

การประยุกต์ใช้โมดูลเส้นใยกลวงในการกำจัดปรอทและสารหนูจากน้ำเสีย



นายอักรพล สุดประเสริฐ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

APPLICATION OF HOLLOW FIBER MODULE FOR TREATMENT OF MERCURY AND
ARSENIC FROM WASTE WATER

Mr. Achkaraphon Sudpasert



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้โมเดลเส้นใยกลวงในการกำจัดปรอทและ
สารหนูจากน้ำเสีย

โดย

นายอัศรพล สุดประเสริฐ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ พัฒนะศรี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.สุวัฒน์ สูงเลิศสง่าฟ้า)

อัครพล สุดประเสริฐ : การประยุกต์ใช้โมดูลเส้นใยกลวงในการกำจัดปรอทและสารหนูจากน้ำเสีย. (APPLICATION OF HOLLOW FIBER MODULE FOR TREATMENT OF MERCURY AND ARSENIC FROM WASTE WATER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ, 117 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการแยกปรอทและสารหนูออกจากน้ำเสียปนเปื้อนโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเปรียบเทียบกับระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส โดยน้ำเสียปนเปื้อนที่ใช้มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของปรอทและสารหนูเท่ากับ 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ เพื่อแยกปรอทและสารหนูให้ได้ค่าต่ำกว่ามาตรฐานของภาคอุตสาหกรรมที่กำหนดให้ความเข้มข้นของปรอทและสารหนูต้องไม่เกิน 5 และ 250 ส่วนในพันล้านส่วนนั้น ได้ทำการทดลองโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ผสมกับตัวทำละลายโครซีนเป็นเยื่อแผ่นเหลวและใช้น้ำกลั่นเป็นสารนำกลับ พร้อมทั้งใช้กรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอชของน้ำทั้งสอง รวมทั้งกำหนดอัตราการไหลของน้ำเสียปนเปื้อนและสารนำกลับให้อยู่ในช่วง 100 ถึง 500 มิลลิลิตรต่อนาที จากผลการศึกษาด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงพบว่าในกรณีของปรอทถูกสกัดได้ดีในสถานะที่น้ำเสียปนเปื้อนเป็นกรดแก่และสารนำกลับเป็นเบส ส่วนสารหนูถูกสกัดได้ดีที่สถานะของน้ำเสียปนเปื้อนเป็นเบสแก่และสารนำกลับเป็นกรด สำหรับการศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสียปนเปื้อนและสารนำกลับของทั้งสองระบบนั้น พบว่าอัตราการไหลในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีให้การแยกปรอทและสารหนูได้ดีที่สุด ส่วนอัตราการไหลในระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสที่ 300 มิลลิลิตรต่อนาทีให้ผลการแยกปรอทและสารหนูดีที่สุด ซึ่งจากสถานะที่เหมาะสมข้างต้นทำให้ความเข้มข้นของปรอทและสารหนูในน้ำเสียปนเปื้อนมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด นอกจากนี้ได้คำนวณหาค่าอันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดปรอทและสารหนูด้วยวิธีอินทิเกรต ซึ่งได้ค่าอันดับปฏิกิริยาเท่ากับ 1 และ 2 รวมทั้งค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ 0.911 ต่อนาที และ 0.215 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาทีตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5371493021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ARSENIC / MERCURY / HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE / HOLLOW FIBER MODULE / HOLLOW FIBER CONTACTOR LIQUID MEMBRANE

ACHKARAPHON SUDPASERT: APPLICATION OF HOLLOW FIBER MODULE FOR TREATMENT OF MERCURY AND ARSENIC FROM WASTE WATER. ADVISOR: DISTINGUISHED PROF. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc., 117 pp.

This research studied the separation of mercury and arsenic from wastewater by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane (HFSLM) compared with Hollow Fiber Contactor Liquid Membrane (HFCLM). The wastewater had an initial concentration of mercury and arsenic of 200 and 1,000 ppb respectively. The aim of the work was to ensure that the separation of mercury and arsenic were below the industrial legislation limit of 5 and 250 ppb, respectively. Aliquat 336 was diluted in kerosene and used as a liquid membrane while water was used as a strip solution. Nitric acid and sodium hydroxide were used to adjust the wastewater and strip solution. The volumetric flow rate of wastewater and strip solution was in the range of 100 – 500 ml/min. Results showed that mercury was extracted well but the wastewater contained acid while the strip solution contained base. On the other hand, arsenic was extracted well but wastewater and strip solution contained base and acid condition. The volumetric flow rate between hollow fiber supported liquid membrane (HFSLM) and hollow fiber contactor liquid membrane (HFCLM) was investigated and then compared. The extraction via HFSLM and HFCLM systems achieved good results at 100 and 300 ml/min of volumetric flow rate. In addition, the reaction order and reaction rate constant of mercury and arsenic was determined by an integral method. Order and rate constant of mercury and arsenic were 1, 2, 0.911 per minute and 0.215 L/mg min respectively.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ ปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของ อาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร. ชวัลลี กะลัมพะเทติ และ ดร. สุวัฒน์ สูงเลิศส่งฟ้า จากฝ่ายวิจัยและ บริหารจัดการสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ที่ได้สนับสนุนทุนและเครื่องมืออุปกรณ์ สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ และผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ พัฒนะศรี ผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้เกียรติเป็นประธานและกรรมการในการสอบ วิทยานิพนธ์

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ ให้แก่ เหล่าคณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอ มอบความกตัญญูตเวทิตาคคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่ อาจเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียง ผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้า มาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับงานของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM).....	2
1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดโปรทและสารหนู.....	5
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	9
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ข้อมูลของโปรท.....	11
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโปรท.....	11
2.1.2 แหล่งที่มาของโปรทในสิ่งแวดล้อม.....	12
2.1.3 รูปแบบของสารโปรท.....	13
2.1.4 วัฏจักรของโปรท.....	14
2.1.5 การเข้าสู่ร่างกายของโปรทในสิ่งมีชีวิต [41].....	15
2.2 ข้อมูลของสารหนู.....	16
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารหนู.....	16
2.2.2 แหล่งที่มาของสารหนูในสิ่งแวดล้อม.....	17
2.2.3 รูปแบบของสารหนู.....	18
2.2.4 วัฏจักรของสารหนู.....	19
2.2.5 การเข้าสู่ร่างกายของสารหนูในสิ่งมีชีวิต.....	21

2.3	วิธีการกำจัดปรอทและสารหนู.....	22
2.3.1	กระบวนการโคแอกกูเลชัน.....	22
2.3.2	กระบวนการออกซิเดชันและการกรอง.....	22
2.3.3	กระบวนการดูดซับ.....	23
2.3.4	กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน.....	23
2.4	กระบวนการกำจัดปรอทและสารหนูที่ใช้ในอุตสาหกรรม [5].....	24
2.5	เยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane) [48, 49].....	26
2.6	โมดูลเส้นใยกลวง (Hollow Fiber modules) [48].....	27
2.6.1	การสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane, HFSLM).....	29
2.6.2	การสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow Fiber Contractor Liquid Membrane, HFCLM).....	30
2.7	สารสกัด.....	31
2.7.1	สารสกัดชนิดกรด.....	31
2.7.2	สารสกัดชนิดคีเลต.....	32
2.7.3	สารสกัดชนิดกลาง.....	33
2.7.4	สารสกัดชนิดเบส.....	33
2.8	กลไกการถ่ายเทมวล.....	35
2.8.1	การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ (Diffusion Transport).....	35
2.8.2	การถ่ายเทมวลแบบอาศัยตัวนำพา (Facilitated Transport).....	35
2.9	การประยุกต์ใช้โมดูลเส้นใยกลวง.....	40
2.9.1	รูปแบบการปฏิบัติการ (Operation Mode) แบบ 1 โมดูล [51].....	40
2.9.2	การใช้โมดูลเส้นใยกลวงแบบหลายโมดูลในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	43
2.9.3	การใช้โมดูลเส้นใยกลวงโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow Fiber Contractor Liquid Membrane, HFCLM).....	45
2.10	ทฤษฎีการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	46
2.10.1	การคำนวณร้อยละการสกัด (Percentage of Extraction, %E) ร้อยละการนำกลับ (Percentage of Stripping, %S) และร้อยละการเบี่ยงเบน (% Deviation).....	46

2.10.2 กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) [24]	47
2.10.3 Reaction Flux Model [19]	48
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	52
3.1 สารเคมี.....	52
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	52
3.3 วิธีการทดลอง.....	54
3.3.1. ศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid-Extraction) มีขั้นตอนดังนี้	54
3.3.2. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารสกัดในตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid-Extraction) มีขั้นตอนดังนี้	55
3.3.3. ศึกษาผลของพีเอชในสารละลายป้อนในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid-Extraction) มีขั้นตอนดังนี้	55
3.3.4. ศึกษาผลของสภาวะความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) มีขั้นตอนดังนี้	56
3.3.5. ศึกษาผลของอัตราการไหลในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) มีขั้นตอนดังนี้	58
3.3.6. ศึกษาผลของอัตราการไหลในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow Fiber Contactor Liquid Membrane) มีขั้นตอนดังนี้	58
3.4 ขั้นตอนการทำความสะอาดโมดูลเส้นใยกลวง	60
3.5 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	61
3.5.1 วิธีการวิเคราะห์ปรอทโดยใช้เครื่อง FIMS รุ่น XLAS-400	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	65
4.1 ผลการคัดเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดปรอทและสารหนูโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	65
4.2 ผลของการเลือกสารสกัดและปริมาณสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดปรอทและสารหนูด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย	66
4.3 ผลของพีเอชในสารละลายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อกรสกัดปรอทและสารหนู	67
4.4 ผลการสกัดและนำกลับปรอทและสารหนูด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง	69

4.4.1 ผลการสกัดในสภาวะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นเบส	70
4.4.2 ผลการสกัดในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นกรด	71
4.4.3 ผลการสกัดในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรดและสารละลายนำกลับเป็นเบส	74
4.4.4 ผลการสกัดในสภาวะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นกรด	75
4.4.5 ผลการสกัดในสภาวะที่สารละลายป้อนมีพีเอชเท่านั้นเสียปนเปื้อนและสารละลาย นำกลับเป็นน้ำ	77
4.5 ผลการทดลองการสกัดปรอทและสารหนูเมื่อให้เปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนและ สารละลายนำกลับในเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง	79
4.6 ผลการทดลองการสกัดปรอทและสารหนูเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนและ สารละลายนำกลับในระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลางแบบสัมผัส	83
4.7 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทำนายผลสกัดปรอทและสารหนูใน ระบบเยื่อแผ่นเหลว	85
4.7.1 การหาอันดับ (Order) และค่าคงที่ (rate constant) ของการเกิดปฏิกิริยา	85
4.7.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูในสารละลายป้อนกับอัตรา การไหลของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางกับเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลาง แบบสัมผัสกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	86
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลการทดลอง	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
รายการอ้างอิง	92
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก	97
ภาคผนวก ข	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	117

