอทในวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลว, Q คือ ไอออนคลอไรด์ และ a, b, p, q คือ สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ ของ A, B, P และ Q ตามลำดับ

ดังนั้น สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเขียนได้ดังนี้

$$r_{-A} = kC_A^n(x, t) \quad (2.42)$$

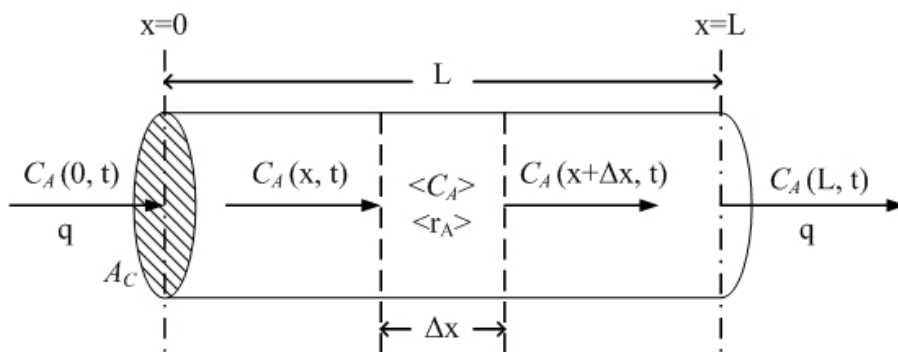
โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา และ n คือ อันดับของปฏิกิริยา

25 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Pancharoen และคณะ (Pancharoen และคณะ, 2011)

Pancharoen และคณะ ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการศึกษากลไกการถ่ายเทมวล โดยอาศัยทฤษฎีสมวลมวล (Conservation of mass) และอันดับของปฏิกิริยาการสกัด เป็นแนวคิดหลัก โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวถูกใช้ทำนายผลของความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาออกเทียบกับเวลา ซึ่งสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

1. ระบบเป็นแบบอุดมคติภายใต้สภาวะของอุณหภูมิ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ และคุณสมบัติในการถ่ายเทมวลคงที่
2. การเคลื่อนที่ผ่านของไอออน โลหะ ใน ภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวเกิดจากปฏิกิริยาการสกัดเท่านั้น
3. ปฏิกิริยาการสกัด ณ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว เป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่านั้น
4. รูปแบบความเข้มข้นในทิศทางตั้งฉากกับเส้นใยกลาง (ทิศทางรัศมี) ของไอออนโลหะ ในภูมิภาคสารละลายป้อนและภูมิภาคสารละลายนำกลับมีค่าคงที่ จึงมีเพียงรูปแบบความเข้มข้นของไอออนโลหะในทิศทางขนานกับเส้นใยกลางเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลง
5. การถ่ายเทมวลของไอออนโลหะผ่านบริเวณชั้นฟิล์มในทั้งสองภูมิภาคด้วยอิทธิพลของการแพร่ผ่านเกิดขึ้นเร็วมากจนไม่ถูกนำมาพิจารณา

สมการมวลของไอออนโลหะที่ถ่ายเทมวลในภูมิภาคสารละลายป้อนแสดงได้ดังรูปที่ 211



รูปที่ 211 การถ่ายเทมวลของไอออนโลหะในเส้นใยกลาง

เนื่องจากระบบที่ทำการศึกษา Δx มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นสมมูลมวลของไอออนโลหะจึงถูกอธิบายด้วยสมการที่ (243)

$$qC_A(x,t) - qC_A(x+\Delta x,t) + \langle r_A \rangle \Delta x A_C = \frac{d\langle C_A \rangle}{dt} \Delta x A_C \quad (243)$$

q คือ อัตราการไหลของสารละลายป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)

A_C คือ พื้นที่หน้าตัดภายในของเส้นใยกลวง (ตารางเซนติเมตร)

$\langle r_A \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร·นาที)

$\langle C_A \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นไอออนโลหะ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สมการที่ (243) ถูกหารตลอดด้วย $\Delta x A_C$ และถูกจัดให้เข้า $\lim \Delta x \rightarrow 0$ จะได้

$$-\frac{q}{A_C} \frac{\partial C_A(x,t)}{\partial x} - r_A(x,t) = \frac{\partial C_A(x,t)}{\partial t} \quad (244)$$

กรณีที่ $n \neq 0, 1$

$$C_A(x,0) = \left[C_A^{1-n}(0,0) + (1-n) \frac{k_f A_C}{q} x \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (245)$$

และ

$$\bar{C}_A(L,t) = [e^{b} \bar{C}_A^*(0,t-t_0)] \bullet u(t-t_0) \quad (246)$$

เมื่อ $u(t-t_0)$ คือ **Unit function**

$$u(t-t_0) = 0, \quad t < t_0$$

$$u(t-t_0) = 1, \quad t \geq t_0$$

$$\bar{C}_A(L, t) = C_A(L, t) - C_A(L, 0)$$

$$t_0 = \frac{A_c L}{q}$$

$$b = \left(\frac{A_c k n}{q g} \right) \ln \left(\frac{g L + I}{I} \right)$$

$$g = \frac{(1-n) A_c k}{q}$$

$$I = C_A^{1-n}(0, 0)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของเส้นใยกลาง (เดซิเมตร) t คือ เวลา (นาท) k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา และ n คือ อันดับของปฏิกิริยา

สำหรับกรณีการสกัดในระบบแบบกะ ความเข้มข้นของไอออนโลหะขาออก จะถูกเฉลี่ย ความเข้มข้นในถังเก็บก่อนถูกป้อนกลับไปอีกครั้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (247)

$$\bar{C}_A^*(0, t - t_0) = \frac{(V_{FT} - V_F) + V_F \bar{C}_A(0, t - t_0)}{V_{FT}} \quad (247)$$

โดย \bar{C}_A^* คือ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยภายในถังเก็บของไอออนโลหะในระบบการสกัดแบบกะ

เมื่อ V_{FT} และ V_F คือ ปริมาตรสุทธิของสารละลายป้อน และ ปริมาณของสารละลายป้อนในแต่ละรอบ ตามลำดับ

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

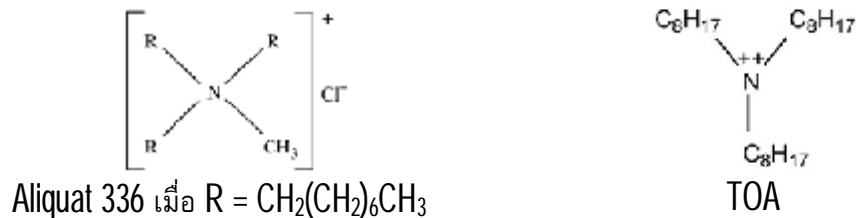
ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษาการสกัด ไอออนของปรอทรวมถึงการศึกษาความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลในกระบวนการสกัด โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	บริษัท
ไอออน โลหะที่ต้องการสกัด	Mercury	$(\text{HgCl}_4)^{2-}$	-
สารละลายป้อน	น้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุด เจาะก๊าซธรรมชาติ	-	บริษัทซาลาแมนเดอร์ เอ็นเนอร์ยี (โครงการ บัวหลวง) จำกัด.
สารปรับ pH ในสารละลายป้อน	กรดไฮโดรคลอริก	HCl	Qrec
สารสกัดประเภทเบส	TOA Aliquat 336	$[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{N}]^+\text{CH}_3$ $\text{CH}_3\text{N}[(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3]_3\text{Cl}^-$	Sigma - Aldrich Sigma - Aldrich
ตัวทำละลายอินทรีย์	โทลูอิน (Toluene)	C_7H_8	Merck
สารละลายนำกลับ	ไทโอยูเรีย	$\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$	Merck

โดยสูตร โครงสร้างสารสกัด Aliquat 336 และ TOA แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดง โครงสร้างทางเคมีของสารสกัด Aliquat 336 และ TOA

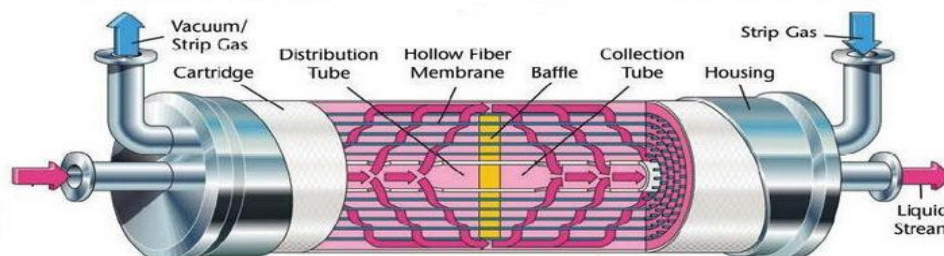
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 การทดลองด้วยวิธี Solvent Extraction

1. เครื่องปั่นกวนชนิดแม่เหล็ก
2. วัสดุการทดลองที่ทำจากโพลีโพลีลีน
 - ก. กรวยแยกขนาด 500 ml
 - ข. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml
 - ค. บีกเกอร์ขนาด 500 ml
 - ง. กระบวยตวง 250 ml

3.2.2 การทดลอง Hollow Fiber Supported Liquid Membrane

1. ชุดทดลอง **Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System** รุ่น **Cat. #5PCM-106** ของบริษัท **Hoechst Celanese Corporation** ประกอบด้วย
 - เครื่องสูบ 2 ชุด ที่มีอัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที
 - มาตรการและชุดควบคุมอัตราการไหล 2 ชุด
 - มาตรการความดัน 2 ชุด
2. อุปกรณ์เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ตัวรองรับ ได้แก่ เส้นใยกลวงพอลิโพรไพลีนชนิดมีรูพรุน **Celgard[®] X-40** ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นมอดูล ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.2
3. เครื่อง **Inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES)** รุ่น **JY 2000** บริษัท **JY JOBIN YVON (HORIBA)** ใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอท



รูปที่ 3.2 มอดูลของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง (Pancharoen และคณะ, 2010)

ตารางที่ 32 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลางโพลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	ชนิด/ขนาด
วัสดุเส้นใยกลาง	โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)
จำนวนเส้นใยกลาง	35,000 เส้น
ความพรุนของเส้นใยกลาง	25 เปอร์เซ็นต์
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลาง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 ตารางเมตร (15.2 ตารางฟุต)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
มิติของชุดเส้นใยกลาง	2.5×8 นิ้ว
ความดันแตกต่างสูงสุด	42 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (60 psi)
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1 ถึง 60 องศาเซลเซียส

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลสารปรอทในแต่ละวัฏภาค ณ สถานะสมดุลด้วยวิธี Solvent Extraction มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อน (น้ำทิ้งที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติ) ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร โดยนำน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติที่ได้จากบริษัทบริษัทชลาแมนเดอร์เอ็นเนอร์ยี (โครงการบัวหลวง) จำกัด มากรองเอาสิ่งสกปรกออกโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 เก็บตัวอย่างเริ่มต้น 30 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล
2. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยการเติม HCl ให้มีความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร
3. ปรับค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทโดยเติม $HgCl_2$ ให้มีความเข้มข้นของปรอท 10 ppm เก็บตัวอย่างเริ่มต้น 30 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล
4. เจือจางสารละลายป้อนเริ่มต้นให้มีความเข้มข้น 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 ppm โดยมีปริมาตรตัวอย่างละ 100 ppm เก็บตัวอย่างเริ่มต้น 30 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล
5. เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวสำหรับใช้ในกระบวนการ Solvent Extraction จากการเจือจางสารสกัด Aliquat 336 ในโทลูอีนให้มีความเข้มข้น 10% ปริมาณ 350 มิลลิลิตร

6. เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลาย **Thiourea** ความเข้มข้น **0.1** โมลต่อลิตร ปริมาตร **50** มิลลิลิตร
7. นำสารละลายป้อนปริมาตร **50** มิลลิลิตร ในแต่ละตัวอย่างใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด **250** มิลลิลิตร ผสมกับสารสกัด **Aliquat 336** ปริมาณ **50** มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนเป็นเวลา **50** นาที แล้วปล่อยให้แยกชั้น เมื่อแยกชั้นแล้วทำการเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์ และแยกสารสกัดที่ได้มาผสมกับสารละลายนำกลับปริมาตร **40** มิลลิลิตร ทำการปั่นกวนเป็นเวลา **50** นาที แล้วปล่อยให้แยกชั้น เมื่อแยกชั้นแล้วทำการเก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับเพื่อนำไปวิเคราะห์
8. นำตัวอย่างที่เก็บจากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง **ICP-OES**

3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดและนำกลับไอออนปรอท มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อน (น้ำทิ้งที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติ) ปริมาณ **1050** มิลลิลิตร โดยนำน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติที่ได้จากบริษัทชลาแมนเดอร์เอ็นเนอร์ยี (โครงการบัวหลวง) จำกัดมารองเอาสิ่งสกปรกออกโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ **1** เดิมกรดไฮโดรคลอริกให้มีความเข้มข้น **0.1** โมลต่อลิตรและเก็บตัวอย่างเริ่มต้น **50** มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลาย **Thiourea** ความเข้มข้น **0.3** โมลต่อลิตร ปริมาตร **1050** มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น **50** มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใย โดยใช้สารสกัด **Aliquat 336** ความเข้มข้น **2%** โดยปริมาตร ปริมาณ **500** มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง
4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าทางด้านท่อและด้านเปลือกของมอดูลเส้นใยกลวงให้ไหลวนเป็นเวลา **25** นาที เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง จากนั้นป้อนน้ำ **DI** เข้าทางด้านท่อและด้านเปลือกเพื่อไล่สารสกัดที่ค้างอยู่ในท่อและเปลือกของเส้นใยกลวง
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเป็น **0.2, 0.3, 0.4** และ **0.5** โมลต่อลิตร

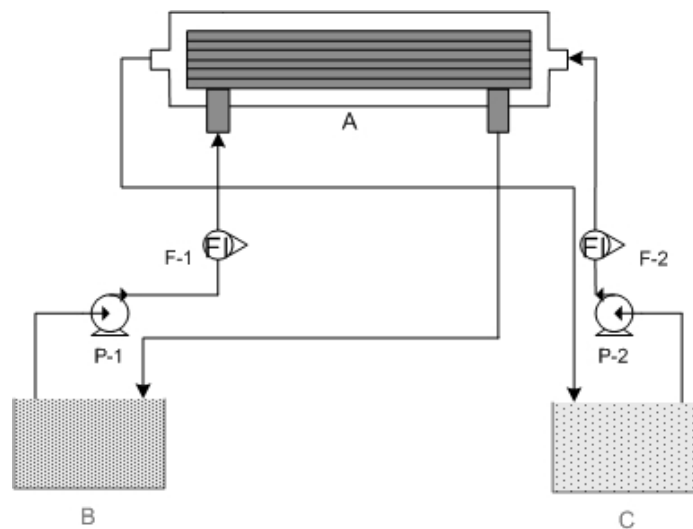
6. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอท ด้วยเครื่อง **ICP-OES**
7. ทำการทดลองซ้ำทุกขั้นตอน โดยทำการเปลี่ยนสารสกัดเป็น **TOA** ความเข้มข้น **3%** โดยปริมาตร

3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายอินทรีย์ต่อการสกัดและนำกลับไอออนปรอท มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทเจือปนให้ค่าความเป็นกรดของสารละลายป้อนเท่ากับค่าความเป็นกรดที่ทำให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่สุดจากการทดลองที่ 2 ปริมาตร **1050** มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น **50** มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลาย **Thiourea** ความเข้มข้น **0.3** โมลต่อลิตรเป็นความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาตร **1050** มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น **50** มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ใน โมดูลเส้นใย โดยใช้สารสกัด **Aliquat 336** ความเข้มข้น **2%** โดยปริมาตร ปริมาตร **500** มิลลิลิตร
4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าทางด้านท่อและด้านเปลือกของมอดูลเส้นใย กลวงให้ไหลวนเป็นเวลา **25** นาที เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง จากนั้นป้อนน้ำ **DI** เข้าทางด้านท่อและด้านเปลือกเพื่อไล่สารสกัดที่ค้างอยู่ในท่อและเปลือกของเส้นใยกลวง
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด **Aliquat 336** ในโถลูอินเป็น **3, 4, 5** และ **6** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ
6. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอท ด้วยเครื่อง **ICP-OES**
7. ทำการทดลองซ้ำทุกขั้นตอน โดยทำการเปลี่ยนสารสกัดเป็น **TOA** ความเข้มข้น **2%** โดยปริมาตร

3.34 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ Thiourea ต่อการสกัดและนำกลับไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทเจือปนให้ค่าความเป็นกรดของสารละลายป้อนเท่ากับค่าความเป็นกรดที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่สุดจากการทดลองที่ 2 ปริมาตร 1050 มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น 500 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลาย Thiourea ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตรเป็นความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาตร 1050 มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ใน โมดูลเส้นใย โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 โดยความเข้มข้นของสารสกัดเป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าทางด้านท่อและด้านเปลือกของมอดูลเส้นใยกลวงให้ไหลวนเป็นเวลา 25 นาที เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในชุดทดลอง จากนั้นป้อนน้ำ DI เข้าทางด้านท่อและด้านเปลือกเพื่อไล่สารสกัดที่ค้างอยู่ในท่อและเปลือกของเส้นใยกลวง
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารนำกลับ Thiourea เป็น 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
6. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง ICP-OES
7. ทำการทดลองซ้ำทุกขั้นตอน โดยทำการเปลี่ยนสารสกัดเป็น TOA โดยความเข้มข้นของสารสกัดเป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3



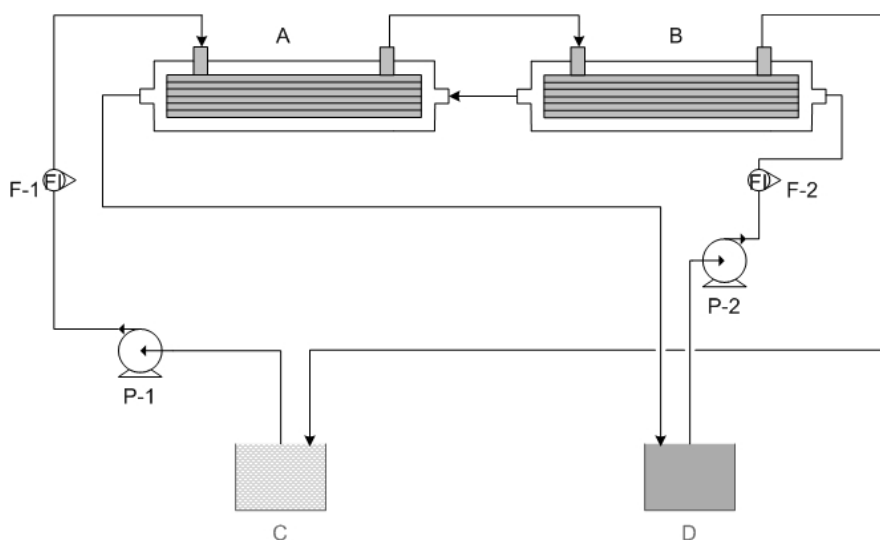
รูปที่ 3.3 แสดงการทดลองด้วยการไหลแบบ **counter-current** สำหรับการดำเนินการระบบแบบกะ (**Batch system**) ในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยที่ (A) เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง; (B) ถังเก็บสารละลายป้อน (C) ถังเก็บสารละลายนำกลับ; (P-1, P-2) Gear pump; (F-1, F-2) เครื่องวัดอัตราการไหล