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะของปรอท [33]	11
ตารางที่ 2. 2 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของปรอทในสถานะต่างๆที่อุณหภูมิ 25°C และ ความดัน 100 KPa [33].....	12
ตารางที่ 2. 3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะของสารหนู [33]	16
ตารางที่ 2. 4 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสารหนูในสถานะต่างๆที่อุณหภูมิ 25°C และ ความดัน 100 KPa [33].....	17
ตารางที่ 2. 5 แสดงข้อดีและข้อเสียของการกำจัดปรอทและสารหนูเมื่อเลือกใช้วิธีต่างๆ.....	24
ตารางที่ 2. 6 แสดงคุณสมบัติในอุดมคติของสารสกัดและตัวทำละลาย	27
ตารางที่ 2. 7 แสดงการเขียนกราฟหาค่าลำดับและค่าคงที่ของปฏิกิริยา.....	48
ตารางที่ 3. 1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลองกับสารละลายชนิดต่างๆ.....	52
ตารางที่ 3. 2 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลางพอลิพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง	53
ตารางที่ 4. 1 แสดงการหาค่าอันดับและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา.....	86
ตารางที่ 4. 2 แสดงค่าตัวแปรที่นำมาใช้ในแบบจำลองของการสกัดปรอทและสารหนู	86
ตารางที่ ก - 1 แสดงค่าการสกัดและนำกลับของปรอทจากโมดูลที่ 4 และสารหนูจากโมดูลที่ 2 โดยใช้ ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางในช่วงเวลา 5 นาทีแรก	100
ตารางที่ ก- 2 แสดงการเขียนกราฟหาค่าอันดับและค่าคงที่ของปฏิกิริยา	100
ตารางที่ ก- 3 แสดงผลสรุปของกราฟเพื่อหาค่าอันดับและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา	102
ตารางที่ ข- 1 ความเข้มข้นของปรอทและสารหนูจากการเปรียบเทียบชนิดของตัวทำละลายด้วย วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณร้อยละการสกัด	104
ตารางที่ ข-2. 1 ความเข้มข้นของปรอทจากการเปรียบเทียบความเข้มข้นของชนิดของสารสกัดในตัว ทำละลายเคโรซีนด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณร้อยละการสกัด	104
ตารางที่ ข-2. 2 ความเข้มข้นของสารหนูจากการเปรียบเทียบความเข้มข้นของชนิดของสารสกัดในตัว ทำละลายชนิดต่างๆด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณร้อยละการสกัด.....	105

ตารางที่ ข-6. 1 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่เส้นใยกลวงแบบ สัมผัสเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ	114
ตารางที่ ข-6. 2 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่เส้นใยกลวงแบบ สัมผัสเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 300 มิลลิลิตรต่อนาที และผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ	115
ตารางที่ ข-6. 3 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่เส้นใยกลวงแบบ สัมผัสเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 500 มิลลิลิตรต่อนาที และผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ	116



สารบัญรูป

รูปที่ 2. 1 แสดงวัฏจักรทางชีวภาพของปรอทในสิ่งแวดล้อม [40]	15
รูปที่ 2. 2 แสดงวัฏจักรของสารหนูในสิ่งแวดล้อม [43].....	20
รูปที่ 2. 3 แสดงการกระจายตัวของอาร์เซนิต์ และ อาร์เซนิตในช่วงพีเอชต่างๆ [43]	21
รูปที่ 2. 4 แสดงกระบวนการกำจัดปรอทและสารหนูออกจากรู้น้ำที่ได้จากกระบวนการผลิต [5].....	25
รูปที่ 2. 5 แสดงลักษณะและส่วนประกอบของโมดูลเส้นใยกลาง.....	28
รูปที่ 2. 6 แสดงชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยกลางแบบที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (CA = Cellulose Acetate, PAN = Polyacrylonitrile, PES = Polyethersulfone, PS = Polysulfone, PVDF = Polyvinylidene fluoride, PE = Polyethylene, PP = Polypropylene).....	28
รูปที่ 2. 7 แสดงลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับบนเส้นใยกลางหนึ่งเส้นในชุดทดลองเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง [50] และการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อน สารละลายนำกลับ และสารสกัดทั้ง 2 โมดูลในระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลางแบบสัมผัส.....	30
รูปที่ 2. 8 แสดงลักษณะการไหลของทั้ง 2 โมดูล ทิศทางการไหลของสารละลายป้อน สารละลายนำกลับ และสารอินทรีย์.....	31
รูปที่ 2. 9 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลอย่างง่าย.....	36
รูปที่ 2. 10 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคุมในทิศทางเดียวกัน	37
รูปที่ 2. 11 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคุมในทิศทางสวนกัน	38
รูปที่ 2. 12 แสดงบริเวณการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายป้อน สารสกัด (เยื่อแผ่นเหลว) และสารละลายนำกลับ.....	38
รูปที่ 2. 13 แสดงขั้นตอนของการถ่ายเทมวล.....	39
รูปที่ 2. 14 ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในโมดูลเส้นใยกลาง	40
รูปที่ 2. 15 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบไหลวน.....	41
รูปที่ 2. 16 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบไหลผ่านหรือไหลต่อเนื่อง	41
รูปที่ 2. 17 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งไหลวนในลักษณะสารละลายป้อนไหลวนและสารละลายนำกลับไหลผ่าน	42
รูปที่ 2. 18 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งไหลวนในลักษณะสารละลายนำกลับไหลวนและสารละลายป้อนไหลผ่าน	43
รูปที่ 2. 19 แสดงการต่อโมดูลเส้นใยกลางแบบอนุกรม	43
รูปที่ 2. 20 แสดงการต่อโมดูลเส้นใยกลางแบบขนาน.....	44

รูปที่ 2. 21 แสดงการต่อโมดูลเส้นใยกลางแบบผสม	44
รูปที่ 2. 22 แสดงระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลางแบบสัมผัสในรูปแบบการไหลแบบต่อเนื่อง	45
รูปที่ 2. 23 แสดงรูปแบบการถ่ายโอนมวลสารภายในท่อของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย กลาง	49
รูปที่ 3. 1 แสดงอุปกรณ์โมดูลเส้นใยกลางที่ผลิตจากพอลิพรพิลีน	53
รูปที่ 3. 2 แสดงการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย	55
รูปที่ 3. 3 แสดงวิธีการนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	57
รูปที่ 3. 4 แสดงการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง.....	57
รูปที่ 3. 5 แสดงการสกัดปรอทและสารหนูใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลางแบบสัมผัส	59
รูปที่ 3. 6 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ปรอทเครื่อง FIMS รุ่น XLAS-400	62
รูปที่ 3. 7 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์สารหนู GFAAS ยี่ห้อ Perkin รุ่น 4110 ZL	64
รูปที่ 4. 1 แสดงค่าการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่างๆ โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำ ละลาย.....	65
รูปที่ 4. 2 แสดงผลการสกัดปรอทของสารสกัดชนิดต่างๆปริมาตรต่างๆในตัวทำละลายเคโรซีน ด้วย วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	66
รูปที่ 4. 3 แสดงค่าการสกัดปรอทและสารหนูของสารสกัดชนิดต่างๆในสัดส่วนร้อยละ 10 ของสาร สกัดในตัวทำละลายเคโรซีนด้วยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	67
รูปที่ 4. 4 แสดงค่าการสกัดปรอทของสารสกัด Aliquat 336 และ Cyanex 923 ร้อยละ 10 ในตัว ทำละลายเคโรซีนที่ค่าพีเอชต่างๆ โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย	68
รูปที่ 4. 5 แสดงค่าการสกัดสารหนูโดยเปรียบเทียบสารสกัด Aliquat 336 และ Cyanex 923 ใน ปริมาตรร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีนที่ค่าพีเอชต่างๆ โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย	69
รูปที่ 4. 6 แสดงค่าการสกัดและนำกลับปรอทในสารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเค โรซีน ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางในสถานะที่สารละลายป้อนเป็นเบสและ สารละลายนำกลับเป็นเบส.....	70
รูปที่ 4. 7 แสดงค่าการสกัดและนำกลับสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำ ละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางในสถานะที่สารละลายป้อนเป็นเบส และสารละลายนำกลับเป็นเบส	71

รูปที่ 4. 18 แสดงค่าการนำกลับสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่อัตราการใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่างๆ.....	82
รูปที่ 4. 19 แสดงค่าการสกัดปรอทโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสโดยใช้อัตราการใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ต่างกัน	83
รูปที่ 4. 20 แสดงค่าการสกัดสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสที่อัตราการใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่างๆ.....	84
รูปที่ 4. 21 แสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละการสกัดปรอทที่อัตราการใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	87
รูปที่ 4. 22 แสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละการสกัดสารหนูที่อัตราการใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	88
รูปที่ 5. 1 แสดงการนำเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงต่อเข้ากับระบบกระบวนการกำจัดปรอทและสารหนูออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิต.....	91
รูปที่ ก- 1แสดงค่าของการพลอตกราฟอันดับที่หนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาของปรอท.....	101
รูปที่ ก- 2 แสดงค่าของการพลอตกราฟอันดับที่สองของการเกิดปฏิกิริยาของสารหนู.....	101

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปรอทและสารหนูที่ปนเปื้อนจากแหล่งอุตสาหกรรมต่างๆก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตอย่างมาก [1] พิษของสารหนูนั้นมีทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง [2] อาการเฉียบพลัน ทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียนเป็นตะคริว กล้ามเนื้อเกร็ง อาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ และเสียชีวิตจากการทำงานล้มเหลวของหัวใจ อาการพิษเรื้อรัง เกิดจากการได้รับสารหนูติดต่อกันเป็นเวลานานมีอาการอ่อนเพลียของแขน ขา และอาจเป็นมะเร็งผิวหนังและปอดและมีฤทธิ์ที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ ทางด้านปรอทนั้นหากได้รับจะเกิดมีอาการชามือและเท้า ตลอดจนแขนขาและริมฝีปาก อารมณ์หงุดหงิด ภาวะวณกระวาย พูดซ้ำไม่เป็นภาษา หูไม่ได้ยิน กล้ามเนื้อแขนขาไม่สัมพันธ์กัน ควบคุมตัวเองไม่ได้และเป็นอัมพาตในที่สุด [3] เมื่อปรอทและสารหนูเป็นสารอันตรายหากทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อมก็จะทำให้มนุษย์และสัตว์เกิดอันตรายได้ ดังนั้นทางหน่วยงานของรัฐจึงได้กำหนดค่ามาตรฐานของน้ำทิ้งที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยลงสู่ธรรมชาติ โดยค่ามาตรฐานของปรอทและสารหนูที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมต้องไม่เกิน 5 และ 250 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ [4] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องทำการแยกปรอทและสารหนูที่ปนอยู่ในน้ำเสียออกก่อนที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

มีผู้ที่คิดค้นวิธีที่ใช้แยกปรอทและสารหนูไว้หลายวิธี เช่น ถ้าเป็นบนแท่นชุดเจาะมีวิธีบำบัดที่เรียกว่า “Zero water discharge” [5] ซึ่งวิธีการนี้ใช้สารเคมีทำให้ปรอทและสารหนูตกตะกอน จากนั้นก็แยกปรอทและสารหนูที่อยู่ในตะกอนออก แล้วนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วอัดลงไปในหลุม น้ำมันเก่าหรือทิ้งลงทะเลไป นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นๆที่ใช้แยกสารหนูและปรอท เช่น การตกตะกอน , การแลกเปลี่ยนไอออน, การสกัดด้วยตัวทำละลาย, การสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นต่างๆ เช่น การใช้ออสโมซิสผกกลับ, อตราฟิวเตรชัน และอื่นๆ [6] หรือแม้แต่การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ จากวิธีที่กล่าวมานี้มีวิธีที่สามารถทำการแยกได้ดี แต่เมื่อเจอความเข้มข้นต่ำมากๆ ก็มีปัญหว่าแยกยาก หรือบางวิธีสามารถแยกให้ได้ค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดแต่กลับสร้างปัญหามลพิษอื่นๆ ด้วยปัญหาต่างๆเหล่านี้ ผู้วิจัยจึงมองหากระบวนการใหม่ๆที่มีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในการแยกปรอทและสารหนู ดังนั้นเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง จึงถูกเลือก เพราะมีผู้ศึกษาแล้วว่า การสกัดโลหะโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้นมีข้อดีหลายประการ คือการแยกมีประสิทธิภาพการสกัดสูงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกต่ำกว่า 1 ส่วนในล้านส่วน [7-9] สามารถสกัดและนำกลับในขั้นตอน

เดียว [10, 11] ใช้พลังงานน้อยและมีค่าการดำเนินงานที่ต่ำ [11-13] แต่ละโมดูลมีขนาดเล็กทำให้ไม่เปลืองพื้นที่ใช้งานและสามารถขนย้ายได้ง่าย [14, 15] สามารถขยายขนาดเพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมได้ [10, 16] แต่กระบวนการนี้มีปัญหาที่สำคัญอยู่ที่สารสกัดที่อยู่ภายในรูพรุนของเส้นใยกลวงนั้นไม่ได้ถูกตรึงไว้อย่างแน่นอนหนาแน่นเมื่อไหลสารละลายป้อนที่อัตราการไหลสูงๆทำให้สารสกัดสามารถหลุดออกมาจากรูพรุนได้ จึงเป็นเหตุทำให้การสกัดนั้นต่ำลง เนื่องจากความเสถียรของสารสกัดยังเป็นปัญหาของระบบดังกล่าว ซึ่งทำให้การทำงานถูกกำหนดด้วยเวลาที่จำกัด แต่สารละลายป้อนที่มีปริมาณมากจึงมองหาวิธีการใหม่เพื่อลดระยะเวลาในการสกัด ทำให้มีการประยุกต์จากวิธีที่ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane, HFSLM) เป็นวิธีการใหม่นั้นคือ การสกัดด้วยระบบที่ใช้โมดูลเส้นใยกลวงจำนวน 2 โมดูลซึ่งเรียกว่า “ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow fiber Contactor Liquid Membrane, HFCLM)” [17]

เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงกับเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสนั้น แตกต่างกันคือ ถ้าเป็นเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงประกอบด้วย 3 เฟสในโมดูลเดียวสำหรับการสกัดและนำกลับไปพร้อมๆกัน แต่ถ้าหากเป็นเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

แยกโมดูลกันระหว่างการสกัดและการนำกลับ โดยโมดูลแรกให้สารละลายป้อนสัมผัสกับสารอินทรีย์เพื่อให้เกิดการสกัด ส่วนโมดูลที่ 2 ให้สารอินทรีย์สัมผัสกับสารละลายนำกลับเพื่อเกิดการนำกลับ ซึ่งระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสนี้ (HFCLM) สารอินทรีย์จะไหลผ่านทั้ง โมดูลตลอดเวลาซึ่งทำให้สารสกัดอยู่ในรูพรุนได้นานกว่าวิธีการแรก ในงานวิจัยนี้เราศึกษาการสกัดและนำกลับเปรียบเทียบกันระหว่างระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) กับระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (HFCLM) ในการสกัดปรอทและสารหนูที่ปนเปื้อนจากน้ำล้างคอนเดนเสท โดยงานวิจัยนี้เลือกสารสกัด Aliquat 336 ซึ่งเป็นสารสกัดชนิดเบสและเลือกใช้โครซีนเป็นตัวทำละลายในการสกัดปรอทและสารหนู [18]

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับงานของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM)

Pancharoen และคณะ [19] ได้ศึกษาการสกัดทองแดง (Cu(II)) ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) โดยเลือกใช้ LIX 84I เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายโครซีน และเลือกใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นสารละลายนำกลับ ในงานศึกษานี้ได้มีการสร้างแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อทำนายการทดลองที่เกิดขึ้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้ใช้ทำนายผลการสกัดทองแดงจากน้ำสังเคราะห์ แบบจำลองนี้สร้างขึ้นมาโดยให้ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาการสกัดมีความสำคัญต่อระบบ ส่วนที่ศึกษาได้แก่ สารส่งผ่านมวลสารจากปฏิกิริยาเคมีในชั้นรอยต่อของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว หาค่าร้อยละการสกัดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและอัตราการไหลของสารละลายป้อน เวลาและจำนวนรอบที่เหมาะสมที่ใช้แยก ผลการทดลองสามารถสกัดทองแดง (Cu(II)) มากกว่าร้อยละ 99 ภายใต้สภาวะที่ความเข้มข้นของ LIX 84I ร้อยละ 3 เมื่อนำผลการทดลองมาเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อเทียบกับการทดลอง พบว่า ผลการทดลองเบี่ยงเบนไปจากแบบจำลองประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

Ramakul และคณะ [20] ได้ศึกษาการสกัดโคบอลต์ (Co(II)) ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) โดยเลือกใช้ D2EHPA เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และเลือกใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นสารละลายนำกลับ ในงานวิจัยนี้อัตราการส่งผ่านมวลสาร (Mass transfer rate) จะอธิบายในเทอมของการซึมผ่าน (Permeability, P) โดยจะเน้นที่การแพร่ของมวลสารผ่านชั้นของสารละลายป้อน เยื่อแผ่นเหลว และสารละลายนำกลับ การทดลองนี้ศึกษา ความเร็วของสารละลายป้อน (100 ถึง 500 มิลลิลิตรต่อนาที) ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลาย (0.1 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) อัตราการไหลของสารละลายนำกลับ (100 ถึง 1000 มิลลิลิตรต่อนาที) และความเข้มข้นของสารละลายป้อน (100 ถึง 1000 ส่วนในล้านส่วน) โดยผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อเทียบกับการทดลอง พบว่า ผลของการทดลองเข้ากันได้ดีกับผลของแบบจำลอง นอกจากนี้โดยผลของแบบจำลองยังสามารถอธิบายเกี่ยวกับขั้นตอนที่เป็นข้อจำกัดของระบบ (rate limiting step) คือ ขั้นตอนของการแพร่ผ่านในชั้นฟิล์มของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับ ผลการศึกษาของงานนี้แบบจำลองสามารถทำนายการซึมผ่านของโคบอลต์ได้เป็นอย่างดี

Ramakul และคณะ [21] ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการทดลองเกี่ยวกับการสกัดและนำกลับซีเรียม (Ce(II)) จากตัวกลางซัลเฟต โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) ในระบบแบบไหลวน (Recycling Mode) เลือกใช้ TOA เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และเลือกใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ ผลการทดลองที่ความเข้มข้นของ TOA ในตัวทำละลายเคโรซีนน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยปริมาตรสกัดซีเรียม (Ce(II)) ได้ไม่เกินร้อยละ 20 แต่ถ้าความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง 10 โดยปริมาตรสามารถสกัดซีเรียมได้ร้อยละ 60 ถึง 80 นอกจากนี้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าการถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_f) และสารอินทรีย์ (k_m) พบว่า ค่าการถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_f) และสารอินทรีย์ (k_m) เท่ากับ 9.47×10^{-2} และ 6.303 เซนติเมตรต่อวินาทีตามลำดับ และศึกษาขั้นตอนที่เป็นตัวควบคุม (rate controlling step) คือขั้นตอนการแพร่ของสารประกอบซีเรียมผ่านชั้นของเยื่อแผ่นเหลว รวมทั้งศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความเข้มข้นของซีเรียมในสารละลายป้อนที่เวลาต่างๆที่

ความเข้มข้นของสารสกัดของสารสกัด TOA ในเคโรซีนมีค่าสูงกว่าร้อยละ 5 โดยปริมาตร และพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกันเป็นอย่างดี

Kittisupakorn และคณะ [22] ได้ศึกษาการสกัดทองแดง (Cu(II)) ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) โดยเลือกใช้ D2EHPA เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายเคโรซีน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทมวลของระบบ โดยพัฒนามาจากกระบวนการแพร่ผ่านในฝั่งสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณรอยต่อของชั้นน้ำและสารอินทรีย์และการแพร่ผ่านบริเวณเยื่อแผ่นเหลว ผลการทดลองพบว่าสารสกัดทองแดง (Cu(II)) ได้ทั้งหมด เมื่อความเข้มข้นของทองแดงน้อยกว่า 100 ส่วนในล้านส่วนและความเข้มข้นของ D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีนมากกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไว้ 2 รูปแบบ คือ แบบไหลวน (Recycling Mode) และแบบไหลผ่าน (One through Mode) เมื่อนำผลการทดลองมาเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มาใช้ทำนายผลการทดลองพบว่า เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Error) ร้อยละ 12.25 และมีค่าความเบี่ยงเบน (S.D.) ร้อยละ 13.74

Suren และคณะ [23] ได้ศึกษาการแยกตะกั่ว (Pb(II)), พรอท (Hg(II)) ออกจากโซเดียม (Na(I)) ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) การทดลองนี้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงการสกัดและนำกลับเมื่อเปลี่ยน ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัด การวางแบบโมดูลที่ใช้สกัดเวลาที่ใช้ในการสกัด อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยวิธี Generating function เพื่อใช้ทำนายความเข้มข้นของตะกั่วและพรอทในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ผลการทดลองสามารถแยกตะกั่วและพรอทออกจากกันได้เป็นอย่างดีโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจำนวน 2 โมดูล โดยที่โมดูลแรกเลือกใช้ D2EHPA 0.03 โมลาร์ ซึ่งสกัดตะกั่วได้ร้อยละ 98 และใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.9 โมลาร์เป็นสารละลายนำกลับ ส่วนโมดูลที่สองเลือกใช้ Aliquat 336 0.03 โมลาร์ ซึ่งสกัดพรอทได้ เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ และใช้ไทโอยูเรีย 0.1 โมลาร์เป็นสารละลายนำกลับ จากนั้นหาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสกัดและนำกลับตะกั่ว คือ 1.51 และ 11.20 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที ทางด้านพรอทพบว่า ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสกัดและนำกลับ คือ 1.20 และ 9.25 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาทีตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเมื่อใช้ทำนายผลการทดลองพบว่าค่าการสกัดและนำกลับเบี่ยงเบนไปร้อยละ 2 และ 5 ตามลำดับ

Wannachod และคณะ [24] ได้ศึกษาการสกัดไนโอเบียม (Nd(II)) ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พยุ่งด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) โดยเลือกใช้ HEHEPA เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายออกเทน และเลือกใช้กรดไนตริก (HNO_3) เป็นสารละลายนำกลับ จากการศึกษาพบว่า สามารถสกัดและนำกลับไนโอเบียมได้สูงสุด 95 และ 89 เปอร์เซ็นต์โดยใช้สารละลายป้อนพีเอช 4.5 และใช้สารสกัด HEHEPA 0.5 โมลาร์ และใช้กรดไนตริก 4 โมลาร์ และอัตราการไหลในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนามาจากกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) ซึ่งประกอบด้วยเทอมของการนำ (Conduction), การแพร่ (Diffusion), การเกิดปฏิกิริยา (Reaction) และการสะสมตัว (Accumulation) โดยผลที่ได้พบว่าค่าการสกัดและนำกลับเพียงเบนไป 1.9 และ 1.2 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดปรอทและสารหนู

Wisniewski และคณะ [25] ได้ศึกษาการสกัดสารหนูชนิดอาร์ซีนีต์ (As^{3+}) และ อาร์ซีนิต (As^{5+}) จากสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในช่วง 50 ถึง 200 กรัมต่อลิตร โดยเลือกใช้สารสกัด Cyanex 923 ละลายใน Exxsol 220/230 (อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยปริมาตร) ใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) ใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ ผลการศึกษาพบว่า สามารถการสกัดอาร์ซีนีต์และอาร์ซีนิตได้สูงที่สุด ร้อยละ 40 และ 63 ตามลำดับ โดยค่าการสกัดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น และการทดลองนี้

Li และคณะ [26] ได้ศึกษาด้วยวิธีเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน (Emulsion) การสกัดแยกไอออนปรอท (Hg^{2+}) โดยเลือกใช้ tri-n-octylamine (TOA) เป็นสารสกัดผสม sorbital monooleate (span 80) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวและโพลีอินเป็นตัวทำละลายเพื่อทำเป็นเยื่อแผ่นเหลว และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่สามารถแยกปรอทได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 98 ในสภาวะที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคลอไรด์ และกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.01 และ 0.025 โมลาร์ ความเข้มข้นของ TOA 0.025 โมลาร์ ซึ่งผสมกับ span 80 อัตราส่วนร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และสารละลายนำกลับใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ทำให้สามารถสกัดแยกไอออนปรอทออกจากไอออนอื่นๆ (Cu, Zn, Fe, Co, Ni, Pb, Mn, Cd) ได้อย่างสมบูรณ์