3.3.5 ศึกษาผลของอัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับต่อการสกัดและนำกลับไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทเจือปนให้ค่าความเป็นกรดของสารละลายป้อนเท่ากับค่าความเป็นกรดที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่สูงสุดจากการทดลองที่ 2 ปริมาตร 1050 มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น 500 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลาย **Thiourea** ความเข้มข้น ที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่สูงสุดจากการทดลองที่ 4 ปริมาตร 1050 มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใย โดยใช้สารสกัด **Aliquat 336** โดยความเข้มข้นของสารสกัดเป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3 ปริมาณ 500 มิลลิลิตร
4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าทางด้านท่อและด้านเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวงให้ไหลวนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เยื่อแผ่นเหลวยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้น

ใยกลวงในชุดทดลอง จากนั้นป้อนน้ำ DI เข้าทางด้านท่อและด้านเปลือกเพื่อไล่สารสกัดที่ค้างอยู่ในท่อและเปลือกของเส้นใยกลวง

5. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลเท่ากับที่ **75 ml** ต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน ทดลองในระบบแบบกะ โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ **30 ml** ที่เวลา **2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40** และ **50** นาทีของการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ เป็น **100, 150, 200** และ **300** มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
7. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง **ICP-OES**
8. ทำการทดลองซ้ำทุกขั้นตอน โดยทำการเปลี่ยนสารสกัดเป็น **TOA** โดยความเข้มข้นของสารสกัดเป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ **3**



รูปที่ 3.5 แสดงการทดลองด้วยการไหลแบบ **counter-current** สำหรับการดำเนินการระบบแบบกะ (**Batch system**) ในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง แบบ 2 โมดูล โดยที่ (A) เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โมดูลที่ 1; (B) เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โมดูลที่ 2; (C) ถังเก็บสารละลายป้อน (D) ถังเก็บสารละลายนำกลับ; (P-1, P-2) Gear pump; (F-1, F-2) เครื่องวัดอัตราการไหล

3.3.6 ศึกษาผลของระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล ต่อการสกัดและนำกลับไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่น เหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนปรอทเจือปนให้ค่าความเป็นกรดของสารละลายป้อนเท่ากับค่าความเป็นกรดที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่สุดจากการทดลองที่ 2 ปริมาตร 1 ลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลาย Thiourea ความเข้มข้น ที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดแยกไอออนปรอทที่สุดจากการทดลองที่ 4 ปริมาตร 1 ลิตร และเก็บตัวอย่างเริ่มต้น 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ใน โมดูลเส้นใย โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 โดยความเข้มข้นของสารสกัดเป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3 ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในตัวที่ 1
4. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ใน โมดูลเส้นใย โดยใช้สารสกัด TOA โดยความเข้มข้นของสารสกัดเป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3 ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงในตัวที่ 2
5. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองโมดูลเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลเท่ากับที่ 100ml ต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน ทดลองในระบบแบบกะ ซึ่งเรียง โมดูลสารสกัดเป็น Aliquat 336 และ TOA โดยเก็บตัวอย่างครั้งละ 30ml ที่เวลา 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40 และ 50 นาที ของการทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์
6. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง ICP-OES
7. ทำการทดลองซ้ำทุกขั้นตอน โดยทำการเปลี่ยนการเรียงโมดูลสารสกัดเป็น TOA และ Aliquat 336, Aliquat 336 และ Aliquat 336, TOA และ TOA โดยความเข้มข้นของสารสกัดเป็นความเข้มข้นที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3

34 ขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลวง

ในการทดลองทุกครั้งหลังจากการใช้เครื่องมือจะต้องมีการล้างทำความสะอาดตัวรองรับเส้นใยกลวงเนื่องจากอนุพุนจุลภาคภายในจะถูกอุดตันไปด้วยสิ่งสกปรก รวมถึงสารเคมีต่างๆ ซึ่งจะเป็นตัวแปรหนึ่งที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง รวมถึงอาจทำให้ผลการทดลองครั้งต่อไปคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลวงจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นในข้างต้น สำหรับวิธีการล้างทำความสะอาดเส้นใยกลวงมีขั้นตอนดังนี้

1. ล้างเส้นใยกลวงด้วยน้ำกลั่นไหลผ่านโมดูลอย่างต่อเนื่องประมาณ 15 นาที
2. ใช้สารละลายกรดที่มีความสามารถละลายสารที่อุดตันในรูพุนของเส้นใยกลวงได้ ซึ่งกรดดังกล่าวต้องมีความเข้มข้นไม่เกิน 1 M ไหลวนในโมดูล เป็นเวลา 20 นาที
3. ใช้สารทำความสะอาดไหลวนในโมดูล เป็นเวลา 15 นาที
4. ให้น้ำกลั่นไหลผ่านโมดูลอย่างต่อเนื่อง ประมาณ 10-15 นาที

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

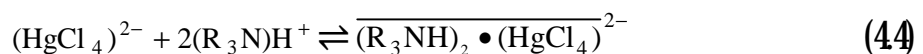
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทโดยใช้กระบวนการ เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความสามารถในการคัดเลือกไอออนปรอทของสารสกัด ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ และอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับ สำหรับการศึกษประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทพิจารณาจากค่าร้อยละการสกัด (**Percent Extraction, % Ex**) ค่าร้อยละการนำกลับ (**Percent Recovery, % Re**) ซึ่งแสดงในสมการที่ (41) และสมการที่ (42) ตามลำดับ

$$\% \text{Ex} = \frac{C_{f,in} - C_{f,out}}{C_{f,in}} \times 100 \quad (41)$$

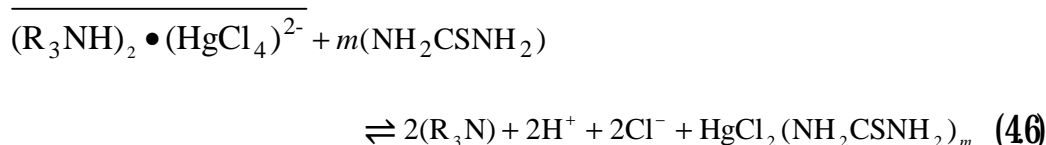
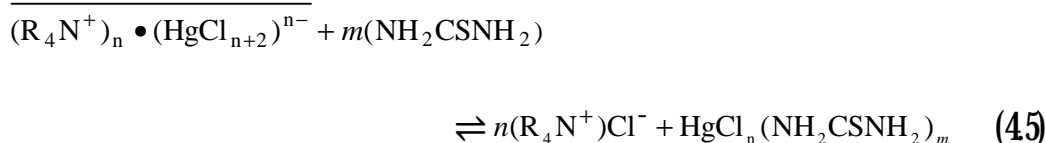
$$\% \text{Re} = \frac{C_{s,out}}{C_{f,in}} \times 100 \quad (42)$$

เมื่อ $C_{f,in}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า $C_{f,out}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก และ $C_{s,out}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก

โดยปฏิกิริยาการสกัดของไอออนปรอทกับสารสกัด **Aliquat 336** แสดงในสมการที่ (228) ในสมการที่ (43) แสดงการทำปฏิกิริยาของสารสกัด **TOA** กับ ไฮโดรเนียมไอออน (H^+) เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลของสารสกัดให้เหมาะสมเพื่อที่จะทำปฏิกิริยาการสกัดกับไอออนปรอทดังสมการที่ (44)



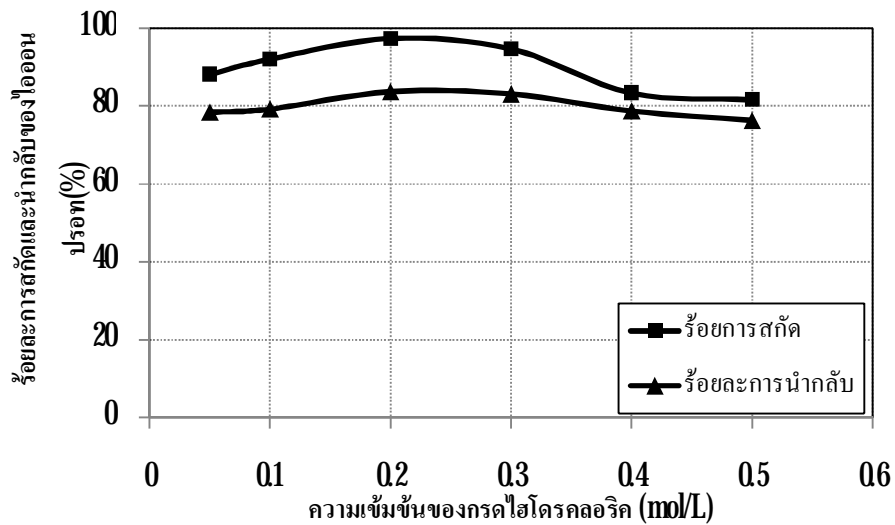
ปฏิกิริยาการนำกลับของไอออนปรอทกับสารละลายนำกลับ **Thiourea** ในการสกัดกับสารสกัด **Aliquat 336** และ สารสกัด **TOA** แสดงในสมการที่ (45) และ (46) ตามลำดับ



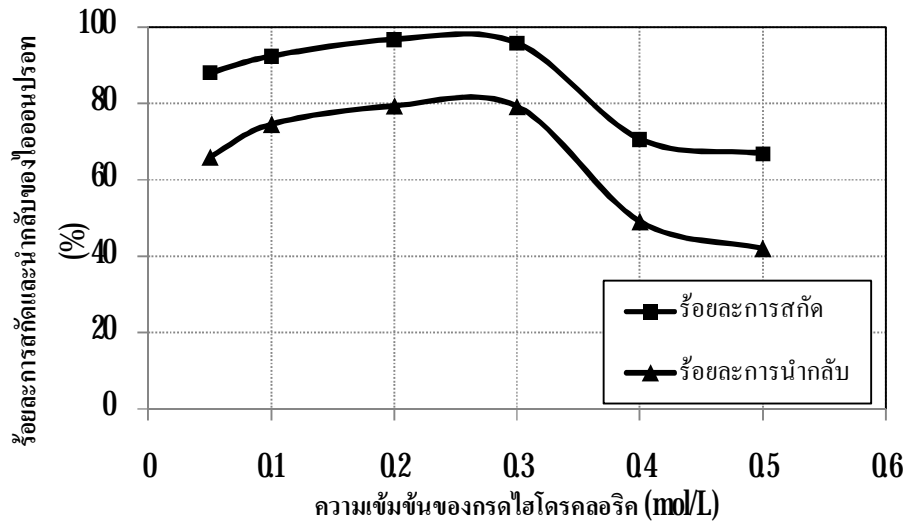
41 ผลการทดลอง

41.1 ผลของความเป็นกรดในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พวยด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นกรดในสารละลายป้อนที่มีผลต่อ ร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนปรอท โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นกรดที่ใช้ในการปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน ซึ่งการทดลองจะทำการปรับค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเป็น **0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5** โมลต่อลิตร โมดูลเส้นใยกลวงบรรจุด้วยสารสกัด **Aliquat 336** ความเข้มข้น **3%** โดยปริมาตรละลายในตัวทำละลายโทลูอินในการทดลองที่ **1** โมดูลเส้นใยกลวงบรรจุด้วยสารสกัด **TOA** ความเข้มข้น **3%** โดยปริมาตรละลายในตัวทำละลายโทลูอิน โดยใช้สารละลาย **Thiourea** ความเข้มข้น **0.3** โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากัน คือ **100** มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและทำการทดลองในระบบแบบกะ (**Batch system**) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ **41** และ **42**



รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ HCl ในสารละลายป้อนต่อ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นสารสกัด Aliquat 336 = 3% โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.3 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที



รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ HCl ในสารละลายป้อนต่อ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นสารสกัด TOA = 3% โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.3 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

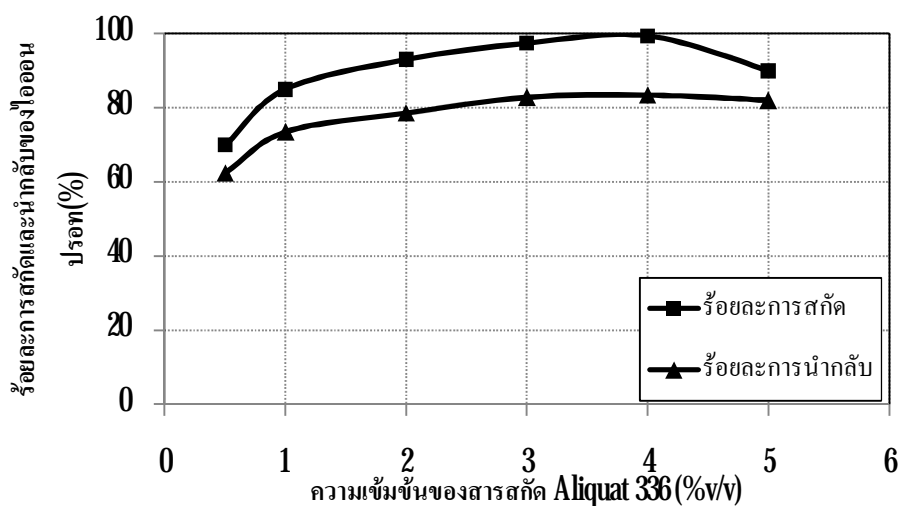
จากรูปที่ 41 และ 42 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากกรดไฮโดรคลอริกที่เติมลงไปจะเกิดการแตกตัวให้ไอออนคลอไรด์อิสระ (Cl⁻) เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อการเกิดประจุเชิงซ้อนของปรอท ในส่วนของการทดลองที่ใช้ TOA เป็นสารสกัด ไฮโดรเนียมไอออน (H⁺) จากกรดไฮโดรคลอริกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ TOA เป็นสารประกอบของเอมีนที่มีประสิทธิภาพในการสกัดไอออนโลหะ ผลจากการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเลื่อนไปข้างหน้า ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของปรอทกับสารสกัดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลการนำกลับเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยในการทดลองที่ใช้สารสกัด Aliquat 336 พบว่าที่ค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่ 0.2 โมลต่อลิตร จะให้ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับสูงที่สุด คือ ร้อยละ 97.4 และ ร้อยละ 83.8 ตามลำดับ ในส่วนของการทดลองที่ใช้ TOA พบว่าที่ค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่ 0.2 โมลต่อลิตร จะให้ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับสูงที่สุด คือ ร้อยละ 96.81 และ ร้อยละ 79.50 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนมากเกินไปเกินความเข้มข้นที่เหมาะสม ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับจะมีแนวโน้มลดลง จากผลของค่าความเป็นกรด เพราะทั้งสารสกัด Aliquat 336 และ TOA เป็นสารสกัดชนิดเบส ซึ่งมักจะเกิดปฏิกิริยาการสกัดได้ดีในสภาวะกรดอ่อน

4.1.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายอินทรีย์ต่อการสกัดและนำกลับไอออนปรอท ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

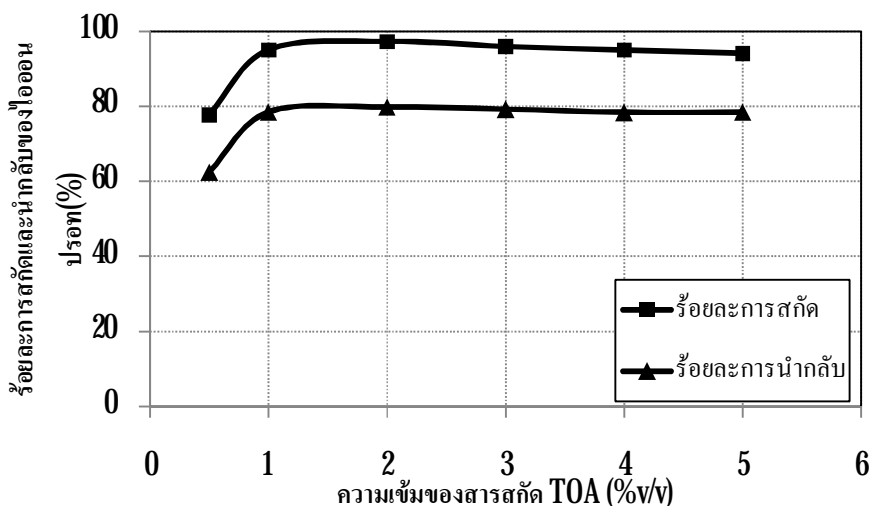
การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายอินทรีย์ต่อการสกัดและนำกลับไอออนปรอท จะทำการทดลองด้วยการปรับค่าความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 กับ TOA ในสารละลายอินทรีย์เป็น 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งสองสารสกัดซึ่งใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเป็น 0.2 โมลต่อลิตร สำหรับการทดลองที่ใช้ Aliquat 336 เป็นสารสกัด และ 0.3 โมลต่อลิตร สำหรับการทดลองที่ใช้ TOA ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.1 และใช้สารละลาย thiourea ความเข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของ

สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและทำการทดลองในระบบแบบกะ (Batch system) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 43 และ 44

จากรูปที่ 43 และ 44 การทดลองที่ใช้สารสกัด Aliquat 336 พบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลของเส้นใยกลวงจาก 0.5 จนถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนปรอทมีแนวโน้มสูงขึ้น ในส่วนของการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA พบว่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนปรอทมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด TOA จาก 0.5 จนถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ ได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น เนื่องจากเมื่อสารสกัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยากับไอออนปรอทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน มากขึ้น ทำให้เกิดการนำกลับไอออนปรอทมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 ในเยื่อแผ่นเหลวต่อ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นของ HCl ในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.3 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

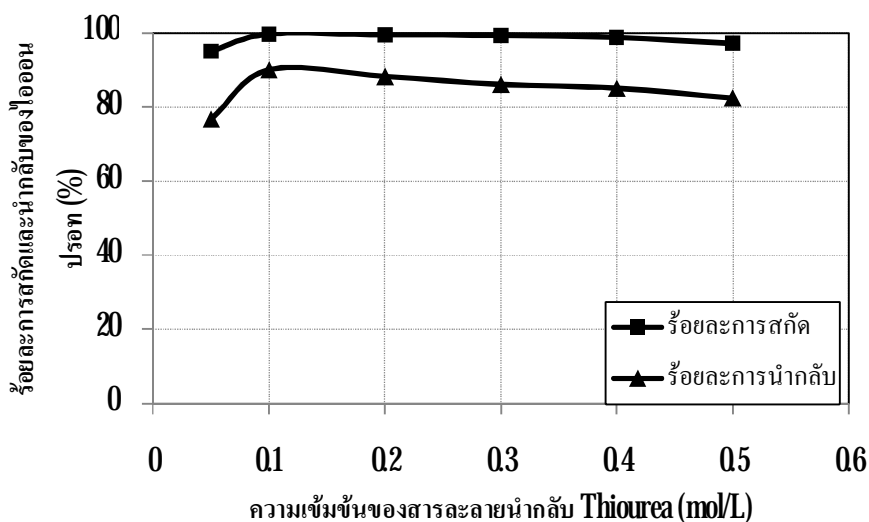


รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในเยื่อแผ่นเหลวต่อ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นของ HCl ในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.3 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