Iberhan และ Wisniewski [27] ได้ศึกษาการสกัดสารหนูชนิดอาร์ซีนีแอนด์ (As^{3+}) และ อาร์ซีนีเนต (As^{5+}) จากสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้สารสกัด Cyanex 925 และ Cyanex 301 และสารสกัดผสมระหว่างสารทั้งสองชนิดนี้ จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการสกัดสารหนูเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้โดยประสิทธิภาพการสกัดสารหนูยังขึ้นกับสารสกัด คือ Cyanex 925 สกัดอาร์ซีนีเนตได้ดีกว่าอาร์ซีนีแอนด์ ในขณะที่การผสมการสกัด Cyanex 925 กับ Cyanex 301 สามารถสกัดอาร์ซีนีแอนด์ได้ดีกว่าอาร์ซีนีเนต สารหนูสามารถนำกลับได้ดีเมื่อเลือกใช้ Cyanex 925 เป็นสารสกัด แต่เมื่อเลือกใช้ Cyanex 301 ไม่สามารถนำกลับสารหนูด้วยน้ำได้

Sangtumrong และคณะ [28] ได้ศึกษาการแยกไอออนปรอท (Hg^{2+}) และสารหนู (As^{3+}) ออกจากสารละลายคลอไรด์โดยเลือกใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) โดยดำเนินการแบบไหลวน (Recycle mode) และเลือกใช้ TOA ละลายในโทลูอีนเป็นสารสกัด กับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่ดีที่สุดอยู่ที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ในเยื่อแผ่นเหลวความเข้มข้นที่เหมาะสมคือร้อยละ 2 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 โมลต่อลิตร เมื่อนำไปสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีเพียงไอออนปรอทเท่านั้นที่สามารถสกัดและนำกลับได้ร้อยละ 100 และร้อยละ 95 ตามลำดับ ไอออนสารหนูไม่สามารถสกัดและนำกลับได้เลย การศึกษานี้พบว่าระบบนี้สามารถเลือกสกัดปรอทออกจากสารหนูได้ร้อยละ 100

Fabrega และ Mansur [29] ได้ศึกษาการสกัดปรอท (Hg^{2+}) จากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) โดยเลือกใช้ Aliquat 336 ในตัวทำละลายเคโรซีนเป็นสารสกัด โดยในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ได้เติม 1-octanol ปริมาณร้อยละ 15 โดยปริมาตรลงไปเพื่อช่วยให้วัฏภาคของน้ำและน้ำมันรวมกันได้ดีขึ้น ส่วนสารละลายนำกลับเลือกใช้โทโอยูเรีย ผลการศึกษาพบว่าที่ พีเอช 1 ค่าการสกัดปรอทเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 5 นาที การศึกษานี้สามารถสกัดและนำกลับปรอทได้มากกว่าร้อยละ 99

Pancharoen และคณะ [11] ได้ศึกษาการสกัดปรอท ($HgCl_4^{2-}$) จากน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการชุบเงาอากาศยาน โดยเลือกใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) โดยมี TOA เป็นสารสกัดละลายในตัวทำละลายโทลูอีน ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารละลายนำกลับ งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน (น้ำทิ้ง) ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ จำนวนรอบที่ใช้ในการสกัด และอายุการใช้งานของเยื่อแผ่น

เหลว ผลการศึกษาพบว่า สามารถสกัดไอออนปรอทได้สูงสุดร้อยละ 99.8 และนำกลับได้สูงสุดร้อยละ 62 ที่ 6 รอบการสกัด (300 นาที) ที่สภาวะสารละลายป้อนมีพีเอช 2.5 เยื่อแผ่นเหลวมีความเข้มข้นของ TOA ร้อยละ โดยปริมาตร ละลายอยู่ในเคโรซีน และความเข้มข้นสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เหมาะสมเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที อายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 120 นาที และเมื่อทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของปรอทสารละลายป้อน (k_p) และในเยื่อแผ่นเหลว (k_m) ได้เท่ากับ 0.011 และ 0.413 เซนติเมตรต่อวินาทีตามลำดับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในสารละลายป้อน ดังนั้นกล่าวได้ว่าขั้นตอนควบคุมการถ่ายเทมวลในระบบ คือ การถ่ายโอนมวลในสารละลายป้อน

Pancharoen และคณะ [9] ได้ศึกษาการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูจากน้ำทิ้งที่ได้จากโรงแยกก๊าซธรรมชาติจากอ่าวไทยโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยมีตัวเลือกสารสกัด 5 ชนิด ได้แก่ Cyanex 923, TBP, Cyanex 301, TOA และ Aliquat 336 ในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ จำนวนรอบในการผ่านโมดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ผลการศึกษาพบว่า การสกัดสารหนูที่ดีที่สุดใช้สารสกัดร้อยละ 35 โดยปริมาตรของ Aliquat 336 ในเคโรซีน ซึ่งสกัดได้มากกว่าร้อยละ 50 ส่วนการนำกลับเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทำให้น้ำกลับไอออนสารหนูได้มากขึ้นและคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.5 โมลต่อลิตร การศึกษานี้สามารถสกัดและนำกลับไอออนสารหนูได้ร้อยละ 91 และร้อยละ 72 และพบว่าความเข้มข้นของไอออนสารหนูเหลือเพียง 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อทดลองผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงไป 3 รอบ

Prapasawat และคณะ [30] ได้ศึกษาการแยกสารหนูชนิดอาร์ซีนีต์ (As^{3+}) และ อาร์ซีนิต (As^{5+}) จากสารละลายซัลเฟตด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้ Cyanex 923 ในตัวทำละลายโทลูอีนเป็นสารสกัดและใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ จากการศึกษาพบว่า สามารถสกัดสารหนูได้สูงสุดโดยใช้ Cyanex 923 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโทลูอีน ซึ่งผลการสกัดจะได้ค่าการสกัดของอาร์ซีนิตมากกว่าอาร์ซีนีต์ เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการสกัดและการนำกลับมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารหนูในสารละลายป้อน (k_p) และในเยื่อแผ่นเหลว (k_m) สำหรับอาร์ซีนิตมีค่าเท่ากับ 7.15×10^{-3} และ 3.45×10^{-2} เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนอาร์ซีนิต มีค่า k_p และ k_m เท่ากับ 1.07×10^{-2} และ 1.79×10^{-2} เซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้นขั้นตอนควบคุมการถ่ายโอนมวล คือ ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในสารละลายป้อน

Uedee และคณะ [31] ได้ศึกษาการแยกโดยสังเคราะห์ปรอท (Hg^{2+}) จากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เลือกใช้ TOA เป็นสารสกัดแล้วใช้โครซีนเป็นตัวทำละลายและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ การศึกษาพบว่าเมื่อใช้ร้อยละ 3 ของ TOA ละลายในโครซีนสามารถสกัดปรอทได้ร้อยละ 100 ที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมลต่อลิตร และสามารถนำกลับปรอทได้ถึงร้อยละ 97 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.5 โมลต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของปรอทตั้งแต่ 1 ถึง 100 ส่วนในล้านส่วน ค่าการสกัดและนำกลับแทบไม่ต่างกันเลย

Yasin และคณะ [32] ได้ศึกษาการสกัดแยกไอออนปรอทในรูปของ $HgCl_4^{2-}$ ออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมผลิตปิโตรเลียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้ใช้ระบบปฏิบัติการแบบไหลวนและศึกษาเปรียบเทียบการสกัดและนำกลับแบบใช้โมดูลเดียวและแบบ 2 โมดูล จากผลการศึกษาพบว่าไอออนปรอทในน้ำทิ้งสามารถถูกสกัดและนำกลับได้ถึงร้อยละ 99.89 และ 95.45 ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร สารสกัด aliquat 336 ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตรในโครซีน ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ thiourea ที่ 0.1 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับเท่ากับ 100 มิลลิลิตร ต่อนาที โดยการศึกษาพบว่า การสกัดโดยใช้ 2 โมดูลให้ผลการทดลองดีกว่าโมดูลเดียว

Lothongkum และคณะ [18] ได้ศึกษาการสกัดแยกไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์และใช้ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัดผลของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ และจำนวนรอบในการไหลผ่านโมดูลเส้นใยกลวงของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ การศึกษาพบว่า aliquat 336 ให้ประสิทธิภาพในการสกัดไอออนสารหนูและปรอทสูงสุด และเมื่อผสมสารสกัด aliquat 336 กับ Cyanex 471 เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์และให้ค่าสัมประสิทธิ์การสกัดแบบเสริมฤทธิ์เป็น 2.8 ความเข้มข้นของสารสกัดผสมที่เหมาะสมในการสกัดไอออนสารหนูและปรอทคือให้ aliquat 336 เข้มข้น 0.22 โมลต่อลิตรและ Cyanex 471 เข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสมคือ 0.2 โมลต่อลิตร โดยสกัดปรอทได้ร้อยละ 97 และสารหนูได้ร้อยละ 62 ในส่วนการนำกลับพบว่าสารละลายไทโอยูเรียสามารถนำกลับไอออนสารหนูและปรอทได้ดีกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำที่ปราศจากไอออน กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก โดยความเข้มข้นสารละลายไทโอยูเรียที่เหมาะสมคือ 0.1 โมลต่อลิตร ทำให้นำกลับปรอทได้ร้อยละ 46 และนำกลับสารหนูได้ร้อยละ 11 การศึกษานี้สามารถสกัดปรอทได้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมตั้งแต่รอบแรก แต่สกัดสารหนูต้องให้สารละลายป้อนในในระบบถึง 3 รอบจึงสกัดได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานอุตสาหกรรม

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.3.1 กำจัดไอออนปรอทและสารหนูออกจากน้ำล้างคอนเดนเสทให้ได้ค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำของกระทรวงอุตสาหกรรมก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

1.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกไอออนปรอทและสารหนูออกจากน้ำล้างคอนเดนเสท โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงกับเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

1.3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมดูลเส้นใยกลวงที่ใช้แบบ 1 และ 2 โมดูล

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ศึกษาประสิทธิภาพการแยกไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากน้ำล้างคอนเดนเสทด้วยโมดูลเส้นใยกลวงที่ผลิตจากพอลิโพรไพลีนชนิดมีรูพรุนของบริษัท Liqui-Cel[®] Membrane รุ่น Contactors X-50 Fiber โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ อัตราการไหลและพีเอชของสารละลายป้อนและสารนำกลับที่เหมาะสม

1.4.2 ศึกษาและเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆ ระหว่างระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงกับเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนของปรอทและสารหนูออกจากน้ำล้างคอนเดนเสทโดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่

- อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับ
- อัตราการไหลของสารอินทรีย์
- เวลาที่ใช้ในการสกัด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสกัดไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำล้างคอนเดนเสท และน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีอื่นๆ อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปขยายขนาดสำหรับใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลของปรอท

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท

ปรอทจัดเป็นโลหะประเภทโลหะทรานซิชันและเป็นโลหะเพียงชนิดเดียวที่มีสถานะเป็นของเหลว มีคุณสมบัติอื่นๆตามตาราง 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2. 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะของปรอท [33]

คุณสมบัติ	ค่าที่ได้
มวลโมเลกุล	200.59
จุดเดือด, องศาเซลเซียส	356.9
จุดเยือกแข็ง, องศาเซลเซียส	-38.87
ความหนาแน่น, กรัมต่อมิลลิลิตร	13.545
ความหนืดพลวัต, มิลลิปาสคาลเซค	1.53
ค่าการนำความร้อน, วัตต์ต่อมิลลิเคลวิน	8.30
อุณหภูมิวิกฤต, องศาเซลเซียส	1477
ความดันวิกฤต, เมกกะปาสคาล	172
ค่าที่ทำให้เกิดเป็นไอออน, อิเล็กตรอนโวลต์	10.44
ค่าเอนทัลปีของจุดเยือกแข็ง, กิโลจูลล์ต่อโมล	2.29
ค่าเอนทัลปีของจุดเดือด, กิโลจูลล์ต่อโมล	59.11
ค่าความดันไอที่ 100 องศาเซลเซียส, กิโลปาสคาล	0.037

ตารางที่ 2. 2 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของปรอทในสถานะต่างๆที่อุณหภูมิ 25°C และความดัน 100 KPa [33]