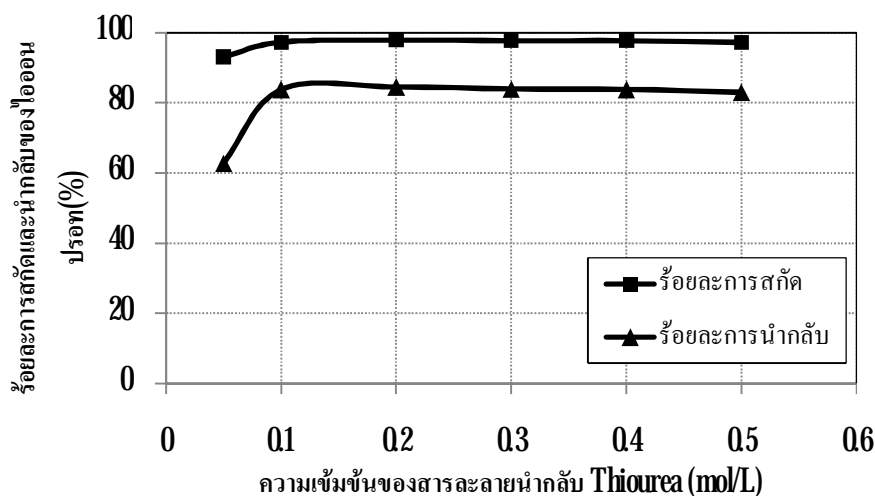
แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 มีค่ามากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และสารสกัด TOA มีค่ามากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทจะมีค่าลดลง เป็นผลมาจากความสามารถในการของพื้นที่การถ่ายโอนมวลในเส้นใยกลวง กล่าวคือ เส้นใยกลวงมีขีดความสามารถจำกัดในการบรรจุสารละลายเยื่อแผ่นเหลว อีกสาเหตุสำคัญที่ลดประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับปรอท คือ คุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงของเยื่อแผ่นเหลว โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น ทำให้ขวางกั้นการถ่ายโอนมวลไอออนปรอทจากสารละลายป้อนไปสู่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวหรือก็คือจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D^*) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนปรอทกับสารสกัดที่ละลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้ มีค่าน้อยลง ดังความสัมพันธ์ตามสมการของ Stokes และ Einstein (Schulz, 1988 และ Cussler, 1997)

4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั่น Thiourea ต่อการสกัดและน้ำกลั่นไอออนโปรทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั่นต่อการสกัดไอออนโปรท จะใช้ Thiourea ละลายกับน้ำที่ปราศจากไอออน (DI water) เป็นสารละลายน้ำกลั่น โดยจะทำการปรับความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั่นเป็น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 โมลต่อลิตร ซึ่งตัวแปรอื่นจะใช้ข้อมูลจากผลการทดลองผลของความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ในสารละลายป้อน และความเข้มข้นของสารสกัดข้างต้นที่ทำให้ค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลั่นไอออนโปรทสูงสุด อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลั่นมีค่าเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและทำการทดลองในระบบแบบกะ (Batch system) ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 45 และ 46



รูปที่ 45 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ Thiourea ในสารละลายน้ำกลั่นต่อ ร้อยละการสกัดและน้ำกลั่นไอออนโปรท สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นของ HCl ในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด Aliquat 336 = 4% โดยปริมาตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและน้ำกลั่น = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

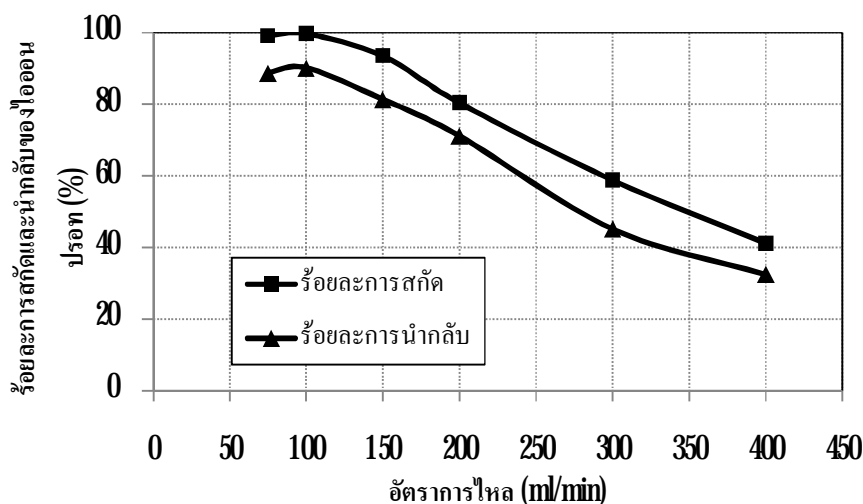


รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ Thiourea ในสารละลายนำกลับต่อ ร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอทสถานะการทดลอง: ความเข้มข้นของ HCl ในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด TOA = 2% โดยปริมาตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

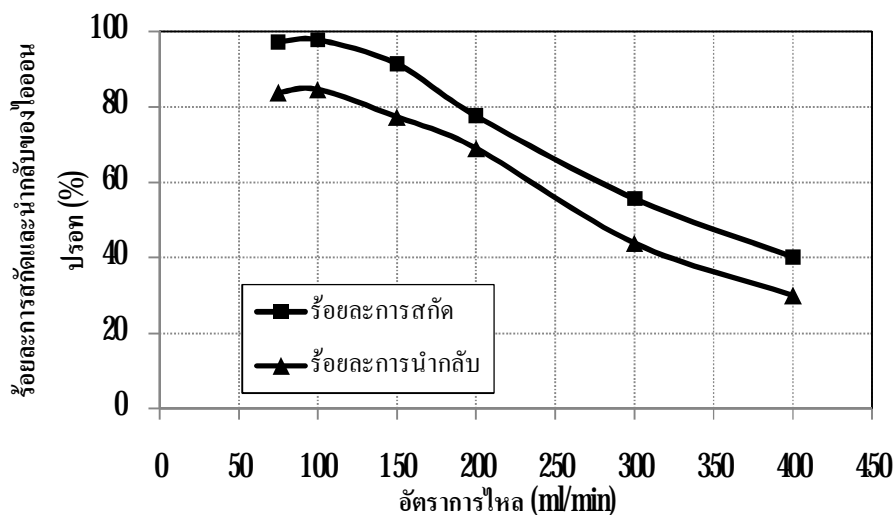
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ Thiourea ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากผลดังกล่าว แสดงได้ว่า Thiourea สามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับได้ โดยสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนปรอทกับสารสกัดจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเมมเบรนมาทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับดังสมการที่ 45 สำหรับการทดลองที่ใช้ Aliquat 336 เป็นสารสกัด และสมการที่ 46 สำหรับการทดลองที่ใช้ TOA เป็นสารสกัด แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Thiourea ในสารละลายนำกลับมากเกินไปความเข้มข้นที่เหมาะสม ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับจะมีแนวโน้มลดต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลของโมดูลเส้นใยกลวงมีค่าคงที่ จึงมีอัตราการถ่ายโอนมวลที่จำกัด จากการทดลองที่ใช้สารสกัด Aliquat 336 พบว่าที่ค่าความเข้มข้นของ Thiourea ในสารละลายนำกลับที่ 0.1 โมลต่อลิตร จะให้ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับสูงที่สุด คือ ร้อยละ 99.73 และ ร้อยละ 90.11 ตามลำดับ ในส่วนของการทดลองที่ใช้ TOA พบว่าที่ค่าความเข้มข้นของ Thiourea ในสารละลายนำกลับที่ 0.2 โมลต่อลิตร จะให้ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับสูงที่สุด คือ ร้อยละ 97.85 และ ร้อยละ 84.56 ตามลำดับ

4.1.4 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอท

การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวง โดยอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสกัดและนำกลับไอออนปรอทผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งการทดลองจะทำการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็น 75, 100, 150, 200, 300, และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที ในเวลาปฏิบัติการ 50 นาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและทำการทดลองในระบบแบบกะ (Batch system) โดยปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ในการทดลองที่ใช้ Aliquat 336 เป็นสารสกัด และในการทดลองที่ใช้ TOA เป็นสารสกัด ค่าความเข้มข้นสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ TOA เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความเข้มข้นของ Thiourea ในสารละลายนำกลับ เท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร ในการทดลองที่ใช้ Aliquat 336 เป็นสารสกัด และ 0.2 โมลต่อลิตร ในการทดลองที่ใช้ TOA เป็นสารสกัด โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอท สภาพการทดลอง: ความเข้มข้นของ HCl ในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด Aliquat 336 = 4 % โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.1 โมลต่อลิตร และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที



รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนปรอทสถานะการทดลอง: ความเข้มข้นของ HCl ในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด TOA = 2% โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.2 โมลต่อลิตร และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

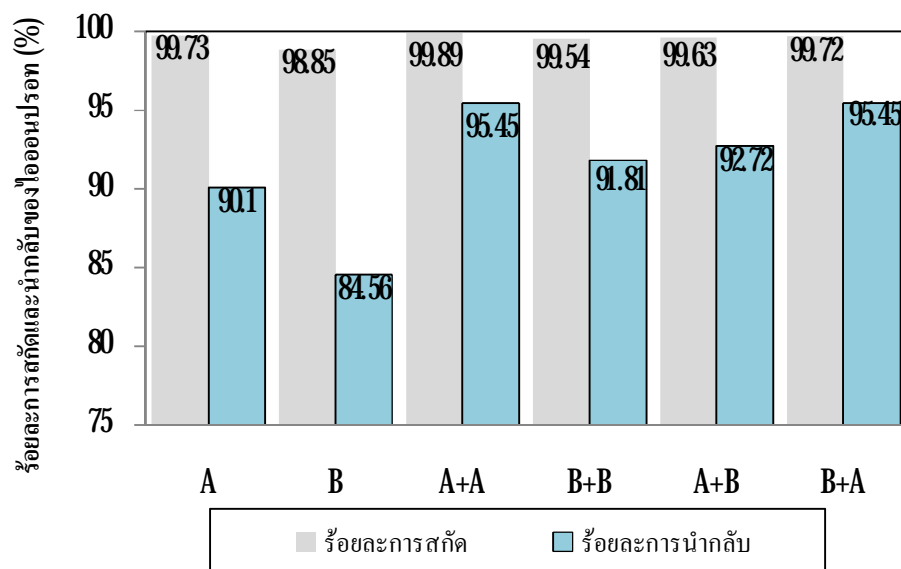
ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านโมดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอท แสดงดังรูปที่ 9 จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของการสกัดและนำกลับไอออนปรอทในการทดลองที่ใช้ Aliquat 336 เป็นสารสกัด และในการทดลองที่ใช้ TOA เป็นสารสกัด มีแนวโน้มเหมือนกัน โดยจากรูปพบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทจะลดลงเนื่องจากระยะเวลาที่ไอออนปรอทและสารสกัด ทำปฏิกิริยา หรือ Resident Time ลดลงส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับลดลงด้วย รวมถึงมีการเสียหายของเยื่อแผ่นเหลวอันเป็นผลมาจากแรงเฉือนต่อพื้นผิวเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล โดยจากการทดลองพบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุด คือ 100 ml/min โดยให้ร้อยละการสกัดและการนำกลับอยู่ที่ 99.73% and 90.1% ตามลำดับในการทดลองที่ใช้ Aliquat 336 เป็นสารสกัด และในการทดลองที่ใช้ TOA เป็นสารสกัดให้ร้อยละการสกัดและการนำกลับอยู่ที่ 97.85 และ ร้อยละ 84.56 ตามลำดับ

41.5 ผลของระบบการสกัดแบบ 2 โหมด ต่อการสกัดและนำกลับไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่น เหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ผลของระบบการสกัดแบบ 2 โหมด ทำการทดลองโดยใช้โหมดเส้นใยกลวง 2 โหมด โดยใช้สภาวะการทดลองที่ดีที่สุดจากการทดลองในการสกัดแบบ 1 โหมด ซึ่งการทดลองจะทำการบรรจุสารสกัด Aliquat 336 ในโหมดที่ 1 และ 2 เป็นการทดลองที่ 1 บรรจุสารสกัด TOA ในโหมดที่ 1 และ 2 เป็นการทดลองที่ 2 บรรจุสารสกัด Aliquat 336 ในโหมดที่ 1 และ สารสกัด TOA ในโหมดที่ 2 เป็นการทดลองที่ 3 และบรรจุสารสกัด TOA ในโหมดที่ 1 และ สารสกัด Aliquat 336 ในโหมดที่ 2 เป็นการทดลองที่ 4 โดยใช้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้เวลาในการทดลอง 50 นาที

จากรูปที่ 49 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนปรอท กับรูปแบบการสกัด จากผลการทดลองพบว่า การสกัดแบบ 1 โหมดที่ให้ผลการสกัดและนำกลับไอออนปรอทได้ดีที่สุดจะ ดำเนินการที่สภาวะความเข้มข้นสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 4% โดยปริมาตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนปรอทเท่ากับ 1.17 ppm สามารถสกัดและนำกลับไอออนปรอท ได้ร้อยละการสกัดและนำกลับเท่ากับ 99.73 และ 90.1 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก 0.003 ppm ที่เวลาการทดลอง 30 นาที และความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับ เท่ากับ 1.05 ppm ในส่วนการสกัดแบบ 2 โหมดการสกัด จากสภาวะการดำเนินการ ความเข้มข้นสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 4% โดยปริมาตร บรรจุในโหมดที่ 1 และ 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนปรอทเท่ากับ 1.10 ppm สามารถสกัดและนำกลับไอออนปรอท ได้ร้อยละการสกัดและนำกลับเท่ากับ 99.89 และ 95.45 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก 0.002 ppm ที่เวลาการทดลอง 15 นาที และความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับ เท่ากับ 1.05 ppm ที่เวลาการทดลอง 20 นาที ที่สภาวะการดำเนินการ ความเข้มข้นสารสกัด TOA เท่ากับ 2% โดยปริมาตร บรรจุในโหมดที่ 1 และ 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนปรอทเท่ากับ 1.10 ppm สามารถสกัดและนำกลับไอออนปรอท ได้ร้อยละการสกัดและนำกลับเท่ากับ 99.54 และ 91.81 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก 0.005 ppm ที่เวลาการทดลอง 15 นาที และความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับ เท่ากับ 1.01 ppm ที่เวลาการทดลอง 20 นาที ที่สภาวะการดำเนินการ ความเข้มข้นสารสกัด

Aliquat 336 เท่ากับ **4%** โดยปริมาตร บรรจุในโมดูลที่ **1** และ สารสกัด **TOA** เท่ากับ **2%** โดยปริมาตร บรรจุในโมดูลที่ **2** ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนปรอทเท่ากับ **1.10 ppm** สามารถสกัดและนำกลับไอออนปรอท ได้ร้อยละการสกัดและนำกลับเท่ากับ **99.63** และ **92.72** ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก **0.004 ppm** ที่เวลาการทดลอง **20** นาที และความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับ เท่ากับ **1.02 ppm** ที่เวลาการทดลอง **20** นาที และ ที่สภาวะการดำเนินการ ความเข้มข้นสารสกัด **TOA** เท่ากับ **2%** โดยปริมาตร บรรจุในโมดูลที่ **1** และสารสกัด **Aliquat 336** เท่ากับ **4%** โดยปริมาตร บรรจุในโมดูลที่ **2** ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนปรอทเท่ากับ **1.10 ppm** สามารถสกัดและนำกลับไอออนปรอท ได้ร้อยละการสกัดและนำกลับเท่ากับ **99.72** และ **95.45** ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก **0.003 ppm** ที่เวลาการทดลอง **20** นาที และความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับ เท่ากับ **1.05 ppm** ที่เวลาการทดลอง **20** นาที จากผลดังกล่าวสามารถบ่งชี้ถึงผลของการเพิ่มโมดูลการสกัดจะทำให้ระบบการสกัดและนำกลับเข้าสู่สภาวะคงตัว (**Steady state condition**) ได้เร็วขึ้น และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดและนำกลับไอออนปรอทได้ โดยสภาวะที่ดีที่สุดคือ สภาวะดำเนินการความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336** เท่ากับ **4%** โดยปริมาตร บรรจุในโมดูลที่ **1** และ **2**



รูปที่ 49 ความสัมพันธ์ของรูปแบบระบบการสกัดแบบ 1 โมดูล และ 2 โมดูลกับร้อยละการดูดซับและนำกลับไอออนปรอท โดยที่ (A) เป็นการสกัดโดยใช้สารสกัด Aliquat 336, (B) เป็นการสกัดโดยใช้สารสกัด TOA, (A+A) เป็นการสกัดโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และ 2, (B+B) เป็นการสกัดโดยใช้สารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และ 2, (A+B) เป็นการสกัดโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และ สารสกัด TOA ในโมดูลที่ 2 และ (B+A) เป็นการสกัดโดยใช้สารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และ สารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 2

4.1.6 สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric coefficient) และ อันดับของปฏิกิริยา (Order of reaction)

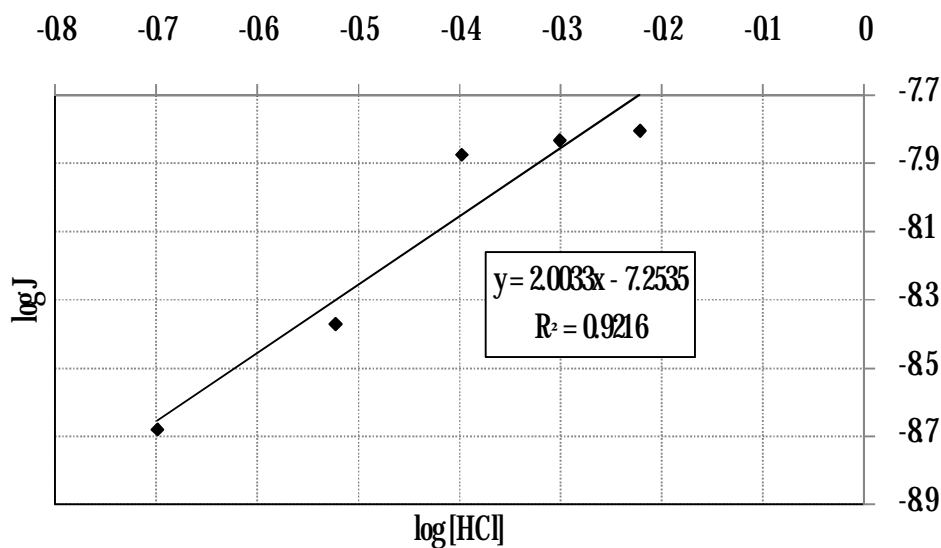
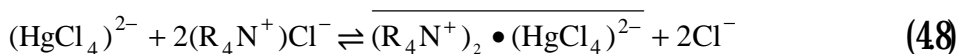
จากสมการที่ (2.39) เมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log J$ กับ $\log H^+$ ซึ่งเป็นสมการเส้นตรงที่ให้ค่าความชันเท่ากับ n โดยที่ n คือ สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ โดยเมื่อนำผลการทดลองจากการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับและการนำกลับ มาคำนวณหาค่าพังก์ชันโดยใช้สมการที่ (2.40) จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนถึง 0.6 โมลต่อลิตรแล้ว ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเป็นความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเส้นตรงที่ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.92 และให้ค่าความชันเท่ากับ 2.0033 เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่า สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการ

สัปดาห์ของไอออนปรอทด้วยสารสกัด **Aliquat 336** เท่ากับ **200** ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ **41**

ตารางที่ **41** สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการสกัดของไอออนปรอทด้วยสารสกัด **Aliquat 336**

ผู้วิจัย	สัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์
Lothongkum และคณะ (2011)	200
Francine และคณะ (2007)	200
งานวิจัยนี้	200

แทนค่า $n=2$ ลงในสมการที่ (2.28) ได้ปฏิกิริยาดังสมการที่ (48) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทด้วยสารสกัด **Aliquat 336**



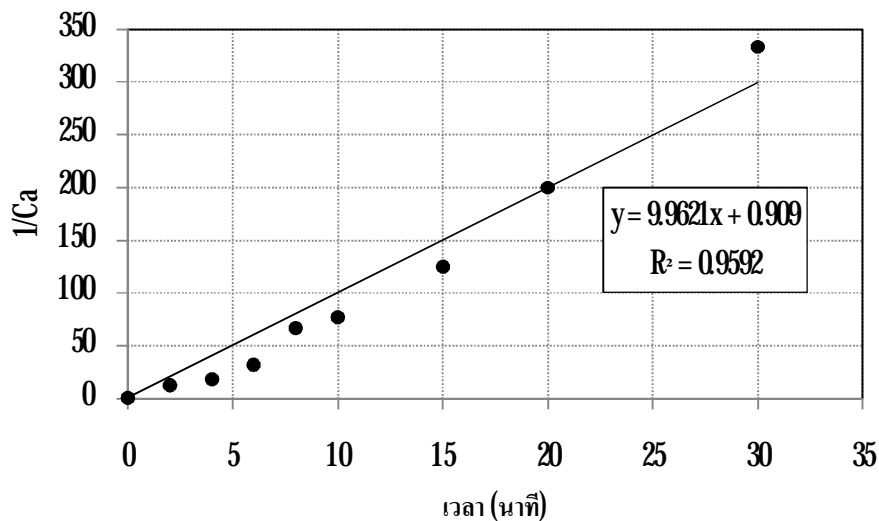
รูปที่ 410 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log[\text{HCl}]$ กับ $\log J$

จากสัมประสิทธิ์ปริมาณสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการสกัดของไอออนปรอทด้วยสารสกัด **Aliquat 336** เท่ากับ **2.00** สามารถคำนวณหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่สองจากสมการที่

$$\frac{1}{C_A} = k_f t + \frac{1}{C_{A0}} \quad (49)$$

เมื่อ C_{A0} และ C_A คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน และ ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนที่เวลาต่างๆ ตามลำดับ โดย k คือ ค่าคงของปฏิกิริยา

จากผลการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดไอออนปรอทด้วยสารสกัด **Aliquat 336** ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{C_A}$ กับเวลา โดยมีจุดตัดคือ $\frac{1}{C_{A0}}$ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (49) จากรูปที่ 411 แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ให้ค่าความชันของกราฟ เท่ากับ **9.9621** ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที ซึ่งก็คือค่าคงที่ของปฏิกิริยา และยังสามารถยืนยันได้ว่าปฏิกิริยาการสกัดดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง เพราะความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ให้ค่า R^2 เท่ากับ **0.9529**

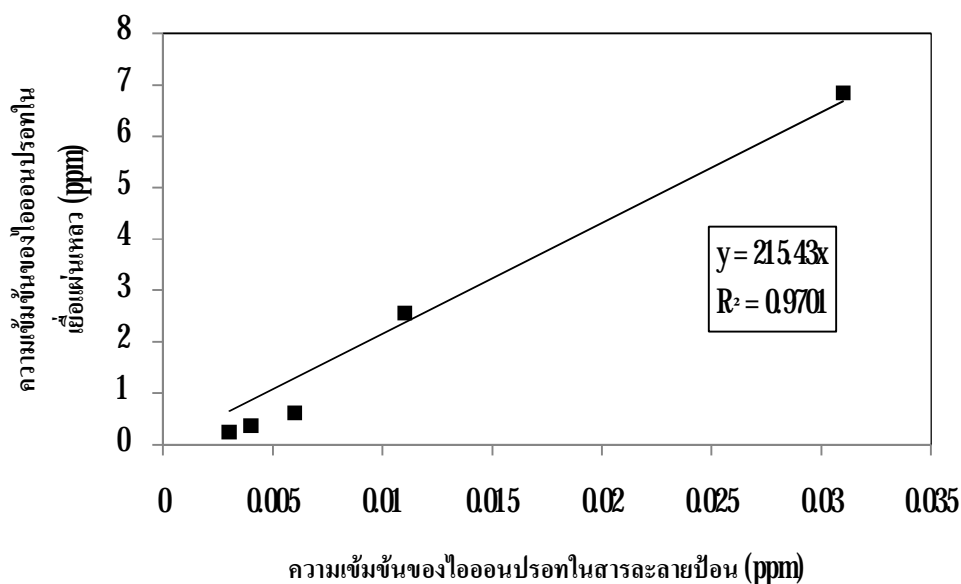


รูปที่ 411 แสดงความสัมพันธ์ของส่วนกลับของความเข้มข้นไอออนปรอทในสารละลายป้อนกับเวลาของกระบวนการ ณ ปฏิกิริยาอันดับ 2

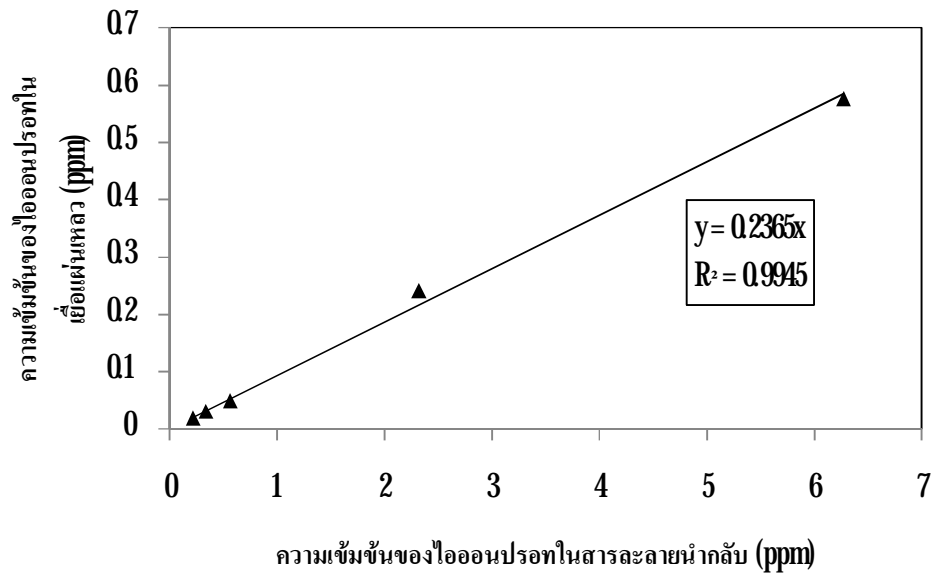
42 การคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

42.1 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลสารปรอทในแต่ละวัฏภาค ณ สภาวะสมดุลด้วยวิธี Solvent Extraction

ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลสารปรอทในแต่ละวัฏภาค ณ สภาวะสมดุลด้วยวิธี **Solvent Extraction** โดยใช้ตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเท่ากับ **0.2** โมลต่อลิตร ในการทดลองที่ใช้ **Aliquat 336** เป็นสารสกัด และในการทดลองที่ใช้ **TOA** เป็นสารสกัด ค่าความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336** เท่ากับและ **TOA** เท่ากับ **4** และ **2** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความเข้มข้นของ **Thiourea** ในสารละลายนำกลับเท่ากับ **0.1** และ **0.2** โมลต่อลิตร ในการทดลองที่ใช้ **Aliquat 336** เป็นสารสกัด และในการทดลองที่ใช้ **TOA** เป็นสารสกัด โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา ซึ่งได้ทำการทดลองในระบบ **solvent extraction**



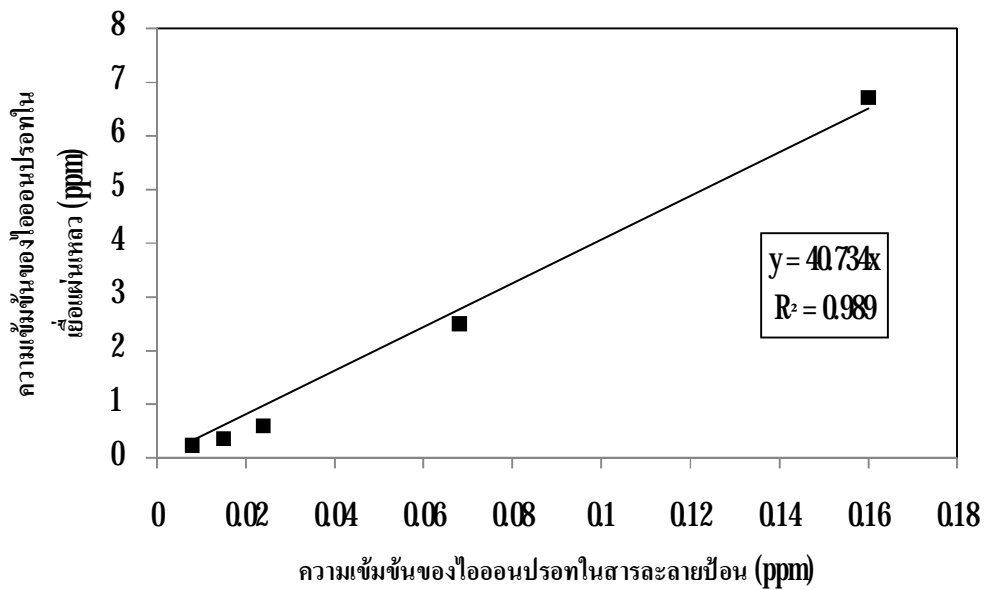
รูปที่ 412 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลของไอออนปรอทระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวที่สภาวะสมดุล ในการสกัดด้วยสารสกัด **Aliquat 336** โดยเทคนิค **Solvent Extraction**



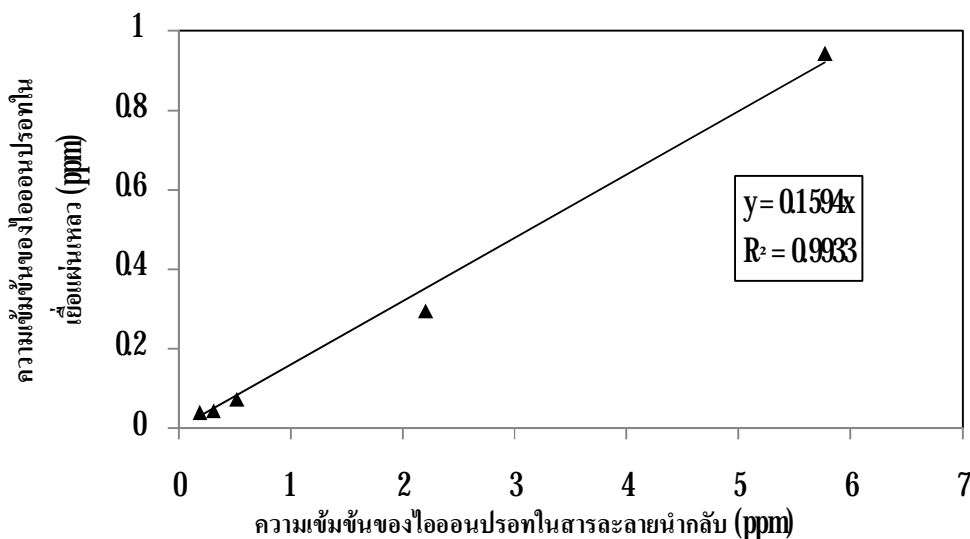
รูปที่ 413 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลของไอออนโปรตอนระหว่างวัฏภาคสารละลายนำกลับ กับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่สภาวะสมดุล ในการสกัดด้วยสารสกัด **Aliquat 336** โดยเทคนิค **Solvent Extraction**

ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของไอออนโปรตอนเริ่มต้นเป็น **7, 3, 0.6, 0.4** และ **0.2 ppm** ทำการปั่นกวานเป็นเวลา **50** นาที เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล นำค่าความเข้มข้นของโปรตอนในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เหลืออยู่จากปฏิกิริยาการสกัด กับค่าความเข้มข้นของโปรตอนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และ นำค่าความเข้มข้นของโปรตอนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่เหลืออยู่หลังจากปฏิกิริยานำกลับ กับ ความเข้มข้นของโปรตอนในวัฏภาคสารละลายนำกลับ นำมาสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของการสกัดและนำกลับ ที่สภาวะสมดุล โดยทำการสร้างกราฟที่มีจุดตัด ณ จุดกำเนิด **(0, 0)** จากรูปที่ 412 และ รูปที่ 413 แสดงความสัมพันธ์ค่าความเข้มข้นของโปรตอนในวัฏภาคสารละลายป้อน กับค่าความเข้มข้นของโปรตอนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และ ค่าความเข้มข้นของโปรตอนในวัฏภาคสารละลายนำกลับ กับค่าความเข้มข้นของโปรตอนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว จากการทดลองที่ใช้สารสกัด **Aliquat 336** เป็นวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยจากสมการพบว่าความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเส้นตรง ซึ่งจากความสัมพันธ์มีค่า R^2 เท่ากับ **0.97** และ **0.99** ตามลำดับ โดยมีค่าความชันซึ่งเป็นค่าคงที่ของการสกัด (k_f) และค่าคงที่ในการนำกลับ (k_b) ที่สภาวะสมดุล ซึ่งมีค่าเท่ากับ **215.43** และ **0.236** ตามลำดับ ส่วนในรูปที่ 414 และ รูปที่ 415 แสดง

ความสัมพันธ์ค่าความเข้มข้นของปรอทในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน กับค่าความเข้มข้นของปรอทในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว และ ค่าความเข้มข้นของปรอทในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ กับค่าความเข้มข้นของปรอทในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว จากการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA เป็นวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว โดยจากสมการพบว่าความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเส้นตรง ซึ่งจากความสัมพันธ์มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98 และ 0.99 ตามลำดับ โดยมีค่าความชันซึ่งเป็นค่าคงที่ของการสกัด (k) และค่าคงที่ในการนำกลับ (k) ที่สภาวะสมดุล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 40.737 และ 0.159 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลของไอออนปรอทระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวที่สภาวะสมดุล ในการสกัดด้วยสารสกัด TOA โดยเทคนิค Solvent Extraction

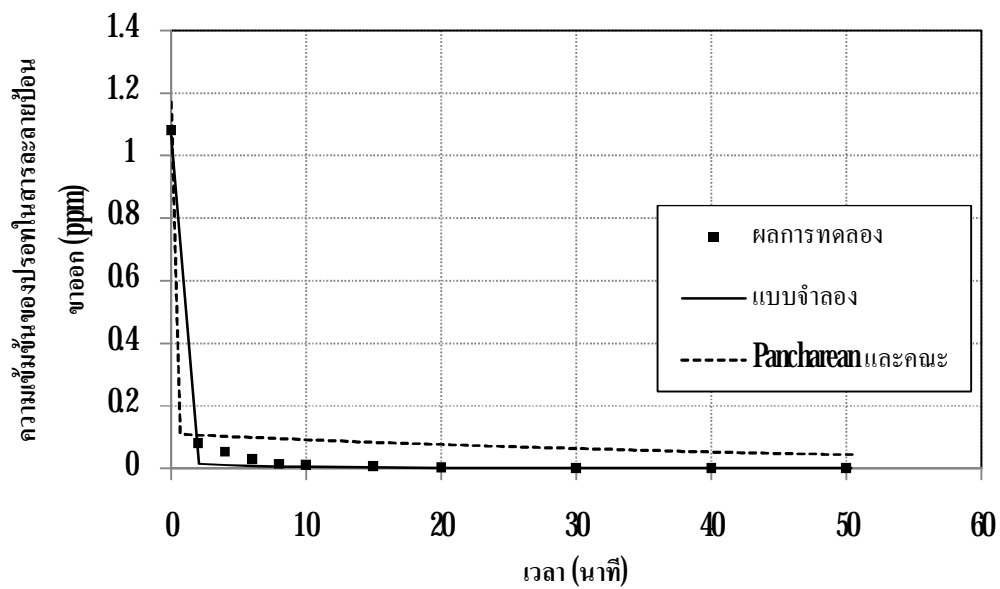


รูปที่ 415 ความสัมพันธ์การถ่ายโอนมวลของไอออนปรอทระหว่างวัฏภาคสารละลายนำกลับ กับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่สภาวะสมดุล ในการสกัดด้วยสารสกัด TOA โดยเทคนิค Solvent Extraction

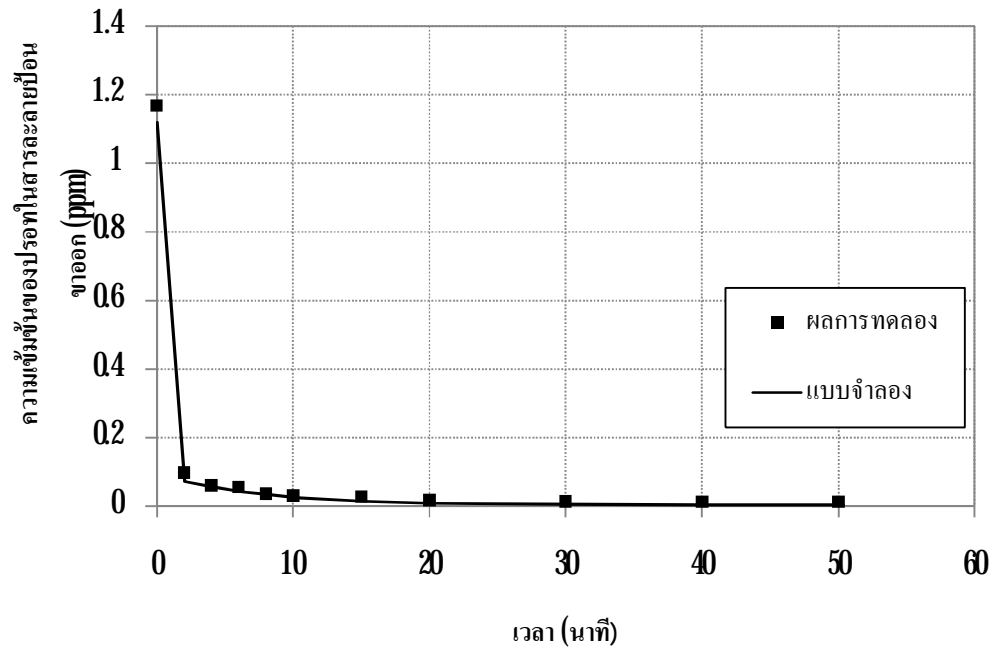
4.2.2 การทำนายผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง แบบ 1 โมดูล

จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 416 จากรูปที่ 416 ก. เป็นค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออกเทียบกับเวลา ในการสกัดด้วยสารสกัด Aliquat 336 ได้ผลการนวนค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ 0.001 ppm ที่เวลา 30 นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ 0.003 ppm ที่เวลา 30 นาที และการทำนายผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ อูรา ปานเจริญ และคณะ ได้ค่า 0.04 ppm ที่เวลา 50 นาที ในรูปที่ 416 ข. เป็นค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออกเทียบกับเวลา ในการสกัดด้วยสารสกัด TOA ได้ผลการนวนค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ 0.004 ppm ที่เวลา 50 นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ 0.014 ppm ที่เวลา 40 นาที จากรูปที่ 416 ค.