คุณสมบัติ	ของแข็ง	ของเหลว	ก๊าซ
ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด, กิโลจูลต่อโมล	-	0.0	61.4
ค่าเอนโทรปีมาตรฐาน, จูลต่อโมลเคลวิน	-	75.9	175.0
ค่าความจุความร้อน, จูลต่อโมลเคลวิน	-	28.0	20.8

2.1.2 แหล่งที่มาของปรอทในสิ่งแวดล้อม

1. แหล่งธรรมชาติ ปรอทที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปของแร่อิสระหรือในรูปของซัลไฟด์ปะปนอยู่ในเนื้อหินประเภทต่างๆ เช่น หินปูน หรือหินทราย เป็นต้น ปรอทเหล่านี้สามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมโดยการละลาย การระเหย การผุกร่อนของหินดินแร่ที่มีส่วนประกอบของปรอท การปนออกจากการระเบิดของภูเขาไฟ และการระเหยจากมหาสมุทร มีการประมาณว่าการแพร่กระจายของปรอทจากธรรมชาติประมาณ 2,700 – 6,000 ตันต่อปี [34] แต่ปริมาณของปรอทที่มาจากธรณินั้นถือว่าน้อยมากหากเทียบกับการแพร่กระจายของปรอทจากการกระทำของมนุษย์ [35]

2. แหล่งที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์นำปรอทมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตต่างๆมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น การใช้ยาฆ่าแมลง การทำเหมืองแร่ ฯ การกระทำเหล่านี้เป็นการปลดปล่อยปรอทสู่ธรรมชาติโดยเฉลี่ยประมาณ 10,000 ตันต่อปี นอกจากนี้ปรอทยังแฝงอยู่ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ในชีวิตประจำวันของมนุษย์หลายอย่าง เช่น ในไฟฟ้า แบตเตอรี่ เหล็กและเหล็กกล้า เครื่องสำอาง รวมถึงทันตกรรม [36]

3. แหล่งที่มาจากการผลิตปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ, คอนเดนเสท และน้ำมัน ซึ่งเป็นพลังงานหลักของประเทศไทย การผลิตปิโตรเลียมต้องผ่านกระบวนการหลายๆขั้นตอน และในขั้นตอนต่างๆ จะมีปรอทปะปนอยู่ ปรอทเหล่านี้ปนอยู่กับผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมต่างๆภายในหลุมขุดเจาะ และเมื่อนำปิโตรเลียมขึ้นมาจากหลุมขุดเจาะ ปรอทที่ปนมากับก๊าซธรรมชาติและคอนเดนเสทและน้ำที่ถูกนำมาพร้อมๆกัน โดยปรอทที่พบในการผลิตปิโตรเลียมลักษณะนี้มีอยู่ 2 รูปแบบคือ รูปของธาตุปรอท (เป็นปรอทเหลวสีขาวและมันวาว) และสารประกอบของปรอทที่มักปนอยู่กับน้ำที่ถูกนำขึ้นมาด้วย สารประกอบของปรอทที่พบส่วนใหญ่เป็น Di-methyl mercury และ Di-ethyl mercury [37]

2.1.3 รูปแบบของสารปรอท

ปรอท (Mercury, Hg) เป็นธาตุโลหะหนักชนิดหนึ่งที่พบอยู่ตามธรรมชาติในรูปของแร่อิสระหรือในรูปของปรอทซัลไฟด์ (HgS) ปรอทสามารถจำแนกได้เป็น

- ปรอทในรูปโลหะ (Metallic mercury)
- ปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic mercury)
- ปรอทในรูปสารประกอบอินทรีย์ (Organic mercury)

1. ปรอทในรูปโลหะ (Hg^0) ปรอทเป็นโลหะเพียงชนิดเดียวที่มีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องมีสีขาวคล้ายเงิน เป็นโลหะปรอทบริสุทธิ์ที่ค่อนข้างเฉื่อยและไม่มีพิษสามารถแปรสภาพเป็นของแข็งได้แต่เปราะและระเหยเป็นไอได้ง่ายและไอปรอทมีพิษที่ร้ายแรงมาก นอกจากนี้ยังพบปรอทซัลไฟด์ (HgS) ในดินตามธรรมชาติซึ่งมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำและไม่เป็นพิษ

2. ปรอทในรูปสารประกอบอินทรีย์ เป็นปรอทรูปที่มีความเป็นพิษ สามารถอยู่ได้ทั้งในรูปของสารปรอทอินทรีย์เชิงเดี่ยว เช่น CH_3Hg^+ (Methyl Mercury) ซึ่งเป็นรูปที่มีความเป็นพิษมากที่สุดหรืออยู่ในรูปของสารปรอทอินทรีย์เชิงคู่ เช่น $(CH_3)_2Hg$ (Dimethyl Mercury) ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่าแต่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารปรอทอินทรีย์เชิงเดี่ยวได้หากอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด

3. ปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์_ ปรอทเมื่อถูกออกซิไดซ์พบได้ 3 รูป คือ Hg^0 (ปรอทที่ไม่มีประจุ), Hg^+ (Mercurous) และ Hg^{2+} (Mercuric) โดยที่ Hg^+ (Mercurous) สามารถรวมตัวกับคลอไรด์เกิดเป็น เมอร์คิวิลคลอไรด์ (Hg_2Cl_2) มีลักษณะเป็นตะกอนสีขาวไม่ละลายน้ำมีพิษไม่มากแต่หากสัมผัสกับแสงสว่างโดยตรงจะเกิดการสลายตัวได้เป็น Hg กับ เมอร์คิวริกคลอไรด์ ($HgCl_2$) ซึ่งเป็น Hg^{2+} (Mercuric) ที่มีความเป็นพิษสูง นอกจากนี้ Hg^{2+} (Mercuric) ยังสามารถรวมตัวกับคลอไรด์ได้โดยตรงเกิดเป็นเมอร์คิวริกคลอไรด์ ($HgCl_2$) ได้ ปรอทอนินทรีย์สามารถเปลี่ยนเป็นปรอทอินทรีย์ได้ภายใต้การกระทำของจุลินทรีย์

นอกจากข้างต้นแล้ว Lindquist ได้เสนอให้แบ่งรูปแบบทางเคมีของปรอทเป็น 3 กลุ่มคือ Volatile (V), Reactive (R) และ Non-Reactive (NR) โดยกำหนดให้

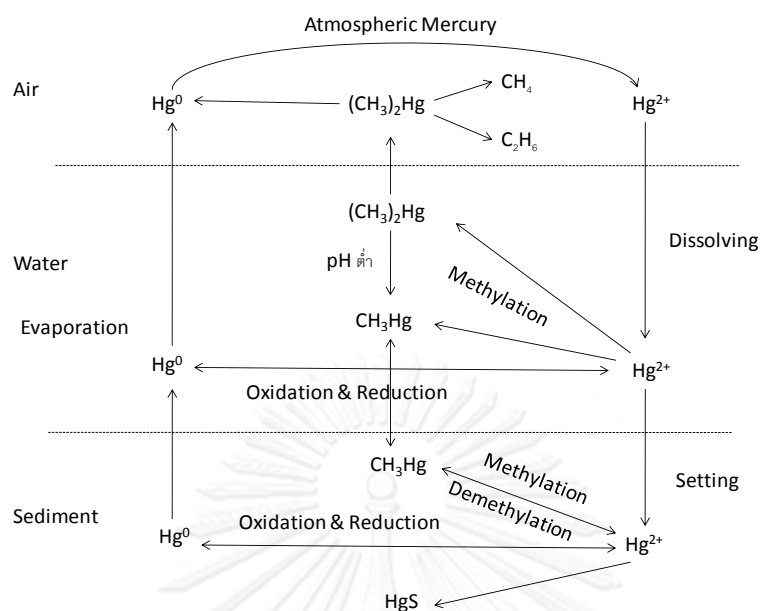
Volatile (V) คือ ปรอทที่ระเหยกลายเป็นไอได้ เช่น Hg^0 , $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$

Reactive (R) คือ ปรอทที่ละลายในน้ำหรือสารแขวนลอยซึ่งอยู่ในรูปที่พร้อมเกิดปฏิกิริยา เช่น HgX_2 , HgX_3^- , HgX_4^{2-} (โดยที่ $X = \text{OH}^-$, Cl^- หรือ Br^-), Hg^0 ในไอออน้ำแขวนลอย, Hg^{2+} ที่รวมตัวกับกรดอินทรีย์

Non-Reactive คือ ปรอทในรูปที่เสถียร (ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อ) เช่น CH_3Hg^+ , CH_3HgCl , CH_3HgOH และสารประกอบปรอทอินทรีย์อื่นๆ $\text{Hg}(\text{CN})_2$, HgS และ Hg^{2+} ที่จับกับหมู่ซัลเฟอร์

2.1.4 วัฏจักรของปรอท

เมื่อสารปรอทแพร่กระจายลงสู่สิ่งแวดล้อมในน้ำแล้ว บางส่วนเข้าไปติดอยู่ (adsorb) กับอินทรีย์วัตถุที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งสารแขวนลอยในน้ำเหล่านี้ทำหน้าที่คล้ายกับตัวกำจัดปรอทออกไปจากมวลน้ำ โดยการเหนี่ยวนำให้ปรอทไอออน เช่น Hg^{2+} มาเกาะติดกับสารแขวนลอยแล้วเกิดการตกตะกอนลงสู่พื้นแหล่งน้ำในเวลาต่อมา สารปรอทอินทรีย์ที่ตกตะกอนอยู่ในแหล่งน้ำสามารถเปลี่ยนเป็นสารปรอทอินทรีย์ในรูปของ Methylmercury (CH_3Hg^+) ได้โดยการทำงานของจุลินทรีย์ เช่น Methanogenic Bacteria ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของปรอทจากปรอทอินทรีย์กลายเป็นปรอทอินทรีย์จากกระบวนการนี้ว่า Methylation ซึ่งการเกิดกระบวนการ Methylation สามารถเกิดได้ทั้งในดิน น้ำจืด และน้ำทะเล ที่มี Reducing Bacteria ที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการ Methylation อาศัยอยู่ [38] การเปลี่ยนรูปของปรอทนี้ทำให้เกิดปรอทอินทรีย์ทั้งสองรูปแบบคือ Methylmercury และ Dimethylmercury ซึ่ง Methylmercury เป็นรูปของปรอทที่สามารถคงสภาพอยู่ในน้ำได้และสามารถสะสมในปลา สัตว์น้ำ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ในน้ำ แต่ Dimethylmercury เป็นรูปของปรอทที่มีความสามารถในการระเหยสูง ดังนั้นส่วนใหญ่จึงมีแนวโน้มที่จะระเหยจากแหล่งน้ำไป ปรอทที่อยู่ในน้ำอาจถูกขจัดออกจากน้ำได้โดยการระเหยเป็นไอในรูปของ Dimethylmercury ซึ่งกระจายในอากาศต่อไป แต่จะสลายตัวเมื่อถูกแสงอุลตราไวโอเล็ต บางส่วนที่เป็น Methylmercury จะตกลงมาและบางส่วนที่เป็นธาตุ Hg ก็จะตกลงมากับฝนเหมือนกันหรือถูกกระแสลมพัดพาไป [39]



รูปที่ 2.1 แสดงวัฏจักรทางชีวภาพของปรอทในสิ่งแวดล้อม [40]

2.1.5. การเข้าสู่ร่างกายของปรอทในสิ่งมีชีวิต [41]

ปรอทสามารถเปลี่ยนรูปและแพร่กระจายแฝงอยู่ได้ทั้งในดิน น้ำ และอากาศ และสามารถแทรกเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้หลักๆ 3 ทาง คือ

2.1.5.1 ทางการหายใจ ในสถานที่ที่มีปรอทปะปนอยู่ ปรอทจะอยู่ในลักษณะที่เป็นผงหรือไอระเหยปรอทของปรอทที่สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางหายใจผ่านทางจมูกและเข้าสู่ปอดได้ ถ้าปรอทส่วนใหญ่ตกค้างบริเวณจมูก ซึ่งส่งผลให้กระดูกอ่อนที่ทำหน้าที่กั้นระหว่างจมูกเกิดอันตรายและเสียหายได้ แต่ถ้าผ่านจมูกเข้าไปสู่ภายในจะถูกดูดซึมเข้ากระแสโลหิตและถูกส่งไปสะสมในส่วนต่างๆของร่างกายได้ โดยไอปรอทที่เข้าสู่ร่างกายในลักษณะนี้ถือว่ามีความเป็นอันตรายต่อชีวิตมากที่สุด