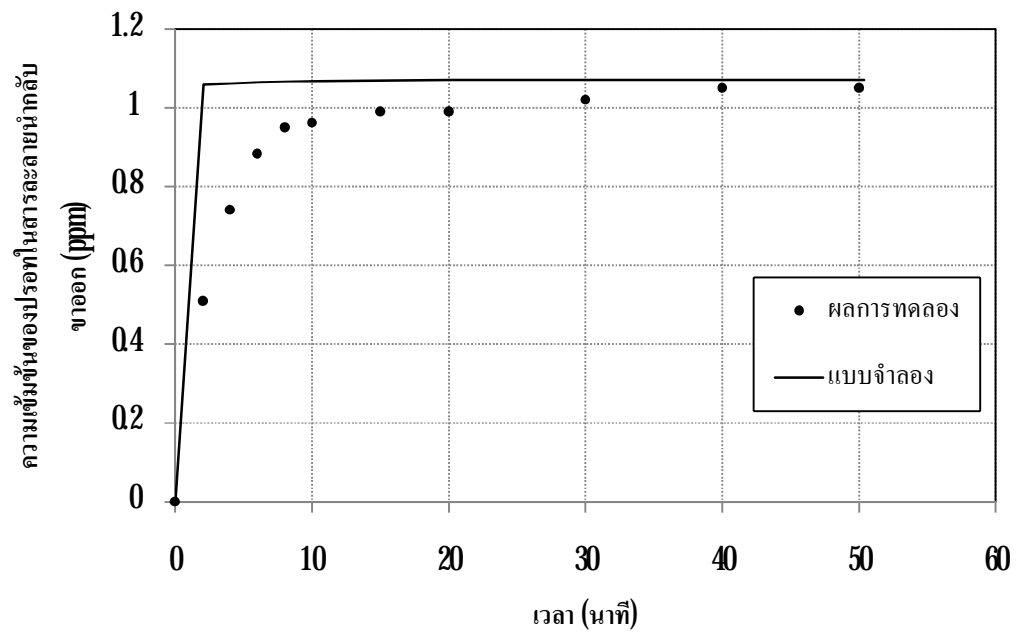
เป็นค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออกเทียบกับเวลา ในการสกัดด้วยสารสกัด **Aliquat 336** ได้ผลการวัดค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **1.068 ppm** ที่เวลา **30** นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **1.050 ppm** ที่เวลา **40** นาที และ จากรูปที่ **416** ง. เป็นค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออกเทียบกับเวลา ในการสกัดด้วยสารสกัด **TOA** ได้ผลการวัดค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **1.11 ppm** ที่เวลา **40** นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **0.99 ppm** ที่เวลา **40** นาที จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณความเข้มข้นของไอออนปรอทขาออก ได้ อย่างแม่นยำในสภาวะที่ระบบการสกัดเข้าสู่ สภาวะคงตัว



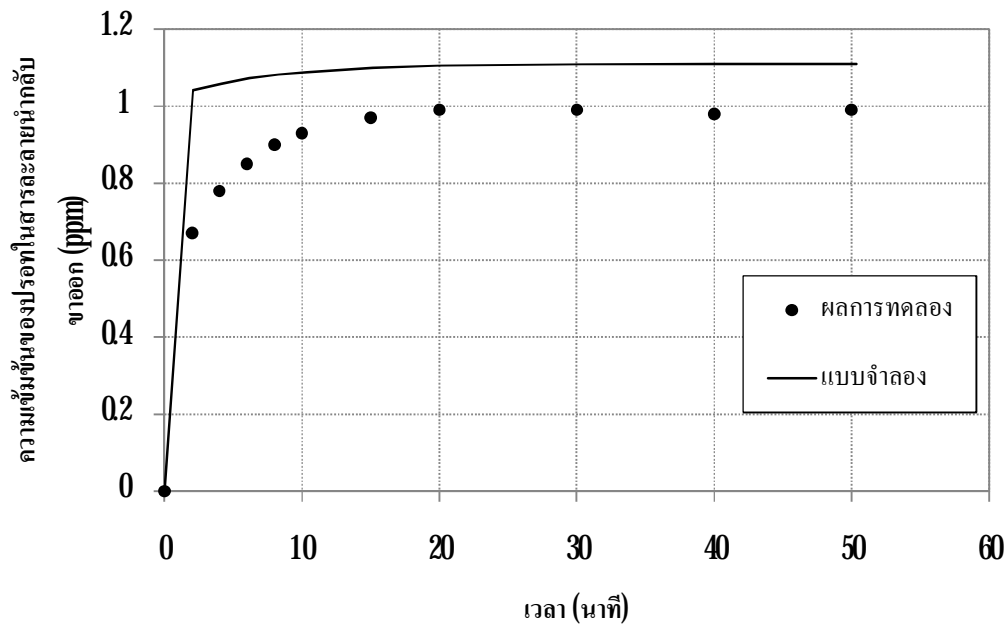
(ก.)



(จ.)



(ค.)



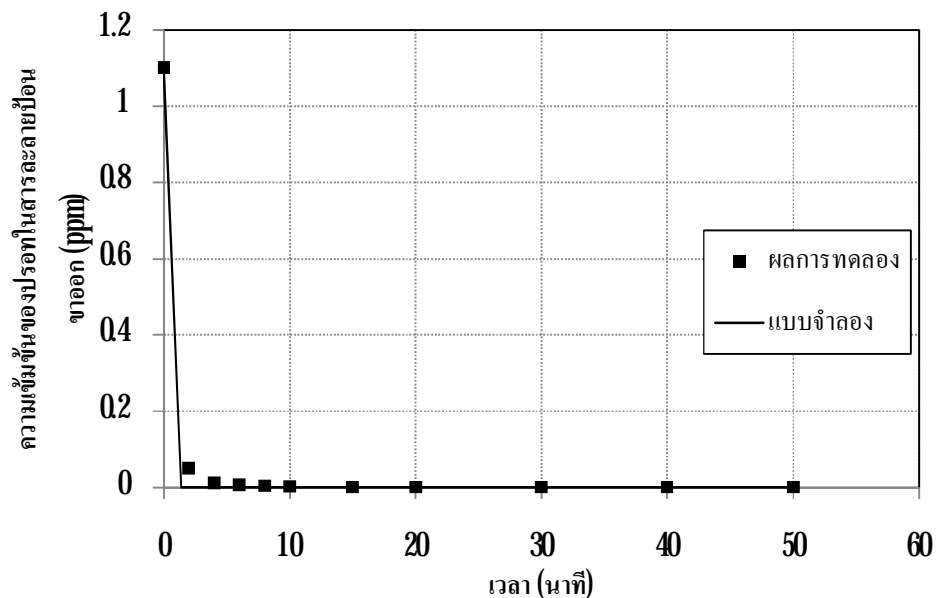
(ง.)

รูปที่ 4.16 ผลการทำนายความเข้มข้นของไอโอดีนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดย (ก.) เป็นค่าความเข้มข้นของไอโอดีนปรอทในสารละลายป้อนขาออกเทียบกับเวลา ในการทดลองด้วยสารสกัด Aliquat 336, (ข.) เป็นค่าความเข้มข้นของไอโอดีนปรอทในสารละลายป้อนขาออกเทียบกับเวลา ในการทดลองด้วยสารสกัด TOA, (ค.) เป็นค่าความเข้มข้นของไอโอดีนปรอทในสารละลายนำกลับขาออกเทียบกับเวลา ในการทดลองด้วยสารสกัด Aliquat 336 และ (ง.) เป็นค่าความเข้มข้นของไอโอดีนปรอทในสารละลายนำกลับขาออกเทียบกับเวลา ในการสกัดด้วยสารสกัด TOA

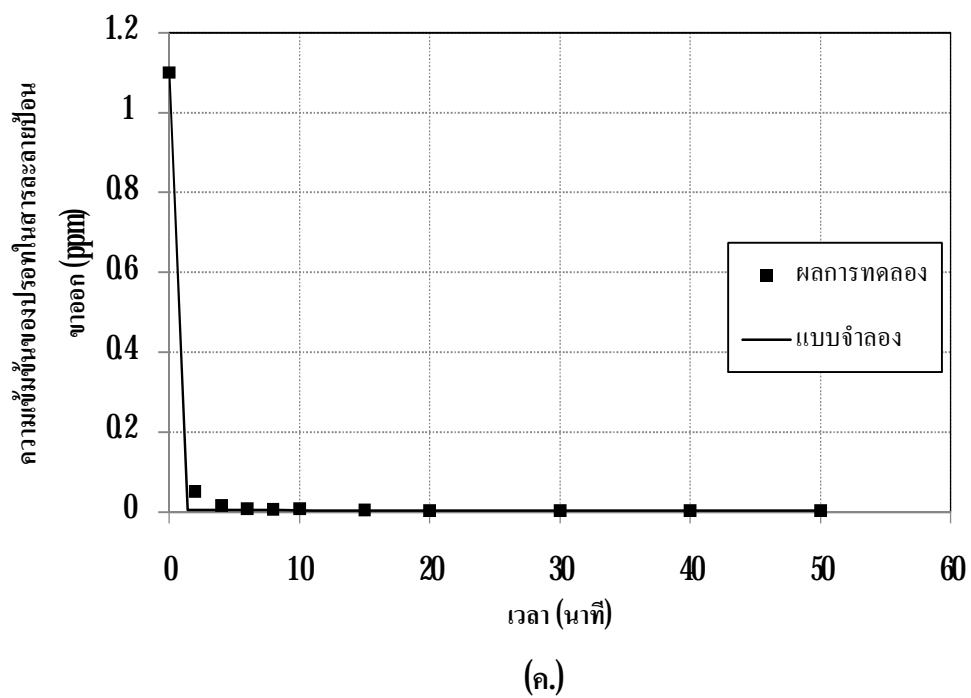
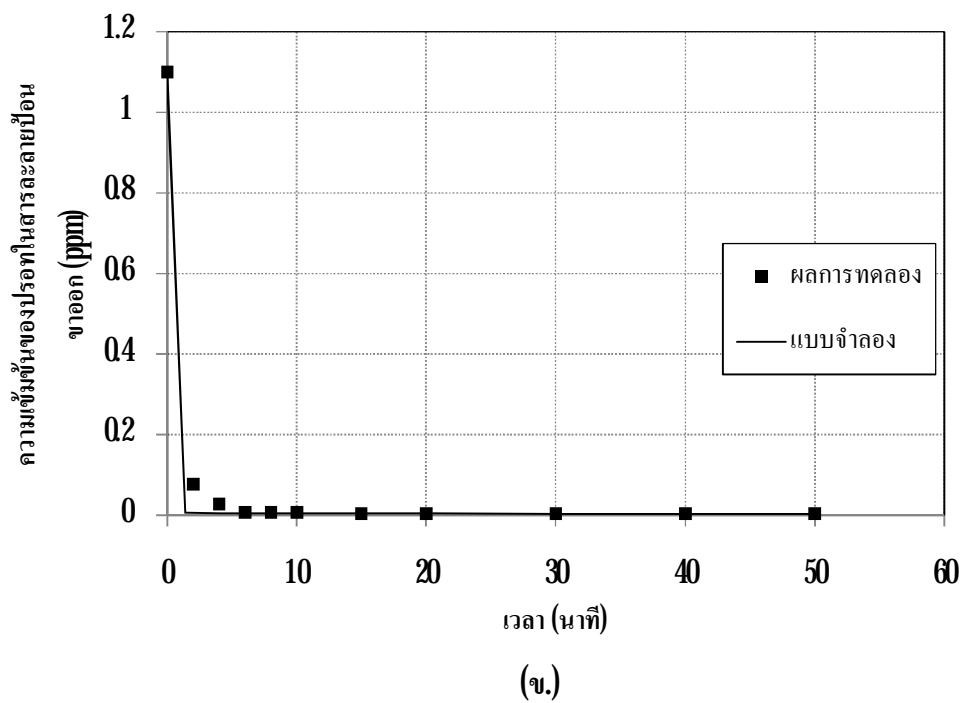
4.23 การทำนายผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสกัดไอโอดีนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง แบบ 2 โมดูล

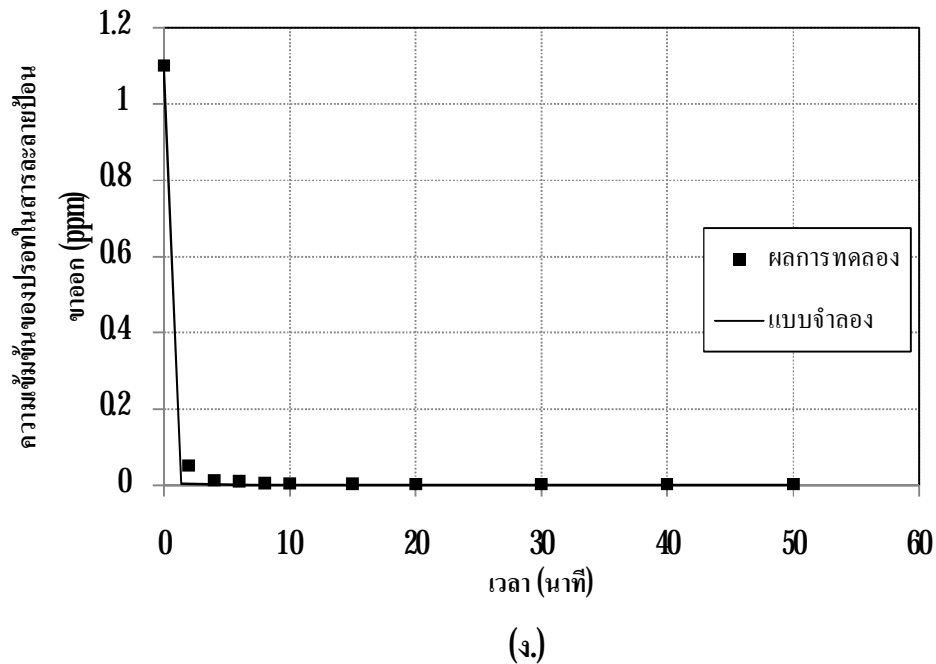
ผลการทดลองและผลการทำนายความเข้มข้นของไอโอดีนปรอทในสารละลายป้อนขาออกเทียบกับเวลาในการสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังรูปที่ 4.17 โดย จากรูปที่ 4.17 ก เป็นผลจากการทดลองและทำนายการสกัดด้วยสารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และ 2 ได้ผลการนวมค่าความเข้มข้นของไอโอดีนปรอท ณ สภาวะคงตัวเท่ากับ 0.0011 ppm ที่เวลา 20 นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอโอดีนปรอท ณ สภาวะคงตัว

เท่ากับ **0.002 ppm** ที่เวลา 15 นาที ในรูปที่ 417 ข. เป็นผลจากการทดลองและทำนายการสกัดด้วยสารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และ 2 ได้ผลการนวดค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **0.004 ppm** ที่เวลา 20 นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **0.005 ppm** ที่เวลา 15 นาที จากรูปที่ 417 ค. เป็นผลจากการทดลองและทำนายการสกัดด้วยสารสกัด Aliquat 336 ใน โมดูลที่ 1 และ สารสกัด TOA .ใน โมดูลที่ 2 ได้ผลการนวดค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **0.004 ppm** ที่เวลา 30 นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **0.004 ppm** ที่เวลา 20 นาที และ จากรูปที่ 417 ง. เป็นผลจากการทดลองและทำนายการสกัดด้วยสารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และ สารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 2 ได้ผลการนวดค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **0.0011 ppm** ที่เวลา 30 นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **0.003 ppm** ที่เวลา 20 นาที จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออกสำหรับการสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล ได้อย่างแม่นยำในสภาวะที่ระบบการสกัดเข้าสู่ สภาวะคงตัว



(ก.)

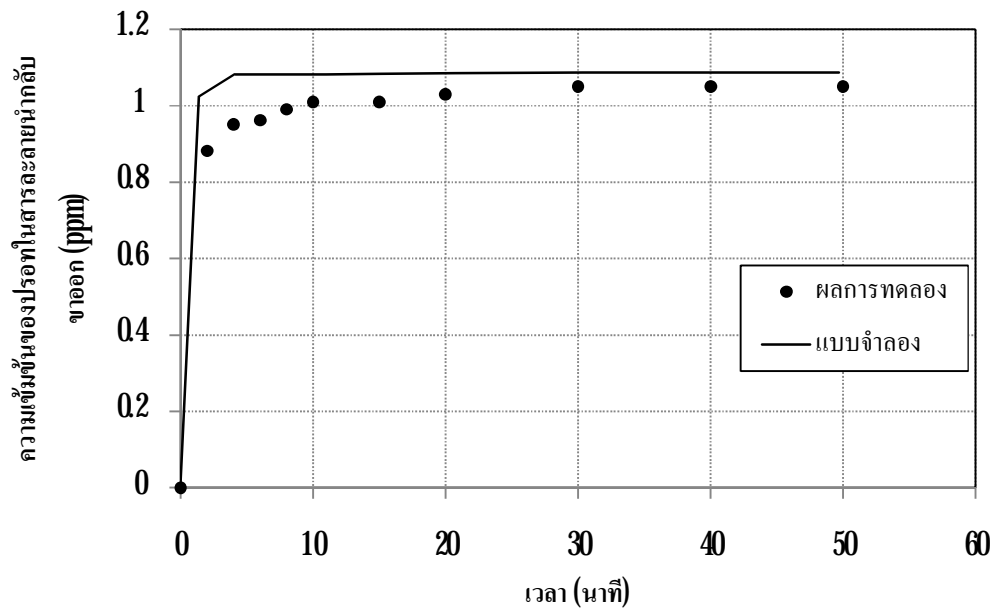




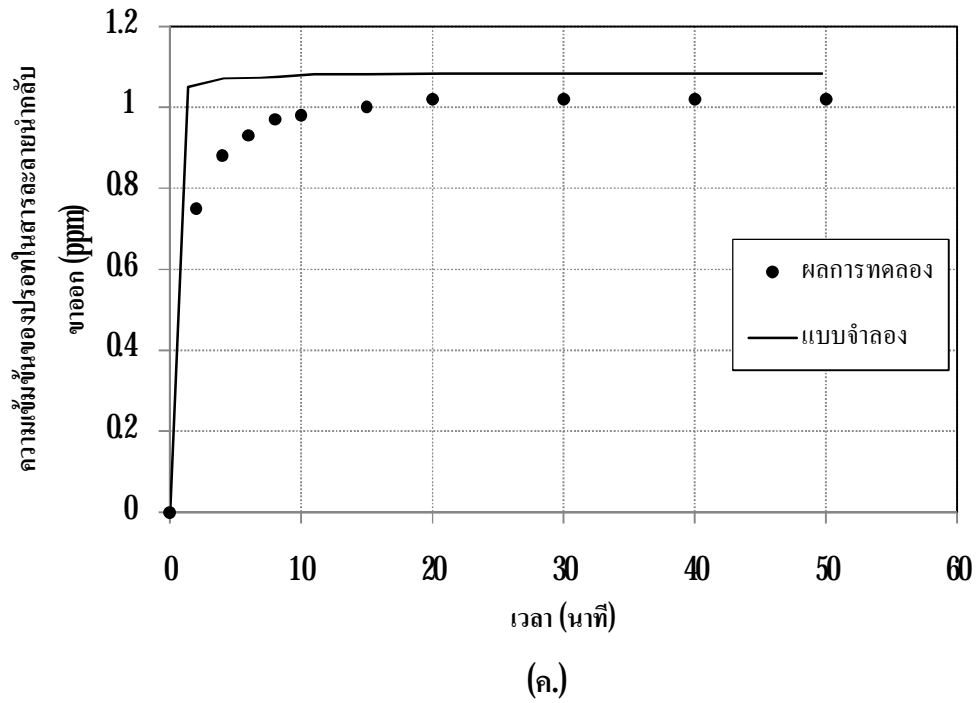
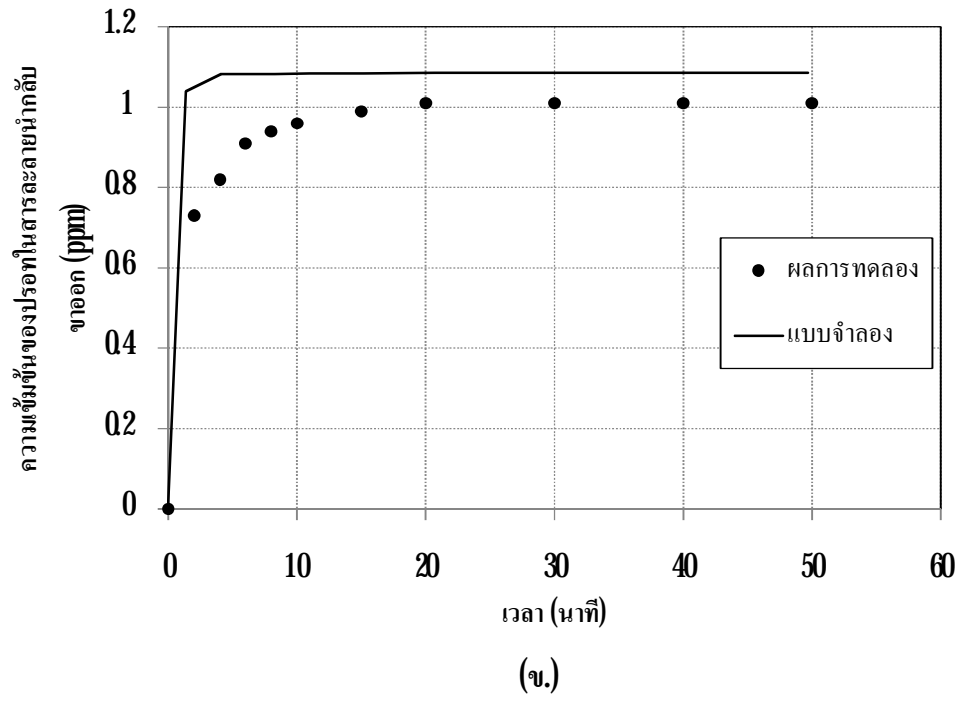
รูปที่ 4.17 ผลการทดลองและผลการทำนายความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาคอกเทียบกับเวลาในการสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดย (ก.) การทดลองด้วยสารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และ 2 (ข.) การทดลองด้วยสารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และ 2 (ค.) การทดลองด้วยสารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และ สารสกัด TOA ในโมดูลที่ 2 และ (ง.) การทดลองด้วยสารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และ สารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 2

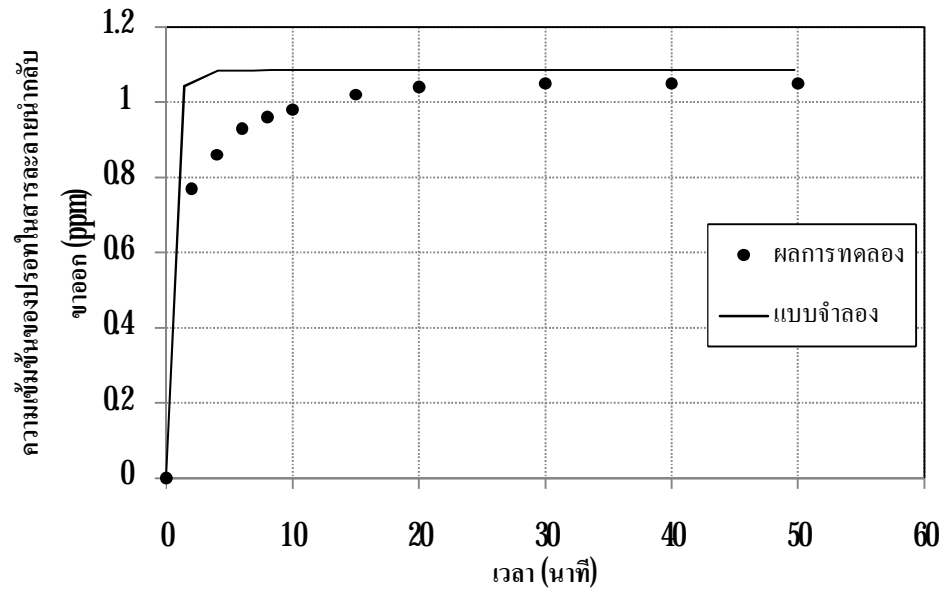
จากรูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองและผลการทำนายความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาคอกเทียบกับเวลาในการสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดย จากรูปที่ 4.18 ก เป็นผลจากการทดลองและทำนายการสกัดด้วยสารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และ 2 ได้ผลการนวมค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ 1.07 ppm ที่เวลา 4 นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ 1.05 ppm ที่เวลา 20 นาที ในรูปที่ 4.18 ข. เป็นผลจากการทดลองและทำนายการสกัดด้วยสารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และ 2 ได้ผลการนวมค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ 1.08 ppm ที่เวลา 6 นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออน

ปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **1.01 ppm** ที่เวลา **20** นาที จากรูปที่ **418**ค. เป็นผลจากการทดลอง และทำนายการสกัดด้วยสารสกัด **Aliquat 336** ในโมดูลที่ **1** และ สารสกัด **TOA** ในโมดูลที่ **2** ได้ผลการนวดค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **1.08 ppm** ที่เวลา **6** นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **1.02 ppm** ที่เวลา **20** นาที และ จากรูปที่ **418**ง. เป็นผลจากการทดลองและทำนายการสกัดด้วยสารสกัด **TOA** ในโมดูลที่ **1** และ สารสกัด **Aliquat 336** ในโมดูลที่ **2** ได้ผลการนวดค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **1.08 ppm** ที่เวลา **6** นาที โดยมีผลจากการทดลองค่าความเข้มข้นของไอออนปรอท ณ สภาวะคงตัว เท่ากับ **1.05 ppm** ที่เวลา **20** นาที จากผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออกสำหรับการสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลวง **2** โมดูล ได้อย่างแม่นยำในสภาวะที่ระบบการสกัดเข้าสู่ สภาวะคงตัว



(ก.)





(ง.)

รูปที่ 418 ผลการทดลองและผลการทำนายความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาคอกเทียบกับเวลาในการสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดย (ก.) การทดลองด้วยสารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และ 2 (ข.) การทดลองด้วยสารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และ 2 (ค.) การทดลองด้วยสารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และ สารสกัด TOA ในโมดูลที่ 2 และ (ง.) การทดลองด้วยสารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และ สารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 2

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการสกัดแยกไอออนปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของการทดลอง และส่วนของการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะถูกนำมาใช้เพื่อทำนายผลค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนและ สารละลายนำกลับขาออก ทั้งในระบบที่ใช้โมดูลเส้นใยกลวง 1 โมดูล และ ระบบที่ใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูล ในส่วนของการทดลอง จะทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการสกัด และนำกลับไอออนปรอท ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด **Aliquat 336** และสารสกัด **TOA** ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ **Thiourea** และ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับ ทั้งยังศึกษาถึงประสิทธิภาพของการใช้ระบบการสกัดโดยใช้โมดูลเส้นใยกลวงแบบ 2 โมดูล และการทดลองเพื่อหาค่าคงที่ในการสกัด และค่าคงที่ในการนำกลับจากเทคนิค **solvent extraction** ซึ่งสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ค่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่ให้ประสิทธิภาพในการสกัด และนำกลับไอออนปรอทดีที่สุด คือ 2 โมลต่อลิตร ทั้งในการทดลองที่ใช้สารสกัด **Aliquat 336** และ สารสกัด **TOA** โดยกรดไฮโดรคลอริกที่เติมลงไปจะทำหน้าที่ในการเกิดประจุเชิงซ้อนของปรอท ในส่วนของการทดลองที่ใช้ **TOA** เป็นสารสกัด ไฮโดรเนียมไอออน (H^+) จากกรดไฮโดรคลอริกที่เพิ่มขึ้น จะทำปฏิกิริยากับ **TOA** เป็นสารประกอบของเอมีนที่มีประสิทธิภาพในการสกัด ไอออนโลหะ

5.1.2 ค่าความเข้มข้นของสารสกัดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336** และ สารสกัด **TOA** ในช่วง 0.5-5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าในการทดลองที่ใช้สารสกัด **Aliquat 336** และ สารสกัด **TOA** ค่าความเข้มข้นสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ให้ประสิทธิภาพในการสกัด และนำกลับไอออนปรอทดีที่สุด คือ **Aliquat** เป็น 4

เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ TOA เป็น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยหากค่าความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับลดต่ำลง จากผลของความหนืดที่เพิ่มขึ้นไปขัดขวางกระบวนการแพร่ซึมของสารประกอบเชิงซ้อน

- 5.1.3** ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ **Thiourea** ในช่วงความเข้มข้น **0.1** ถึง **0.5** โมลต่อลิตร ต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทเมื่อปัจจัยอื่นๆ คงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย **Thiourea** จะส่งผลให้การสกัดและการนำกลับไอออนปรอทเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมที่สุด คือ **0.1** โมลต่อลิตร ในการทดลองที่ใช้สารสกัด **Aliquat 336** และ **0.2** โมลต่อลิตร ในการทดลองที่ใช้สารสกัด **TOA**
- 5.1.4** อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับที่ทำให้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทที่ดีที่สุด คือ **100** มิลลิลิตรต่อนาที โดยประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับจะลดลงเมื่ออัตราการไหลมากกว่า **100** มิลลิลิตรต่อนาที อันเป็นผลมาจากเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง และความเสียหายของเยื่อแผ่นเหลว
- 5.1.5** การสกัดไอออนปรอทด้วยระบบการสกัดโดยใช้โมดูลเส้นใยกลวงแบบ **1** โมดูล พบว่าที่สภาวะการทดลอง สารสกัด **Aliquat 336** ความเข้มข้น **4** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน **0.2** โมลต่อลิตร ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ **Thiourea 0.1** โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ **100** มิลลิลิตรต่อนาที และเวลาของกระบวนการ **50** นาที ให้ร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทสูงที่สุด คือ **99.75** และ **90.11** ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัดไอออนปรอทออกจากน้ำทิ้งได้ตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม
- 5.1.6** การสกัดไอออนปรอทด้วยระบบการสกัดโดยใช้โมดูลเส้นใยกลวงแบบ **2** โมดูล ให้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทสูงกว่า การสกัดไอออนปรอทด้วยระบบการสกัดโดยใช้โมดูลเส้นใยกลวงแบบ **1** โมดูล และใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของระบบเร็วกว่า จากผลการทดลองพบว่า ในการทดลองที่ใช้สารสกัด **Aliquat 336** ความเข้มข้น **4** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งโมดูลที่ **1** และ โมดูลที่ **2** ให้ร้อยละการสกัด

และการนำกลับไอออนปรอทสูงที่สุด คือ **99.89** และ **95.45** ตามลำดับ โดยใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว **15** นาที ซึ่งสามารถกำจัด ไอออนปรอทออกจากน้ำทิ้งได้ตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม

- 5.1.7** ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลสารปรอทในแต่ละวัฏภาค ณ สภาวะสมดุลด้วยวิธี **Solvent Extraction** ซึ่งทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทเริ่มต้นเป็น **7, 3, 0.6, 0.4** และ **0.2 ppm** จากการทดลองที่ใช้สารสกัด **Aliquat 336** เป็นวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลว โดยจากสมการพบว่าความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเส้นตรง ซึ่งจากความสัมพันธ์มีค่า R^2 เท่ากับ **0.97** และ **0.99** ตามลำดับ โดยมีค่าความชันซึ่งเป็นค่าคงที่ของการสกัด (k) และค่าคงที่ในการนำกลับ (k) ที่สภาวะสมดุล ซึ่งมีค่าเท่ากับ **215.43** และ **0.236** ตามลำดับ ในส่วนของการทดลองที่ใช้สารสกัด **TOA** เป็นวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลว โดยจากสมการพบว่าความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเส้นตรง ซึ่งจากความสัมพันธ์มีค่า R^2 เท่ากับ **0.98** และ **0.99** ตามลำดับ โดยมีค่าความชันซึ่งเป็นค่าคงที่ของการสกัด (k) และค่าคงที่ในการนำกลับ (k) ที่สภาวะสมดุล ซึ่งมีค่าเท่ากับ **40.737** และ **0.159** ตามลำดับ
- 5.1.8** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถทำนายผลความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง ทั้งการสกัดโดยใช้โมดูลเส้นใยกลวงแบบ **1** โมดูล และ **2** โมดูล รวมทั้งยังสามารถทำนายเวลาที่ระบบเข้าสู่ สภาวะคงตัว โดยการทำนายผลความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออกมีความแม่นยำกว่า การทำนายผลความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.21** การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทด้วยเครื่อง **ICP Atomic Emission Spectrometer (ICP)** มีประสิทธิภาพในการวัดที่จำกัด โดยสามารถวัดค่าความเข้มข้นได้อย่างแม่นยำในช่วงความเข้มข้นที่ไม่ต่ำกว่า **4 ppm** เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่มีค่าต่ำกว่า **4 ppm** ควรเลือกใช้เทคนิคการวัดด้วยวิธีอื่นเพื่อเพิ่มความถูกต้องของข้อมูล
- 5.22** เนื่องจากปรอทมีความสามารถซึมเข้าไปในผิวของวัสดุบางชนิดได้ง่าย อาทิเช่น วัสดุที่เป็นแก้ว จึงส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง ดังนั้นในการทดลองควรใช้วัสดุที่สามารถป้องกันปัญหานี้ได้ อย่างเช่นการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ผลิตจากพอลิโพรไพลีแทนการใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ผลิตจากแก้ว เช่น วัสดุพวก กระบอกตวง บีกเกอร์ กรวยแยก และขวดรูปชมพู่
- 5.23** แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ ต้องใช้ค่าคงที่ ที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นหากนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปใช้ทำนายผลจากการทดลองอื่นๆ ต้องทำการหาค่าคงที่ จากการทดลองนั้นๆ ทุกครั้ง

รายการอ้างอิง

- Betti, C., Davini, T. and Barale, R. 1992. Genotoxic activity of methyl mercury chloride and dimethyl mercury in human lymphocytes. Mutation Research Letters 281(4): 255-260.
- Bucio, L. 1995. Cadmium and mercury toxicity in a human fetal hepatic cell line (WRL-68 cells). Toxicology 102(3): 285-299.
- Chai, X., Chang X., Hu, Z., He, Q., Tu, Z. and Li, Z. 2010. Solid phase extraction of trace Hg(II) on silica gel modified with 2-(2-oxoethyl)hydrazine carbothioamide and determination by ICP-AES. Talanta 82(5): 1791-1796.
- Chakrabarty, K., Saha, P. and Ghoshal, A.K. 2010a. Separation of mercury from its aqueous solution through supported liquid membrane using environmentally benign diluent. Journal of Membrane Science 350(1-2): 395-401.
- Chakrabarty, K., Saha, P. and Ghoshal, A.K. 2010b. Simultaneous separation of mercury and lignosulfonate from aqueous solution using supported liquid membrane. Journal of Membrane Science 346(1): 37-44.
- Corvini, G., Stiltner, J. and Keith, C. 2007. Mercury removal from natural gas and liquid streams. Journal of UOPLLC: 3
- Counter, S.A. and Buchanan, L.H. 2004. Mercury exposure in children: a review. Toxicology and Applied Pharmacology 198(2): 209-230.
- Cussler E.L., 1997. Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems. USA : Cambridge University Press.
- Dujardin, M.C., Cazé, C. and Vroman, I. 2000. Ion-exchange resins bearing thiol groups to remove mercury.: Part 1: synthesis and use of polymers prepared from thioester supported resin Reactive and Functional Polymers 43(1-2): 123-132.
- El Dessouky, S.I., El-Nadi, Y.A., Ahmed, I.M., Saad, E.A. and Daou J.A. 2008. Solvent extraction separation of Zn(II), Fe(II), Fe(III) and Cd(II) using tributylphosphate and CYANEX 921 in kerosene from chloride medium. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 47: 177-183.