2.1.5.2 ทางปาก (รับประทาน) อาหารที่เรารับประทานและน้ำที่เราดื่มเข้าไปนั้นอาจมีการปนเปื้อนของปรอทได้ ทั้งนี้ปรอทมีหลายรูปสามารถปนเปื้อนอยู่ได้ทั้งในดิน น้ำ และอากาศ จึงมีโอกาสที่เข้าไปสู่ห่วงโซ่อาหารที่เรารับประทานเข้าไป เช่น น้ำทะเลมีปรอทปนเปื้อน เมื่อปลา รับประทานอาหารก็ได้รับปรอทจากอาหารที่กินเข้าไปและเมื่อคนกินปลาก็ได้รับปรอทไปสะสมได้เช่นกัน การรับประทานอาหารที่มีปรอทปนเปื้อนอยู่นั้นแม้ว่าเราจะนำไปผ่านความร้อนก่อนรับประทานก็ไม่สามารถทำให้ปริมาณของปรอทที่สะสมอยู่ในอาหารลดลงไป

2.1.5.3 ทางผิวหนัง เนื่องจากผงหรือไอระเหยของปรอทสามารถทำปฏิกิริยากับผิวหนังของเราได้ทำให้เกิดการระคายเคือง นอกจากนี้ยาฆ่าแมลงหรือสารต่างๆที่มีปรอทเป็นส่วนประกอบยังสามารถซึมผ่านทางผิวหนังและเข้าสู่กระแสโลหิตและสะสมอยู่ตามเนื้อเยื่อส่วนต่างๆได้

2.2 ข้อมูลของสารหนู

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารหนู

สารหนู (As) จัดเป็นโลหะที่เป็นของแข็งอยู่หมู่ 5A แถวที่ 4 ในตารางธาตุ สารหนูที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่มักพบในรูปของสารประกอบของซัลไฟด์ (S) กับโลหะต่างๆ เช่น ทอง ทองแดง เงิน และตะกั่ว หรืออาจพบในรูปสารประกอบออกไซด์ (O) สารหนูถูกจัดเป็นทั้งโลหะที่มีประจุได้หลายค่าคือ +3, +5, 0 และ -3 แต่ส่วนใหญ่จะพบในรูปอาร์เซไนต์ (Arsenite, As^{3+}) หรืออาร์เซเนต (Arsenate, As^{5+}) นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นๆตามตาราง 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2. 3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะของสารหนู [33]

คุณสมบัติ	ค่าที่ได้
มวลโมเลกุล	74.92
จุดเดือด, องศาเซลเซียส	> 100
จุดเยือกแข็ง, องศาเซลเซียส	35.5
ความหนาแน่น, กรัมต่อมิลลิลิตร	5.78
ค่าความจุความร้อน, วัตต์ต่อมิลลิเคลวิน	50.2
ค่าอุณหภูมิรวม 3 จุด, องศาเซลเซียส	817
ค่าอุณหภูมิการระเหิด, องศาเซลเซียส	614
อุณหภูมิวิกฤต, องศาเซลเซียส	1400
ค่าที่ทำให้เกิดเป็นไอออน, อิเล็กตรอนโวลต์	9.82
ค่าเอนทัลปีของจุดเยือกแข็ง, กิโลจูลต่อโมล	24.4

ตารางที่ 2. 4 แสดงคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของสารหนูในสถานะต่างๆที่อุณหภูมิ 25°C และความดัน 100 KPa [33]

คุณสมบัติ	ของแข็ง	ของเหลว	ก๊าซ
ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด, กิโลจูลต่อโมล	0.0	-	302.5
ค่าเอนโทรปีมาตรฐาน, จูลต่อโมลเคลวิน	35.1	-	174.2
ค่าความจุความร้อน, จูลต่อโมลเคลวิน	24.6	-	20.8

2.2.2 แหล่งที่มาของสารหนูในสิ่งแวดล้อม

1. จากแหล่งธรรมชาติ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการสีกกร่อนของพื้นผิวโลกหรือจากก๊าซของภูเขาไฟ ซึ่งสารหนูจะถูกพัดพาเข้าสู่สิ่งแวดล้อม มีการประมาณกันว่าสารหนูจากแหล่งธรรมชาติประมาณปีละ 72,000 ตันในรูปของอาร์เซนัสออกไซด์

2. จากกิจกรรมการเกษตร เป็นสารกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตร (pesticide) และการใช้ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต (superphosphate) ซึ่งในปุ๋ยประกอบด้วยสารหนูประมาณ 1% การใช้ยาฆ่าแมลงที่สำคัญคือ ตะกั่วอาร์เซเนตซึ่งทำให้สารหนูปนเปื้อนในดิน โดยเฉพาะดินที่ปลูกพืชผลเกษตร ซึ่งสารหนูบางส่วนจะถูกพืชดูดซับเข้าไป บางส่วนปนเปื้อนในน้ำใต้ดินและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่ได้รับการปนเปื้อนจากสารหนู

3. จากกิจกรรมด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ โรงงานฟอกหนังสัตว์ โรงงานถลุงโลหะ และโรงงานปุ๋ยไนโตรเจน เป็นต้น

2.2.3 รูปแบบของสารหนู

สารหนู (Arsenic, As) เป็นธาตุโลหะหนักชนิดหนึ่งที่พบอยู่ตามธรรมชาติได้หลายรูปแบบสามารถจำแนกได้เป็น [42-44]

- รูปโลหะ (Metallic Arsenic)
- รูปสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic Arsenic Compound)
- รูปสารประกอบอินทรีย์ (Organic Arsenic Compound)
- รูปก๊าซ (Arsine)

1. สารหนูในรูปโลหะ เกิดจากการหลอมตัวของหินที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบอยู่ เช่น อาร์เซโนไฟไรต์ (FeAsS) หรือโลลินไซด์ (FeAs_2) ที่อุณหภูมิสูงเกิดโลหะสารหนู (As_4) ที่เป็นของแข็งหรือผงไม่ละลายน้ำ มี 3 ชนิด คือเป็นของแข็งสีเทา ของแข็งสีเหลือง และเป็นสารหนูที่มีรูปผลึกไม่แน่นอนมีสีดำ

2. รูปสารประกอบอนินทรีย์ มีหลายรูปแบบ คือ

อาร์เซนิคไตรออกไซด์ (arsenic trioxide, As_2O_3) ได้จากการถลุงโลหะอาร์เซไนต์หรือแร่กำมะถัน หรือการถลุงแร่ทองแดงและตะกั่วที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบอยู่ เมื่อนำไปเผาจะได้ผงสีขาวซึ่งผงนั้นคือ อาร์เซนิคไตรออกไซด์ และเมื่อนำไปละลายน้ำจะได้กรดอาร์เซนัส (H_3AsO_3) นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ดีในกรดและเบส

อาร์เซนิคเพนทอกไซด์ (arsenic pentoxide, As_2O_5) เป็นสารที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของอาร์เซนิคไตรออกไซด์ (As_2O_3) กับกรดไนตริก (HNO_3) เมื่อนำสารละลายนี้ไประเหยแล้วนำส่วนที่เหลือจากการระเหยจะได้เป็นผลึกสีขาวของอาร์เซนิคเพนทอกไซด์ ละลายน้ำได้ดีกว่าอาร์เซนิคไตรออกไซด์เมื่อละลายจะได้กรดอาร์เซนิก (H_3AsO_4) และสามารถละลายได้ดีในแอลกอฮอล์

อาร์เซไนต์ (arsenite, MH_2AsO_3 , M_2HAsO_3 และ M_2AsO_3) เป็นสารหนูที่มีประจุ $3+$ ทำปฏิกิริยากับโลหะต่างๆ เมื่อ M คือไอออนของโลหะต่างๆ เกือบอาร์เซไนต์ที่สำคัญ ได้แก่ ตะกั่วอาร์เซไนต์ (Lead Arsenite, $\text{Pb}(\text{AsO}_4)_2$) และโซเดียมอาร์เซไนต์ (Sodium Arsenite, NaAsO_2) เป็นต้น

อาร์เซเนต (arsenates, $\text{M}_3(\text{AsO}_4)_2$) เป็นสารหนูที่มีประจุ $5+$ ที่ทำปฏิกิริยากับโลหะต่างๆ เกือบอาร์เซเนตที่สำคัญคือ แคลเซียมอาร์เซเนต (Calcium Arsenate, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$) และตะกั่วอาร์เซเนต (Lead Arsenate, PbHAsO_4)

อาร์เซนิกเฮไลด์ (halide of arsenic) สารหนูชนิดนี้มักไม่พบตามธรรมชาติ แต่พบในการวิเคราะห์ทางเคมี สารประกอบที่สำคัญ เช่น อาร์เซนิกคลอไรด์ (AsCl_3) อาร์เซนิกโบรมไนด์ (AsBr_3) และอาร์เซนิกฟลูออไรด์ (AsF_3)

3. รูปสารประกอบอินทรีย์ มักใช้เป็นยารักษาโรค เช่น กรดอาร์เซนิก (*p*-Arsenic Acid) ใช้เป็นยานอนหลับและคาร์บาโซน (Carbasone) เป็นยารักษาโรคเรื้อรัง

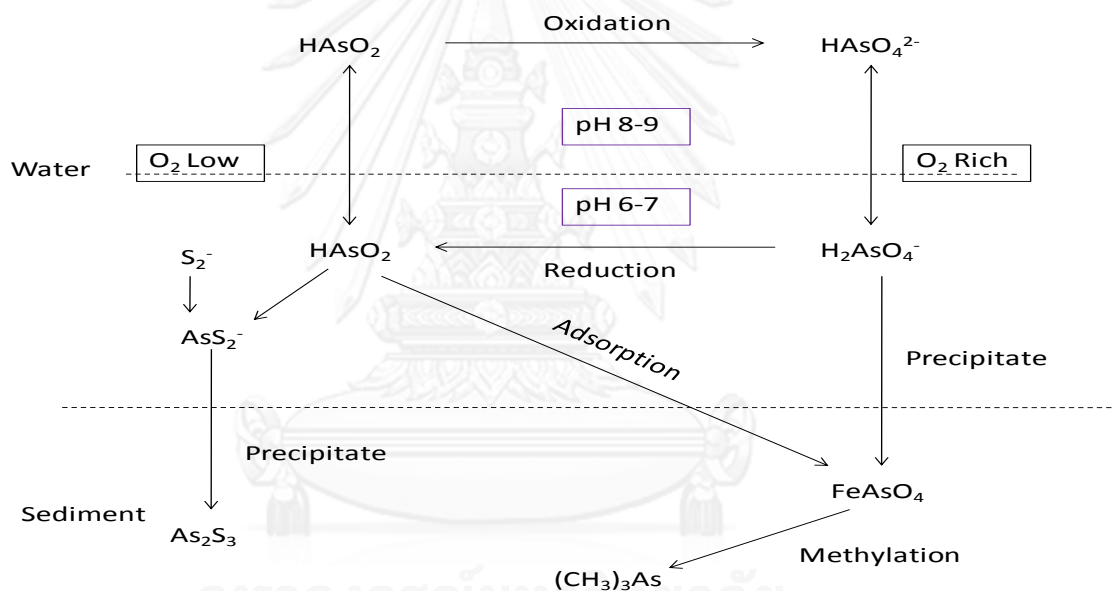
4. รูปของก๊าซ โดยอยู่ในรูปของก๊าซอาร์ซีน (Arsine or Arsenic Hydride, AsH_3) โดยก๊าซนี้เกิดเมื่อสารหนูทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยก๊าซนี้ ไม่มีสี และไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองแต่มีความเป็นพิษสูง