- Fontas, C., Hidalgo, M., Salvado, V. and Anticó, E. 2005. Selective recovery and preconcentration of mercury with a benzoylthiourea-solid supported liquid membrane system Journal of Analytica Chimica Acta 547: 255-261.
- Fontas, C., Hidalgo, M. and Salvado, V. 2003. Selective enrichment of palladium from spent automotive catalysts by using a liquid membrane system Journal of Membrane Science 223: 39-48
- Francine, M. and Mansur, M.B. 2007. Liquid-liquid extraction of mercury (II) from hydrochloric acid solutions by Aliquat 336. Hydrometallurgy 87(3-4): 83-90
- Francis, T., Prasada Rao, T. and Reddy, M.L.P. 2000. Cyanex 471X as extractant for the recovery of Hg(II) from industrial wastes. Hydrometallurgy 57(3): 263-268
- Gallup, D.L. and Strong J.B. 2007. Removal of mercury and arsenic from produced water, Chevron Corporation: 1-9
- Gu, Z. 1992, Membrane Handbook. NY : Van Nostrand Reinhold.
- Gubbuk, I.H., Gungor, O., Alpoguz, H.K., Ersoz, M and Yilmaz, M. 2010. Kinetic study of mercury (II) transport through a liquid membrane containing calix[4]arene nitrile derivatives as a carrier in chloroform. Desalination 261(1-2): 157-161.
- Huebra, M., Elizalde, M.P. and Almela, A. 2003. Hg(II) extraction by LIX 34. Mercury removal from sludge. Hydrometallurgy 68(1-3): 33-42.
- Huggett, D.B. 2001. Mercury in sediment and fish from North Mississippi Lakes. Chemosphere 42(8): 923-929.
- Jabbari, A. and Esmaili, M. 2001. Selective transport of mercury as HgCl through a bulk liquid membrane using K⁺-dicyclohexyl-18-crown-6 as carrier. Journal of Separation and Purification Technology 24: 139-145.
- Jabbari, A., Esmaili, M. and Shamsipur, M. 2001. Selective transport of mercury as HgCl₂ through a bulk liquid membrane using K⁺-dicyclohexyl-18-crown-6 as carrier. Separation and Purification Technology 24(1-2): 139-145.
- Kasikova, N., Kasikov, A. and Korotkova, G. 2010. Extraction of niobium from hydrochloric solutions with tertiary amines in aprotic diluents. Russian Journal of Applied Chemistry 83(3): 424-429.

- Li, Q. L., Qi, W. and Xianjun, K. 1996 Separation study of mercury through an emulsion liquid membrane. Talanta 43(11): 1837-1842.
- Lothongkum, A.W., Suren, S., Chaturabul, S., Thamphiphit, N. and Pancharoen, U. 2011. 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 369(1-2): 350-358.
- Lothongkum, A.W., Ramakul, P., Sasomsub, W., Laoharochamapan, S. and Pancharoen, U. 2009. Enhancement of uranium ion flux by consecutive extraction via hollow fiber supported liquid membrane. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 40(5): 518-523.
- Lu, J. Y. and Schroeder, W. H. 1999. Comparison of conventional filtration and a denuder-based methodology for sampling of particulate-phase mercury in ambient air. Talanta 49: 15-24.
- Marr, R. and Kopp, A. 1982. Liquid Membrane Technology a survey of phenomena, Mechanism and models. International Chemical Engineering 22(1): 44-59.
- McCABE, W. L., Smith, J. C. and Harriott. 2005. P. Harriott (Editor), Unit operations of chemical engineering. NY: McGrawHill.
- Meera, R., Francis, T. and Reddy, M. L. P. 2001. Studies on the liquid-liquid extraction of mercury(II) from acidic chloride solutions using Cyanex 923. Hydrometallurgy 61(2): 97-103.
- Ministry of Industry. 1996 Thailand Regulatory Discharge Standards 2. Thailand.
- Moreira, C. M., Oliveira, E. M., Boran, C. D., Sarkis, J. J. F. and Vassallo, D. V. 2003. Effects of mercury on myosin ATPase in the ventricular myocardium of the rat. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 135(3): 269-275.
- Pancharoen, U., Ramakul, P., Pattaveekongka, W., Milan, H. 2006. Feasibility Study on the Separation of Uranium and Thorium by a Hollow Fiber Supported Liquid Membrane and Mass Transfer Modeling. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 12 (2006) 673-681.
- Pancharoen, U. 2008. Graph prediction on the extraction of metal ion via hollow fiber supported liquid membrane. BKK : Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.

- Pancharoen, U., Poonkum, W. and Lothongkum, A.W. 2009. Treatment of arsenic ions from produced water through hollow fiber supported liquid membrane. Journal of Alloys and Compounds 482(1-2): 328-334.
- Pancharoen, U., Somboonpanya, S., Chaturabul, S. and Lothongkum, A.W. 2010. Selective removal of mercury as HgCl₂ from natural gas well produced water by TOA via HFSLM. Journal of Alloys and Compounds 489(1): 72-79.
- Pancharoen, U., Wongsawa, T. and Lothongkum, A. W. 2011. A Reaction Flux Model for Extraction of Cu(II) with LIX84I in HFSLM, Journal of Separation and Purification Technology Inpress (2011). DOI 10.1080/01496395.2011.595287.
- Patthaveekongka, W., Ramakul, P. Assabumrungrat, S. and Pancharoen, U. 2006. Transport of Cerium, Lanthanum, Neodymium and Palladium via hollow fiber supported liquid membrane based on equilibrium theory. Journal of Chinese Institute of Chemical Engineering 37(3): 227-931.
- Ramakul, P., Pancharoen, U. and Milan, H. 2005. Selective Separation of Trivalent and Tetravalent Lanthanide from Mixture by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Journal of Chinese Institute of Chemical Engineer 36(5): 459-465.
- Ramakul, P., Supajaron, T., Prapasawat, T., Pancharoen, U. and Lothongkum, A.W. 2009. Synergistic separation of yttrium ions in lanthanide series from rare earths mixture via hollow fiber supported liquid membrane. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 15(2): 224-228.
- Samento, A., Guilhemino, L. and Afonso A. 2004. Mercury chloride effects on the function and cellular integrity of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) head kidney macrophages. Fish & Shellfish Immunology 17(5): 489-498.
- Sangtunrong, S., Ramakul, P., Satayaprasert, C., Pancharoen, U. and Lothongkum, A. W. 2007. Purely Separation of Mixture of Mercury and Arsenic via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 13: 751-756.
- Schultz, G. 1988. Separation Techniques with Supported Liquid Membrane. Desalination 68: 191-202.

- Seixas, S., Bustamante, P. and Pierce, G. 2005. Accumulation of mercury in the tissues of the common octopus *Octopus vulgaris* (L.) in two localities on the Portuguese coast. Science of The Total Environment 340(1-3): 113-122.
- Souza de Assis, G.P., Cunha Silva, C.E., Stefanon, I. and Vassallo, D.V. 2003. Effects of small concentrations of mercury on the contractile activity of the rat ventricular myocardium Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 134(3): 375-383.
- Van de Voorde, I., Pinoy, L. and De Ketelaere, R.F. 2004. Recovery of nickel ions by supported liquid membrane (SLM) extraction Journal of Membrane Science 234(1-2): 11-21.
- Wang Q., Chang X., Li, D., Hu, Z., Li, R. and He, Q. 2011. Adsorption of chromium(III), mercury(II) and lead(II) ions onto 4-aminoantipyrine immobilized bentonite. Journal of Hazardous Materials 186(2-3): 1076-1081.
- Yang X.J., Fare , A.G. and Pin, C. 2002. Separation of Zirconium and hafnium using hollow fibers Part I. supported liquid membranes. Chemical Engineering Journal 88: 37-44.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สูตรการคำนวณและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา

ก-1 ร้อยละการสกัดของไอออนปรอท (Percentage of extraction)

$$\% \text{ extraction} = \frac{[C]_{f,in} - [C]_{f,out}}{[C]_{f,in}} \times 100 \quad (\text{ก-1})$$

ก-2 ร้อยละการสกัดของไอออนปรอท (Percentage of recovery)

$$\% \text{ recovery} = \frac{[C]_{s,out}}{[C]_{f,in}} \times 100 \quad (\text{ก-2})$$

ก-3 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารสกัดที่สถานะสมดุล

$$x_{fi} = k_f y_{fi} \quad (\text{ก-3})$$

ก-4 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคสารสกัดกับวัฏภาคสารละลายนำกลับที่สถานะสมดุล

$$x_{si} = k_s y_{si} \quad (\text{ก-4})$$

ก-5 ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนขาออก

$$Y_{fi} = \frac{1}{\left(k_f + \frac{V_f}{V_m}\right)} \left(\frac{V_f}{V_m} Y_{Rfi-1} + X_{si-1}\right) \quad (\text{ก-5})$$

ก-6 ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับขาออก

$$Y_{si} = \frac{1}{(k_s + \frac{V_s}{V_m})} \left(\frac{V_s}{V_m} Y_{Rsi-1} + X_{fi} \right) \quad (\text{ก-6})$$

ก-7 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์สกัดที่สภาวะสมดุลในโมดูล A สำหรับการสกัดแบบ 2 โมดูล

$$X_{fAi} = k_{fA} Y_{fAi} \quad (\text{ก-7})$$

ก-8 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์สกัดที่สภาวะสมดุล

$$X_{fBi} = k_{fB} Y_{fBi} \quad (\text{ก-8})$$

ก-9 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างวิทยาศาสตร์สกัดกับวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับที่สภาวะสมดุล ในโมดูล A สำหรับการสกัดแบบ 2 โมดูล

$$X_{sAi} = k_{sA} Y_{sAi} \quad (\text{ก-9})$$

ก-10 ความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนมวลระหว่างวิทยาศาสตร์สกัดกับวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับที่สภาวะสมดุล ในโมดูล B สำหรับการสกัดแบบ 2 โมดูล

$$X_{sBi} = k_{sB} Y_{sBi} \quad (\text{ก-10})$$

ก-11 ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนขาออกในโมดูล A สำหรับการสกัดแบบ 2 โหมด

$$Y_{fAi} = \frac{1}{(k_{fA} + \frac{V_f}{V_m})} \left(\frac{V_f}{V_m} Y_{Rfi-1} + X_{sAi-1} \right) \quad (\text{ก-11})$$

ก-12 ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนขาออกในโมดูล B สำหรับการสกัดแบบ 2 โหมด

$$Y_{fBi} = \frac{1}{(k_{fB} + \frac{V_f}{V_m})} \left(\frac{V_f}{V_m} Y_{fAi} + X_{sBi-1} \right) \quad (\text{ก-12})$$

ก-13 ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายนำกลับขาออกในโมดูล B สำหรับการสกัดแบบ 2 โหมด

$$Y_{sBi} = \frac{1}{(k_{sB} + \frac{V_s}{V_m})} \left(\frac{V_s}{V_m} Y_{Rsi-1} + X_{fBi} \right) \quad (\text{ก-13})$$

ก-14 ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายนำกลับขาออกในโมดูล A สำหรับการสกัดแบบ 2 โหมด

$$Y_{sAi} = \frac{1}{(k_{sA} + \frac{V_s}{V_m})} \left(\frac{V_s}{V_m} Y_{sBi} + X_{fAi} \right) \quad (\text{ก-14})$$

ก-15 ค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะใน residual ของวัฏภาคสารละลายป้อน

$$Y_{Rfi-1} = \frac{(V_{fT} - V_f) Y_{fi-1} + (V_f Y_{fi})}{V_{fT}} \quad (\text{ก-15})$$

ก-16 ค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะใน residual ของวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ

$$Y_{Rsi-1} = \frac{(V_{sT} - V_s) Y_{si-1} + (V_s Y_{si})}{V_{sT}} \quad (\text{ก-16})$$

ก-17 ค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะใน residual ของวิทยาศาสตร์ละลายป้อน สำหรับการสกัดแบบ 2 โมดูล

$$Y_{Rfi-1} = \frac{(V_{fT} - V_f) Y_{fi-1} + (V_f Y_{fBi})}{V_{fT}} \quad (\text{ก-17})$$

ก-18 ค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะใน residual ของวิทยาศาสตร์ละลายป้อน สำหรับการสกัดแบบ 2 โมดูล

$$Y_{Rsi-1} = \frac{(V_{sT} - V_s) Y_{si-1} + (V_s Y_{sAi})}{V_{sT}} \quad (\text{ก-18})$$

ก-19 ค่าฟลักซ์การสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

$$J = \frac{\Delta[\text{Hg}]_f}{\Delta t} \frac{V_f}{A} \quad (\text{ก-19})$$

โดยที่

Y_f	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน
X_f	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์สกัดบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับวิทยาศาสตร์ละลายป้อน
Y_s	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ
X_s	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์สกัดบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ
k_f	ค่าคงที่สมดุลในการถ่ายโอนมวล
k_s	ค่าคงที่สมดุลในการถ่ายโอนมวล
V_f, V_s	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับตามลำดับ

V_{rf} , V_{sb} , V_m	ปริมาตรสุทธิในกระบวนการของสารละลายป้อน สารละลายนำกลับ และสารสกัดตามลำดับ
Y_{Rf-1}	ความเข้มข้นของสารละลายป้อนใน residual ก่อนป้อนเข้าสู่กระบวนการ
Y_{Rsi-1}	ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับใน residual ก่อนป้อนเข้าสู่กระบวนการ
A	โมดูล A
B	โมดูล B
i	จำนวนวัฏจักรในกระบวนการ

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด **Aliquat 336** (ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก ค-1 และ ค-2)

ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน (ppm)		ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
0.05	1.11	0.131	0.871	88.2	78.5
0.1	1.08	0.085	0.856	92.1	79.3
0.2	1.08	0.028	0.905	97.4	83.8
0.3	1.05	0.056	0.874	94.7	83.2
0.4	1.01	0.168	0.796	83.4	78.8
0.5	1.03	0.188	0.787	81.7	76.4

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336 = 3%** โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ **Thiourea = 0.3** โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA

ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน (ppm)		ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
0.05	1.13	0.135	0.747	88.03	66.09
0.1	1.1	0.083	0.822	92.41	74.70
0.2	1.12	0.036	0.890	96.81	79.50
0.3	1.08	0.045	0.857	95.83	79.34
0.4	1.09	0.320	0.536	70.66	49.17
0.5	1.02	0.338	0.430	66.91	42.11

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นสารสกัด TOA = 3% โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.3 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด **Aliquat 336** ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท

ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 (% โดยปริมาตร)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อน (ppm)		ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
0.5	1.11	0.330	0.693	70.23	62.41
1	1.11	0.165	0.816	85.14	73.53
2	1.11	0.074	0.872	93.31	78.60
3	1.11	0.029	0.919	97.42	82.82
4	1.11	0.007	0.926	99.41	83.40
5	1.11	0.110	0.911	90.11	82.11

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น = **1.11 ppm** ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = **0.2** โมลต่อลิตร โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ **Thiourea** = **0.3** โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในภูมิภาคเขือแผ่นเหลืองต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท

ความเข้มข้นของสารสกัด TOA (% โดยปริมาตร)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อน (ppm)		ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
0.5	1.04	0.232	0.650	77.73	62.48
1	1.04	0.052	0.816	95.04	78.50
2	1.04	0.029	0.830	97.25	79.83
3	1.04	0.043	0.824	95.90	79.26
4	1.04	0.053	0.816	94.95	78.44
5	1.04	0.062	0.813	94.07	78.21

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น=1.04ppm ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.3 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Thiourea ในสารละลายนำกลับต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด Aliquat 336

ความเข้มข้นของ สารละลายนำกลับ Thiourea (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อน (ppm)		ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
0.05	1.07	0.052	0.821	95.12	76.73
0.1	1.07	0.003	0.964	99.73	90.11
0.2	1.07	0.005	0.945	99.51	88.31
0.3	1.07	0.006	0.921	99.43	86.10
0.4	1.07	0.013	0.911	98.80	85.14
0.5	1.07	0.030	0.882	97.24	82.42

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น = 1.07 ppm, ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด Aliquat 336 = 4% โดยปริมาตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย Thiourea ในสารละลายนำกลับต่อการสกัด และนำกลับไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA

ความเข้มข้นของ สารละลายนำกลับ Thiourea (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อน (ppm)		ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
0.05	1.18	0.081	0.741	93.12	62.79
0.1	1.18	0.032	0.989	97.25	83.83
0.2	1.18	0.025	0.998	97.85	84.56
0.3	1.18	0.028	0.991	97.64	83.98
0.4	1.18	0.028	0.990	97.65	83.86
0.5	1.18	0.033	0.980	97.21	83.02

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น = 1.18 ppm, ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด TOA = 2% โดยปริมาตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลองการศึกษาผลของอัตราการใช้สารละลายปุ๋ยมูลของเส้นใยกล้วยต่อการสกัด และนำกลับ ไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด **Aliquat 336**

อัตราการใช้ของสารละลาย ปุ๋ยมูลและนำกลับ (มิลลิลิตรต่อนาฬิกา)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายปุ๋ยมูล (ppm)		ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายนำกลับที่ผ่าน โมดุลของเส้นใยกล้วยต่อการสกัด (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
75	1.08	0.010	0.958	99.10	88.74
100	1.08	0.003	0.973	99.73	90.11
150	1.08	0.070	0.878	93.52	81.33
200	1.08	0.212	0.768	80.41	71.12
300	1.08	0.445	0.488	58.83	45.16
400	1.08	0.635	0.351	41.25	32.47

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น= **1.08 ppm**, ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายปุ๋ยมูล = **0.2** โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336**= **4%** โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ **Thiourea**= **0.1** โมลต่อลิตร และ เวลาของ กระบวนการ = **50** นาที

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลองการศึกษาผลของอัตราการใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่าน โมดุลของเส้นใยกลวงต่อการสกัด และนำกลับ ไอออนปรอท ในการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA

อัตราการใช้ของสารละลาย ป้อนและนำกลับ (มิลลิเมตรต่อนาที)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อน (ppm)		ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายนำกลับขาออก (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก			
75	1.12	0.031	0.938	97.25	83.78
100	1.12	0.024	0.947	97.85	84.56
150	1.12	0.096	0.866	91.43	77.32
200	1.12	0.250	0.773	77.64	68.98
300	1.12	0.497	0.491	55.65	43.86
400	1.12	0.670	0.336	40.21	30.02

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น = 1.12 ppm, ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด TOA = 2% โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.2 โมลต่อลิตร และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

ตารางที่ ข-9 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการ สำหรับการทดลองที่ใช้สารสกัด **Aliquat 336**

เวลาในกระบวนการทดลอง (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายนำกลับ (ppm)
0	1.17	0
2	0.082	0.509
4	0.054	0.741
6	0.031	0.884
8	0.015	0.951
10	0.013	0.962
15	0.008	0.998
20	0.005	0.992
30	0.003	1.020
40	0.003	1.050
50	0.003	1.050

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น = **1.17 ppm**, ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = **0.2** โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336 = 4%** โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ **Thiourea = 0.1** โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที

ตารางที่ ข-10 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการ สำหรับการทดลองที่ใช้สารสกัด TOA