2.2.4 วัฏจักรของสารหนู

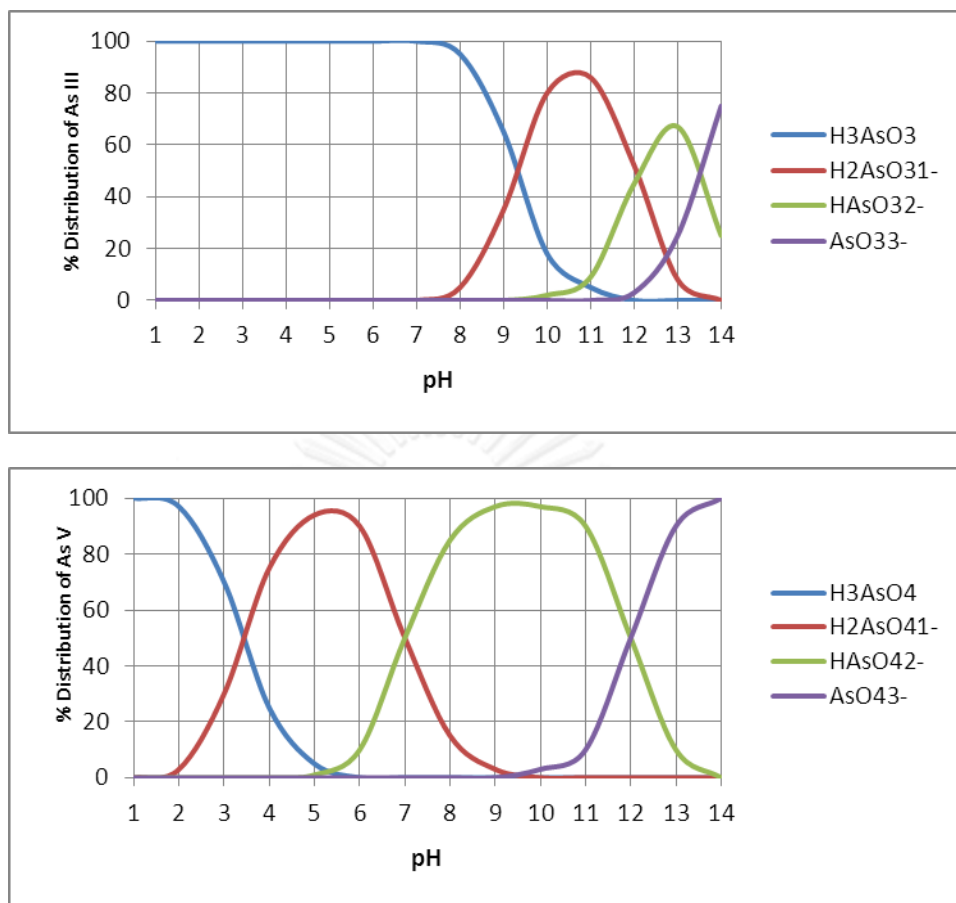
สารหนูที่พบตามแหล่งน้ำตามธรรมชาติส่วนใหญ่มักพบอยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ (As^{3+}) เช่น $\text{As}(\text{OH})_3$, $\text{As}(\text{OH})_4^-$ และ AsO_3^{3-} หรือไม่ก็อยู่ในรูปของอาร์เซเนต (As^{5+}) ได้แก่ AsO_4^{3-} , HAsO_4^{2-} และ H_2AsO_4^-

ในแหล่งน้ำที่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่มากจะพบสารหนูอยู่ในรูปสารประกอบอาร์เซเนต (As^{5+}) นอกจากนี้ถ้าค่าพีเอชของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 6 – 7 จะอยู่ในรูปของ H_2AsO_4^- และค่าพีเอชของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 8 – 9 จะอยู่ในรูปของ HAsO_4^{2-} ถ้าในน้ำมีตะกอนและความขุ่นมากจะสามารถทำให้สารประกอบอาร์เซเนตบางส่วนที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาจมลงสู่ชั้นน้ำที่ไม่มีออกซิเจนตั้งนั้นสารประกอบอาร์เซเนต (As^{5+}) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดเป็นสารประกอบอาร์เซไนต์ (As^{3+}) ถ้าในน้ำมีกำมะถันอยู่มากพอและมีค่าพีเอช และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล ที่เหมาะสม สารประกอบอาร์เซไนต์ (As^{3+}) จะทำปฏิกิริยากับกำมะถันเกิดตะกอนในรูปของ As_2S_3 ตกลงสู่ท้องน้ำ ได้ ส่วน H_2AsO_4^- และ HAsO_2 ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับกำมะถันจะเกิดการดูดติดกับผิวไอออนของเหล็กซึ่งจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเฟอร์รัสอาร์เซเนต (FeAsO_4) สำหรับในชั้นตะกอนของสิ่งมีชีวิต เช่น จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนสารหนูในรูปอนินทรีย์ (FeAsO_4) ให้เกิดเป็นสารหนูอินทรีย์ในรูปของสารประกอบของกรดไตรเมทิลอาร์เซนิก (CH_3)₃As โดยเกิดกระบวนการที่เรียกว่า Methylation ซึ่งเกิดเมื่อมีจุลินทรีย์และไม่มีออกซิเจนสำหรับลำดับการเกิดปฏิกิริยานี้ คือ เมื่อสารประกอบอาร์เซเนต (As^{5+}) ถูกออกซิไดส์เปลี่ยนเป็นสารประกอบอาร์เซไนต์ (As^{3+}) แล้วมีการเติมหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) สารหนูที่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์จะถูกแบคทีเรียออกซิไดส์และดึงหมู่เมทิลออก (Demethylation) ให้กลับไปอยู่ในรูปของสารประกอบ อนินทรีย์ได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

นอกจากนี้ยังพบว่าสารหนูตามธรรมชาติทั้งอาร์เซนไนต์ (As^{3+}) และ อาร์เซนเนต (As^{5+}) นั้นสามารถเปลี่ยนรูปแบบได้เมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนไป สารหนูเป็นสารที่มีความต่างจากสารอื่นคือ สามารถเปลี่ยนรูปไปตามค่าพีเอชของสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไปและทั้งอาร์เซนไนต์ (As^{3+}) และอาร์เซนเนต (As^{5+}) อาร์เซนไนต์ (As^{3+}) ตามธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูป H_3AsO_3 ในช่วงพีเอช 1 ถึง 7 เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ปริมาณของ H_3AsO_3 จะเริ่มลดลงเรื่อยๆจนถึงช่วงพีเอช 12 H_3AsO_3 จะหมดไปแต่ในขณะเดียวกันเมื่อพีเอช มากกว่า 7 จะมีสารหนูรูปอื่นๆเกิดขึ้น คือ $H_2AsO_3^-$, $HAsO_3^{2-}$ และ AsO_3^{3-} ตามลำดับของพีเอชที่สูงขึ้น ส่วนอาร์เซนเนต (As^{5+}) จะพบสารหนูกระจายตัวได้ 4 รูปแบบ คือ H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{3-} ตามลำดับซึ่งลักษณะการกระจายตัวคล้ายๆกับอาร์เซนไนต์ (As^{3+}) คือ ช่วงที่เป็นกรดพบ H_3AsO_4 มากที่สุดและปริมาณจะลดลงเรื่อยๆเมื่อพีเอชสูงขึ้นและในช่วงพีเอชสูงมากจะพบ AsO_4^{3-} ส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2. 2 แสดงวัฏจักรของสารหนูในสิ่งแวดล้อม [43]



รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายตัวของอาร์เซนิต์ และ อาร์เซเนตในช่วงพีเอชต่างๆ [43]

2.2.5. การเข้าสู่ร่างกายของสารหนูในสิ่งมีชีวิต

ความเป็นพิษของสารหนู อาร์เซนิต์มีความเป็นพิษมากกว่าอาร์เซเนตแต่ทั้งนี้การออกฤทธิ์ของพิษนั้นก็ขึ้นกับปริมาณที่รับเข้าไปด้วย โดยทั่วไปสารหนูสามารถแทรกเข้าสู่สิ่งมีชีวิต (มนุษย์) สามารถเข้าได้หลักๆ 3 ทาง คือ

- 2.2.5.1 ทางการหายใจ มักเป็นพวกอาซิน หรือไม้ก็พวกฝุ่น ควันที่มีสารหนูเจือปนอยู่
- 2.2.5.2 ทางปาก (รับประทาน) โดยผ่านทางกระดมน้ำและอาหาร
- 2.2.5.3 ทางผิวหนัง จะได้รับสัมผัสจากการทำงานที่มีสารหนูปะปนอยู่

2.3 วิธีการกำจัดปรอทและสารหนู

การกำจัดปรอทและสารหนูมีวิธีการทำได้หลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้กำจัดปรอทและสารหนูโดยทั่วไป (รวมทั้งโลหะอื่นก็ใช้วิธีการเดียวกันนี้) ที่นิยมใช้มี 4 วิธีคือ

2.3.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

กระบวนการนี้จะเป็นการกำจัดปรอทและสารหนูที่เป็นสารอนินทรีย์ด้วยการใช้เกลือของอะลูมิเนียมหรือเหล็กเช่น ปูนขาวหรือสารส้มเพื่อทำให้ปรอทและสารหนูเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคของสารประกอบของเกลือ (ปูนขาวหรือสารส้ม) เพื่อเกิดเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เมื่อทิ้งไว้คอลลอยด์ที่มีปรอทและสารหนูจะตกตะกอน โดยที่ตะกอนของปรอทและสารหนูเหล่านี้จะถูกแยกออกจากน้ำเพื่อนำไปกำจัดกากตะกอนต่อไป วิธีการนี้มีข้อดีในด้านของเทคโนโลยีที่รองรับมีอยู่ทั่วไปและราคาที่ไม่แพง แต่อย่างไรก็ตามอาจมีปัญหาในการกำจัดกากตะกอน [45] และนอกจากนี้การทำให้ปรอทและสารหนูตกตะกอนนั้นยังขึ้นกับชนิดของเกลือที่นำมาใช้และค่าของพีเอชของน้ำซึ่งสารแต่ละชนิดมีความต้องการที่ต่างกันคือ ค่าพีเอชที่เหมาะสมของสารส้มคือ 6.5-7.0 ประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 90% ขณะที่ปูนขาวมีค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 11.0-11.2 ประสิทธิภาพการกำจัด 80.2% และจากการศึกษาของ Irikayama [46] พบว่าการใช้สารเฟอริกคลอไรด์ที่ค่าพีเอช 10.3 มีประสิทธิภาพการกำจัดถึง 98%

2.3.2 กระบวนการออกซิเดชันและการกรอง

กระบวนการออกซิเดชันนี้มักใช้กับสารหนูโดยการออกซิไดส์ As^{3+} ให้เปลี่ยนเป็น As^{5+} (เพราะ As^{3+} มีความเป็นพิษสูงมากจึงเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ As^{5+} จะปลอดภัยกว่า) โดยสารเคมีที่ใช้ได้แก่ ก๊าซคลอรีน โอโซน สารประกอบไฮโปคลอไรต์ หรือสารประกอบเปอร์แมงกาเนต เป็นต้น ก๊าซคลอรีนและสารประกอบไฮโปคลอไรต์มีการใช้กันทั่วไปเนื่องจากใช้ง่ายและมีราคาถูก แต่จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำจะทำให้เกิดสารประกอบฮาโลมีเทน ซึ่งมีความเป็นพิษ เมื่อผ่านการออกซิไดส์แล้วจึงนำไปกรอง โดยการกรองนั้นจะกรองผ่านทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์

2.3.3 กระบวนการดูดซับ

การกำจัดปรอทและสารหนูโดยดูดซับด้วยแอคติเวตเต็ดอะลูมินา หรือแอคติเวตเต็ดคาร์บอน จะเป็นระบบขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีราคาแพงมาก และมีข้อเสียที่สำคัญคือ ตัวแอคติเวตเต็ดเมื่อใช้ไปนานๆประสิทธิภาพการดูดซับจะต่ำลงเรื่อยๆ จึงต้องนำไปฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ แต่การนำไปฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ในแต่ละครั้งทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารต่างๆ ลดลง ดังนั้นปัญหาคือการหาวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพและราคาที่เหมาะสม [47]