เวลาในกระบวนการทดลอง (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายนำกลับ (ppm)
0	1.12	0
2	0.099	0.67
4	0.062	0.78
6	0.057	0.85
8	0.038	0.9
10	0.032	0.93
15	0.029	0.97
20	0.018	0.99
30	0.015	0.99
40	0.014	0.98
50	0.014	0.99

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น=1.12 ppm, ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด TOA = 2% โดยปริมาตร, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.2 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

ตารางที่ ข-11 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการ สำหรับการทดลองที่ใช้ระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล โดยใช้สารสกัด **Aliquat 336**

เวลาในกระบวนการทดลอง (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับ (ppm)
0	1.1	0
2	0.051	0.882
4	0.013	0.951
6	0.008	0.962
8	0.005	0.99
10	0.003	1.01
15	0.002	1.01
20	0.002	1.05
30	0.002	1.05
40	0.002	1.05
50	0.002	1.05

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น = **1.10 ppm**, ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = **0.2** โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด **Aliquat 336 = 4%** โดยปริมาตร ใน โมดูลที่ **1** และ **2**, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ **Thiourea = 0.1** โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = **100** มิลลิลิตรต่ออนาที และ เวลาของกระบวนการ = **50** นาที

ตารางที่ ข-12 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการ สำหรับการทดลองที่ใช้ระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล โดยใช้สารสกัด TOA

เวลาในกระบวนการทดลอง (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของไอออนปรอท ในสารละลายนำกลับ (ppm)
0	1.1	0
2	0.078	0.73
4	0.028	0.82
6	0.008	0.91
8	0.007	0.94
10	0.007	0.96
15	0.005	0.99
20	0.005	1.01
30	0.005	1.01
40	0.005	1.01
50	0.005	1.01

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น=1.10 ppm ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด TOA = 2% โดยปริมาตร ในโมดูลที่ 1 และ 2 ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.2 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

ตารางที่ ข-13 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการ สำหรับการทดลองที่ใช้ระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 1 และสารสกัด TOA ในโมดูลที่ 2

เวลาในกระบวนการทดลอง (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับ (ppm)
0	1.1	0
2	0.052	0.75
4	0.016	0.88
6	0.008	0.93
8	0.007	0.97
10	0.008	0.98
15	0.006	1.00
20	0.004	1.02
30	0.004	1.02
40	0.004	1.02
50	0.004	1.02

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น = 1.10 ppm, ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด Aliquat 336 = 4% โดยปริมาตร ใน โมดูลที่ 1 และ สารสกัด TOA = 2% โดยปริมาตร ใน โมดูลที่ 2, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.1 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่ออนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

ตารางที่ ข-14 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นไอออนปรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออก กับเวลาในกระบวนการ สำหรับการทดลองที่ใช้ระบบการสกัดแบบ 2 โมดูล โดยใช้สารสกัด TOA ในโมดูลที่ 1 และสารสกัด Aliquat 336 ในโมดูลที่ 2

เวลาในกระบวนการทดลอง (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับ (ppm)
0	1.1	0
2	0.052	0.77
4	0.014	0.86
6	0.011	0.93
8	0.007	0.96
10	0.006	0.98
15	0.005	1.02
20	0.003	1.05
30	0.003	1.05
40	0.003	1.05
50	0.003	1.05

สภาวะการทดลอง: ความเข้มข้นไอออนปรอทเริ่มต้น = 1.10 ppm, ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน = 0.2 โมลต่อลิตร, ความเข้มข้นสารสกัด TOA = 2% โดยปริมาตร ในโมดูลที่ 1 และ สารสกัด Aliquat 336 = 4% โดยปริมาตร ในโมดูลที่ 2, ความเข้มข้นสารละลายนำกลับ Thiourea = 0.1 โมลต่อลิตร, อัตราการไหลสารละลายป้อนและนำกลับ = 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ เวลาของกระบวนการ = 50 นาที

ตารางที่ ข-15 ผลการคำนวณความเข้มข้นไอออนปรอทขาออกของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจากข้อมูลของการทดลองการสกัดไอออนปรอทด้วยสารสกัด **Aliquat 336** และ สารสกัด **TOA** ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เวลาในการ คำนวณ (นาท)	สารสกัด Aliquat 336			สารสกัด TOA	
	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายป้อน (ppm)	อุรา ปานเจริญ และคณะ	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายนำกลับ (ppm)	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายนำกลับ (ppm)
0	1.08	1.08	0	1.12	0
21	0.010	0.102	1.058	0.052	1.060
41	0.008	0.099	1.061	0.040	1.072
6.2	0.006	0.094	1.063	0.031	1.081
8.3	0.005	0.091	1.064	0.024	1.088
10.4	0.004	0.087	1.065	0.019	1.093
15.1	0.002	0.081	1.066	0.012	1.101
20.0	0.002	0.073	1.067	0.008	1.104
30.4	0.001	0.061	1.068	0.005	1.107
40.0	0.001	0.051	1.068	0.005	1.108
50.4	0.001	0.042	1.068	0.004	1.108

ตารางที่ ข-16 ผลการคำนวณความเข้มข้นไอออนปรอทขาออกของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจากข้อมูลของการทดลองการสกัดไอออนปรอทใน การสกัดแบบ 2 โมดูล ด้วยสารสกัด Aliquat 336 และ สารสกัด TOA ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เวลาในการ คำนวณ (นาที)	สารสกัด Aliquat 336+ Aliquat 336		สารสกัด TOA + TOA	
	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายนำกลับ (ppm)	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายนำกลับ (ppm)
0	1.1	0	1.1	0
2	0.0001	1.07	0.003	1.07
4	0.0003	1.07	0.003	1.08
6	0.0004	1.07	0.003	1.08
8	0.0006	1.07	0.003	1.08
10	0.0007	1.07	0.003	1.08
15	0.0009	1.07	0.003	1.08
20	0.0011	1.07	0.004	1.08
30	0.0011	1.07	0.004	1.08
40	0.0011	1.07	0.004	1.08
50	0.0011	1.07	0.004	1.08

ตารางที่ ข-17 ผลการคำนวณความเข้มข้นไอออนปรอทขาออกของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจากข้อมูลของการทดลองการสกัดไอออนปรอทใน การสกัดแบบ 2 โมดูล ด้วยสารสกัด **Aliquat 336** และ สารสกัด **TOA** ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เวลาในการ คำนวณ (นาที)	สารสกัด Aliquat 336+ TOA		สารสกัด TOA + Aliquat 336	
	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายนำกลับ (ppm)	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายป้อน (ppm)	ความเข้มข้นของปรอทใน สารละลายนำกลับ (ppm)
0	1.1	0	1.1	0
2	0.0006	1.07	0.0006	1.07
4	0.0012	1.08	0.0007	1.08
6	0.0017	1.08	0.0008	1.08
8	0.0022	1.08	0.0009	1.08
10	0.0025	1.08	0.0009	1.08
15	0.0031	1.08	0.0010	1.08
20	0.0035	1.08	0.0011	1.08
30	0.0040	1.08	0.0011	1.08
40	0.0040	1.08	0.0011	1.08
50	0.0040	1.08	0.0011	1.08

ภาคผนวก ค.

ตัวอย่างการคำนวณ

ค-1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด

ข้อมูลจากตารางที่ ข-3 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด **Aliquat 336** เป็น 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า = **1.11** มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก = **0.007** มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสมการ ก-1

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการสกัด} &= \frac{1.11 - 0.007}{1.11} \times 100 \\ &= \mathbf{99.41} \quad (\text{ดังตารางที่ ข-3}) \end{aligned}$$

ค-2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ

ข้อมูลจากตารางที่ ข-3 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด **Aliquat 336** เป็น 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า = **1.11** มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก = **0.926** มิลลิกรัมต่อลิตร

จากสมการ ก-2

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการนำกลับ} &= \frac{0.926}{1.11} \times 100 \\ &= \mathbf{46.19} \quad (\text{ดังตารางที่ ข-3}) \end{aligned}$$

ก-4 ตัวอย่างการคำนวณค่าฟลักซ์

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า	1.08	ppm
ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก	0.045	ppm
น้ำหนักโมเลกุลของปรอท	200.59	กรัมต่อโมล
ปริมาตรของสารละลายป้อน	1	ลิตร
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพของโมดูลเส้นใยกลวง	1.4	ตารางเมตร
เวลาการดำเนินการ	50	นาที

จากสมการที่ ก-19

$$J = \frac{(1.08 - 0.045) \times 10^{-3}}{200.59} \times \frac{1}{(1.4) \times (50)}$$

$$J = 7.37 \times 10^{-7}$$

ก-3 ตัวอย่างการคำนวณค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออกด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1 การสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลวง 1 โมดูล

$$x_{fi} = k_f y_{fi} \quad (\text{ก-1})$$

$$x_{si} = k_s y_{si} \quad (\text{ก-2})$$

$$Y_{fi} = \frac{1}{\left(k_f + \frac{V_f}{V_m}\right)} \left(\frac{V_f}{V_m} Y_{Rfi-1} + X_{si-1} \right) \quad (\text{ก-3})$$

$$Y_{si} = \frac{1}{\left(k_s + \frac{V_s}{V_m}\right)} \left(\frac{V_s}{V_m} Y_{Rsi-1} + X_{fi} \right) \quad (\text{ก-4})$$

$$Y_{Rfi-1} = \frac{(V_{fT} - V_f)Y_{fi-1} + (V_f Y_{fi})}{V_{fT}} \quad (\text{ก-5})$$

$$Y_{Rsi-1} = \frac{(V_{sT} - V_s)Y_{si-1} + (V_s Y_{si})}{V_{sT}} \quad (\text{ก-6})$$

จากข้อมูลในตาราง ข-15 การสกัดด้วยสารสกัด **Aliquat 336**

ข้อมูลเริ่มต้น

ค่าคงที่การสกัดด้วยสารสกัด Aliquat 336 (k_f)	215.43	
ค่าคงที่การนำกลับด้วยสารสกัด Aliquat 336 (k_s)	0.236	
ปริมาตรสารละลายป้อนและนำกลับ (V_f, V_s)	100	มิลลิลิตร
ปริมาตรสุทธิของสารละลายป้อนและนำกลับ (V_{fT}, V_{sT})	1000	มิลลิลิตร

คำนวณปริมาตรสุทธิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

จากข้อมูลในตารางที่ **3.2** สมบัติของตัวกรองรับเส้นใยกลวงโพลีโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเส้นใยกลวง (D_{out})	0.0003	เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเส้นใยกลวง (D_{in})	0.00024	เมตร
ความยาวเส้นใยกลวง (L)	0.198	เมตร
จำนวนเส้นใยกลวง (N)	35,000	เส้น
ความพรุน (e)	25	เปอร์เซ็นต์

ปริมาตรความหนาของเปลือกเส้นใยกลวง

$$V = pR^2 L = pL(D_{out} - D_{in})^2$$

$$V = p \times (0.198) \times (0.0003 - 0.00024)^2 = 0.005ml$$

ปริมาตรสุทธิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

$$V_m = V \times N \times e$$

$$V_m = 0.005 \times 35,000 \times 0.25 = 44 \text{ ml}$$

เวลาหนึ่งรอบของกระบวนการในโมดูลเส้นใยกลวง

$$t_0 = \frac{D_{in} L}{Q}$$

ที่อัตราการไหล (Q) **100** มิลลิตรต่อนาที

$$t_0 = \frac{(2.4 \times 10^{-6}) \times 1.98}{100} = 4.8 \times 10^{-8} \text{ min}$$

เวลาหนึ่งรอบของทั้งกระบวนการ

เส้นผ่านศูนย์กลางสายยาง **0.0038** เซนติเมตร

ความยาวของสายยางทั้งหมด **18** เซนติเมตร

$$t_0 = \frac{0.0038 \times 18}{100} = 0.69 \text{ min}$$

เพราะฉะนั้นเวลาของกระบวนการทั้งหมด คือ $0.69 + 4.8 \times 10^{-8} = 0.69 \text{ min}$

รอบการคำนวณ ที่ 1 (i=1)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน (Y_{R0}) **1.08** ppm

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับ (Y_{R0}) **0.00** ppm

X_{s0} **0.00** ppm

แทนค่าในสมการ ค-3

$$Y_{f1} = \frac{1}{(215.43 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 1.08 + 0.00) = 0.011 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ ค-1

$$x_{f1} = 215.43 \times 0.011 = 2.42 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ ค-4

$$Y_{s1} = \frac{1}{(0.236 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 0.00 + 2.42) = 0.96 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ ค-2

$$x_{s1} = 0.236 \times 0.96 = 0.23 \text{ ppm}$$

รอบการคำนวณ ที่ 2 (i=2)

แทนค่าในสมการ (ค-5) และ (ค-6)

$$Y_{Rf1} = \frac{(1000 - 100)1.08 + (100 \times 0.011)}{1000} = 0.973 \text{ ppm}$$

$$Y_{Rs1} = \frac{(1000 - 100)0.00 + (100 \times 0.96)}{1000} = 0.097 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-3)

$$Y_{f2} = \frac{1}{(215.43 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 0.973 + 0.23) = 0.011 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-1)

$$x_{f2} = 215.43 \times 0.011 = 2.41 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-4)

$$Y_{s2} = \frac{1}{(0.236 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 0.097 + 2.42) = 1.05 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-2)

$$x_{s2} = 0.236 \times 1.05 = 0.24 \text{ ppm}$$

รอบการคำนวณ ที่ 3 (i=3)

แทนค่าในสมการ (ค-5) และ (ค-6)

$$Y_{Rf2} = \frac{(1000 - 100)0.973 + (100 \times 0.011)}{1000} = 0.876 \text{ ppm}$$

$$Y_{Rs2} = \frac{(1000 - 100)0.097 + (100 \times 1.05)}{1000} = 0.192 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-3)

$$Y_{f3} = \frac{1}{(215.43 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 0.876 + 0.24) = 0.010 \text{ ppm} \quad (\text{ดังแสดงในตาราง ข-15})$$

แทนค่าในสมการ (ค-1)

$$x_3 = 215.43 \times 0.015 = 2.21 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-4)

$$Y_{s3} = \frac{1}{(0.236 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 0.192 + 2.21) = 1.058 \text{ ppm} \quad (\text{ดังแสดงในตาราง ข-15})$$

แทนค่าในสมการ (ค-2)

$$x_{s3} = 0.236 \times 1.058 = 0.25 \text{ ppm}$$

2 การสกัดด้วยโมดูลเส้นใยกลาง 2 โมดูล

$$X_{fAi} = k_{fA} Y_{fAi} \quad (\text{ก-7})$$

$$X_{fBi} = k_{fB} Y_{fBi} \quad (\text{ก-8})$$

$$X_{sAi} = k_{sA} Y_{sAi} \quad (\text{ก-9})$$

$$X_{sBi} = k_{sB} Y_{sBi} \quad (\text{ก-10})$$

$$Y_{fAi} = \frac{1}{\left(k_{fA} + \frac{V_f}{V_m}\right)} \left(\frac{V_f}{V_m} Y_{Rfi-1} + X_{sAi-1} \right) \quad (\text{ก-11})$$

$$Y_{fBi} = \frac{1}{\left(k_{fB} + \frac{V_f}{V_m}\right)} \left(\frac{V_f}{V_m} Y_{fAi} + X_{sBi-1} \right) \quad (\text{ก-12})$$

$$Y_{sBi} = \frac{1}{\left(k_{sB} + \frac{V_s}{V_m}\right)} \left(\frac{V_s}{V_m} Y_{Rsi-1} + X_{fBi} \right) \quad (\text{ก-13})$$

$$Y_{sAi} = \frac{1}{\left(k_{sA} + \frac{V_s}{V_m}\right)} \left(\frac{V_s}{V_m} Y_{sBi} + X_{fAi} \right) \quad (\text{ก-14})$$

$$Y_{Rfi-1} = \frac{(V_{fT} - V_f) Y_{fi-1} + (V_f Y_{fBi})}{V_{fT}} \quad (\text{ก-15})$$

$$Y_{Rsi-1} = \frac{(V_{sT} - V_s) Y_{si-1} + (V_s Y_{sAi})}{V_{sT}} \quad (\text{ก-16})$$

จากข้อมูลในตาราง ข-16 การสกัดด้วยสารสกัด TOA ใน โมดูลที่ 1 และ 2

ข้อมูลเริ่มต้น

ค่าคงที่การสกัดด้วยสารสกัด TOA ($k_A = k_B$) 40.73

ค่าคงที่การนำกลับด้วยสารสกัด TOA ($k_A = k_B$) 0.159

ปริมาตรสารละลายป้อนและนำกลับ (V_f, V_s) 100 มิลลิลิตร

แทนค่าในสมการ (ค-11)

$$Y_{fA1} = \frac{1}{(40.73 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 1.10 + 0.00) = 0.058 \text{ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-7)

$$x_{fA1} = 40.73 \times 0.058 = 2.36 \text{ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-12)

$$Y_{fB1} = \frac{1}{(40.73 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 0.058 + 0.00) = 0.003 \text{ppm} \quad (\text{ดังแสดงในตาราง ข-16})$$

แทนค่าในสมการ (ค-8)

$$x_{fB1} = 40.73 \times 0.003 = 0.124 \text{ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-13)

$$Y_{sB1} = \frac{1}{(0.159 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 0.00 + 0.124) = 0.051 \text{ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-9)

$$x_{sB1} = 0.159 \times 0.051 = 0.008 \text{ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-14)

$$Y_{sA1} = \frac{1}{(0.159 + \frac{100}{44})} (\frac{100}{44} 0.051 + 2.36) = 1.02 \text{ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-10)

$$x_{sAl} = 0.159 \times 1.02 = 0.162 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-15)

$$Y_{Rf1} = \frac{(1000 - 100)1.10 + (100 \times 0.003)}{1000} = 0.99 \text{ ppm}$$

แทนค่าในสมการ (ค-16)

$$Y_{Rs1} = \frac{(1000 - 100)0.00 + (100 \times 1.02)}{1000} = 0.1 \text{ ppm}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายสินทร์ ยางทอง

เกิด วันที่ 9 พฤษภาคม 2530 ที่จังหวัดสงขลา

การศึกษา

พ.ศ. 2548 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจาก โรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย 2 จังหวัดสงขลา

พ.ศ. 2552 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

พ.ศ. 2552 เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสบการณ์

พ.ศ. 2551 นักศึกษาฝึกงาน ส่วนเทคนิคการผลิต โอลิฟินส์ ฝ่ายการผลิต โอลิฟินส์ I-1 บริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด (มหาชน)

พ.ศ. 2551 นักศึกษาฝึกงาน ส่วนการหลอม ฝ่ายการผลิต บริษัท กระจกไทยอาสาฮี จำกัด (มหาชน)

ทุนสนับสนุนการศึกษา

พ.ศ. 2552 กองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี - จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานทางวิชาการ

Yasin Yangthong, and Ura Pancharoen. Extractions of mercury ion from natural gas well produced water via HFSLM and prediction by mathematic model. Pure and applied chemistry international conference, Bangkok, Thailand, January 5-7, 2011