2.3.4 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีระบบที่มีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีราคาสูง เรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนนั้นถ้าเป็นไอออนประจุบวกสามารถดูดซับสารไอออนประจุลบของปรอทและสารหนูหรือไอออนประจุลบอื่นๆที่ปะปนอยู่ในน้ำได้จึงเป็นเหตุให้อายุการใช้งานและประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทและสารหนูน้อยลง วิธีการนี้ไม่เหมาะถ้าน้ำมีของแข็งปะปนอยู่และในกรณีของสารหนูต้องออกซิไดส์ As^{3+} ให้เปลี่ยนเป็น As^{5+} ก่อน ส่วนข้อดีคือไม่ต้องปรับค่าพีเอชของน้ำดิบและใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการชะล้างสารปนเปื้อนต่างๆออกจากคอลัมน์ได้

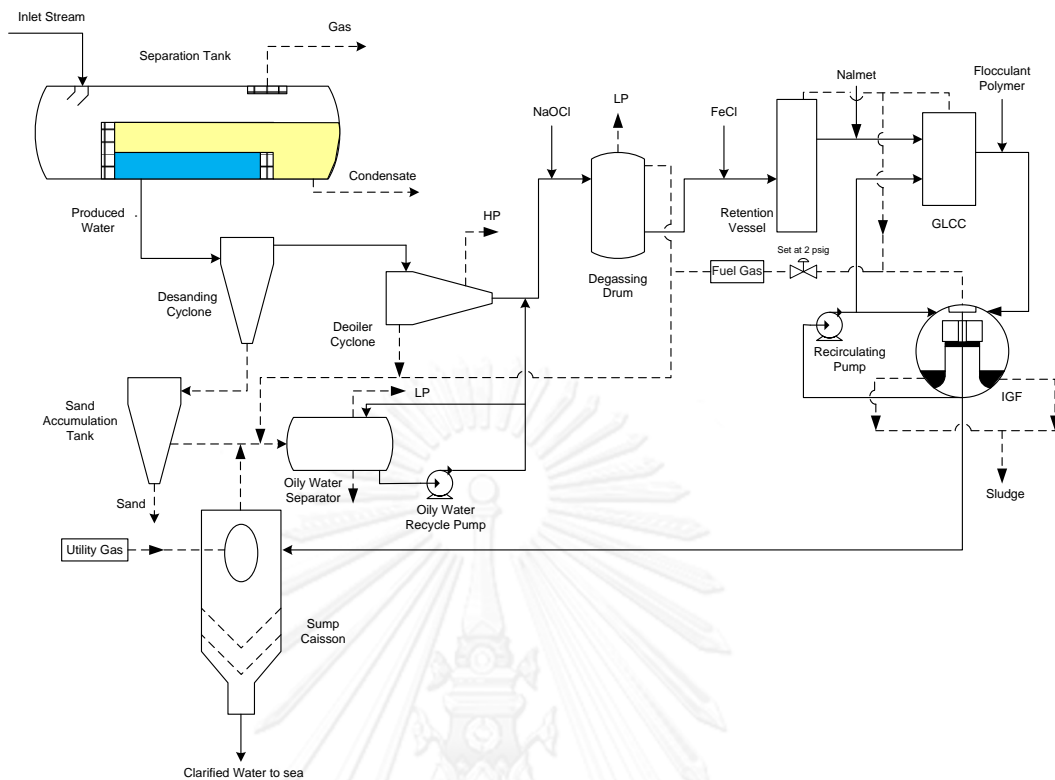
จากข้างต้นวิธีการกำจัดปรอทและสารหนูทั้ง 4 วิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังสรุปตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2. 5 แสดงข้อดีและข้อเสียของการกำจัดปรอทและสารหนูเมื่อเลือกใช้วิธีต่างๆ

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
โคแอกกูเลชัน	1 ราคาถูก 2 วิธีการทำงานง่าย	1 การกำจัดกากตะกอน 2 การปรับค่าพีเอชของน้ำ
ออกซิเดชันและการกรอง	1 ราคาถูก 2 สารเคมีที่ใช้หาง่าย	1 สารที่ใช้อันตราย 2 เกิดสารประกอบใหม่ที่มีพิษ
การดูดซับ	1 ประสิทธิภาพสูง 2 นำกลับมาใช้ใหม่ได้	1 ราคาแพงมาก 2 วัสดุดูดซับเสื่อมลงเรื่อยๆ
การแลกเปลี่ยนไอออน	1 ประสิทธิภาพสูง 2 ไม่ต้องปรับพีเอชของน้ำ	1 ราคาแพงมาก 2 เลือกจับเฉพาะประจุไม่ได้

2.4 กระบวนการกำจัดปรอทและสารหนูที่ใช้ในอุตสาหกรรม [5]

การกำจัดปรอทและสารหนูในอุตสาหกรรมนั้นมีหลากหลายรูปแบบและวิธีการที่ใช้ขึ้นกับงานในแต่ละสถานที่ ลักษณะของกระบวนการกำจัดปรอทและสารหนูที่ยกตัวอย่างนี้เป็นของ Unocal ซึ่งปัจจุบันได้โอนมาเป็น Chevron ซึ่งอยู่ในแท่นผลิตก๊าซของฐานการผลิตนอกชายฝั่ง โดยปกติของฐานการผลิตก๊าซนั้นจะมีการสูบก๊าซขึ้นมาจากแท่นหลุมผลิต (Wellhead Platform) เพื่อนำมาแยกที่ฐานการผลิตกลาง (Central Process Platform) แบ่งกระบวนการผลิตต่างๆเป็น 3 กระบวนการคือ กระบวนการก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas Process) กระบวนการผลิตคอนเดนเสท (Condensate Process) และกระบวนการกำจัดน้ำ (Water Process) เพราะในการสูบก๊าซขึ้นมาจากแท่นหลุมผลิต นอกจากก๊าซแล้วก็มีน้ำปะปนขึ้นมาด้วย ซึ่งโดยปกติ น้ำจะถูกปล่อยทิ้งลงทะเล แต่ในกรณีที่มีปรอทและสารหนูปะปนมากับน้ำในค่าความเข้มข้นที่สูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่อุตสาหกรรมกำหนดต้องมีการกำจัดปรอทและสารหนูก่อนที่ปล่อยน้ำลงสู่ทะเล โดยกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการข้างต้น สิ่งที่น่าสนใจและนำเสนอคือส่วนของการกำจัดปรอทและสารหนูออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซธรรมชาติ (Produced Water) ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการกำจัดปรอทและสารหนูออกจากน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิต [5]

จากรูป 2.4 เมื่อก๊าซและน้ำจากแท่นหลุมผลิตถูกนำขึ้นมาและส่งมาที่แท่นผลิตกลางแล้วจะถูกส่งเข้ามาที่ถังขนาดใหญ่ที่วางไว้ในแนวนอนเพื่อทำหน้าที่แยกเฟส (Separation Tank หรือ Inlet Separator) ถังนี้ทำหน้าที่แยก 3 เฟสคือ ก๊าซ (Gas) คอนเดนเสท (Condensate) และน้ำ (Produced Water) โดยที่ก๊าซออกด้านบน คอนเดนเสทและน้ำออกด้านล่างในแต่ละส่วนกัน งานวิจัยนี้สนใจเฉพาะส่วนของน้ำที่จะนำไปกำจัดปรอทและสารหนู (Water Treatment Process) เท่านั้น ในส่วนของน้ำ (Produced Water) ที่มาจากถังแยกเฟสแล้วเข้าสู่ Desanding Cyclone ซึ่งทำหน้าที่แยกสิ่งเจือปนที่มากับน้ำ (อาศัยการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อนำสิ่งที่หนักกว่าน้ำตกลงสู่ด้านล่าง) โดยที่น้ำ (และน้ำมัน) ถูกส่งไปยัง Deoiling Cyclone ที่จุดนี้ยังอาศัยการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแต่ต่างกันว่าน้ำที่มีน้ำหนักมากกว่าตกลงด้านล่าง ส่วนคอนเดนเสทที่เบากว่าจะออกไปด้านข้าง คอนเดนเสทนำเอาไปแยกน้ำอีกครั้งด้วยที่ Oil Water Separator จากนั้นน้ำที่ได้จาก Deoiling Cyclone และ Oil Water Separator ถูกส่งเข้าสู่ Degassing Drum ก่อนที่น้ำเข้า Degassing Drum จะมีการเติมโซเดียมไฮเปอร์คลอไรด์ (NaOCl) เพื่อบำบัดน้ำนอกจากนี้โซเดียมไฮเปอร์คลอไรด์ยังทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์เพื่อเปลี่ยน As^{3+} ให้เปลี่ยนเป็น As^{5+} ก่อนที่เข้าสู่ Degassing Drum จะมีกระบวนการการแยกก๊าซที่ปนมากับน้ำและใช้ Fuel Gas ดันก๊าซออก Flare

เมื่อน้ำออกจาก Degassing Drum จะเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) และไหลเข้าสู่ Retention Vessel ในขั้นตอนนี้เมื่อ FeCl_3 สัมผัสกับน้ำ (Produced Water) เพื่อให้เกิดเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ โดยสารตัวนี้มีลักษณะเป็นตะกอนที่จะไปเกิดปฏิกิริยากับปรอทและสารหนูที่ทำให้ปรอทและสารหนูอยู่ในลักษณะของตะกอน เมื่อน้ำออกจาก Retention Vessel จะเติม Nalmet ก่อนไหลเข้าสู่ GLCC เมื่อน้ำออกจาก GLCC ก็เติม Flocculant Polymer ซึ่งขณะนี้มีน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกับตะกอนเบาที่มีปรอทและสารหนูปนอยู่ภายในก่อนที่จะไหลเข้าสู่ IGF (Induced Gas Floatation Unit) ที่ตัว IGF จะมีใบพัดเพื่อปาดเอาส่วนที่เป็นตะกอนเบาออกแล้วนำน้ำที่บำบัดได้ปล่อยลงสู่ทะเลที่ Sump Caisson

2.5 เยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane) [48, 49]

กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane) ถูกพัฒนามาจากกระบวนการแยกเยื่อแผ่น (Membrane) ซึ่งในปัจจุบันเริ่มมีบทบาท ความสำคัญ และเริ่มมีผู้นำมาใช้ในกระบวนการแยกเพิ่มมากขึ้น เพราะเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวและไม่มีรูพรุน เยื่อแผ่นเหลวนั้นประกอบด้วยวัฏภาคที่สำคัญอยู่ 3 วัฏภาค คือ

1. วัฏภาคสารละลายป้อน (Feed Phase) ซึ่งมีองค์ประกอบของไอออนที่ต้องการสกัดปนอยู่ด้วย ในสารละลายป้อนนี้อาจเป็นสารที่ละลายในน้ำ (สารอินทรีย์) หรือสารที่ละลายในน้ำมัน (สารอินทรีย์) ก็ได้

2. วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Phase) ประกอบไปด้วยสารสกัด หรือสารสกัดที่ละลายอยู่ในตัวทำละลาย เยื่อแผ่นเหลวอยู่กั้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ และทำหน้าที่เป็นตัวเลือกผ่านไอออนที่ต้องการเท่านั้น ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวนี้อาจเป็นสารที่ละลายในน้ำหรือน้ำมันจะขึ้นอยู่กับสารละลายป้อนกล่าวคือ ถ้าสารละลายป้อนเป็นสารที่ละลายในน้ำ ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวนี้อาจต้องเป็นสารที่ละลายในน้ำมันนอกจากนี้วัสดุที่นำมาใช้ทำเส้นใยกลางต้องเป็นสารที่เข้ากันได้กับน้ำมันหรือเป็นสารพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น พอลิเอทิลีน, พอลิฟอสฟีน เป็นต้น นอกจากนี้สารสกัดและตัวทำละลายนั้นต้องละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันและควรมีคุณสมบัติต่างๆดังตารางที่ 2.6

3. วัฏภาคสารละลายนำกลับ (Stripping Phase) เป็นวัฏภาคสารละลายที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับไอออนที่ต้องการแยกที่ถ่ายเทมาจากวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ในวัฏภาคสารละลายนำกลับนี้สารที่ใช่ต้องเป็นสารที่ละลายในสถานะเดียวกันกับสารละลายป้อนและตรงกันข้ามกับเยื่อแผ่นเหลว

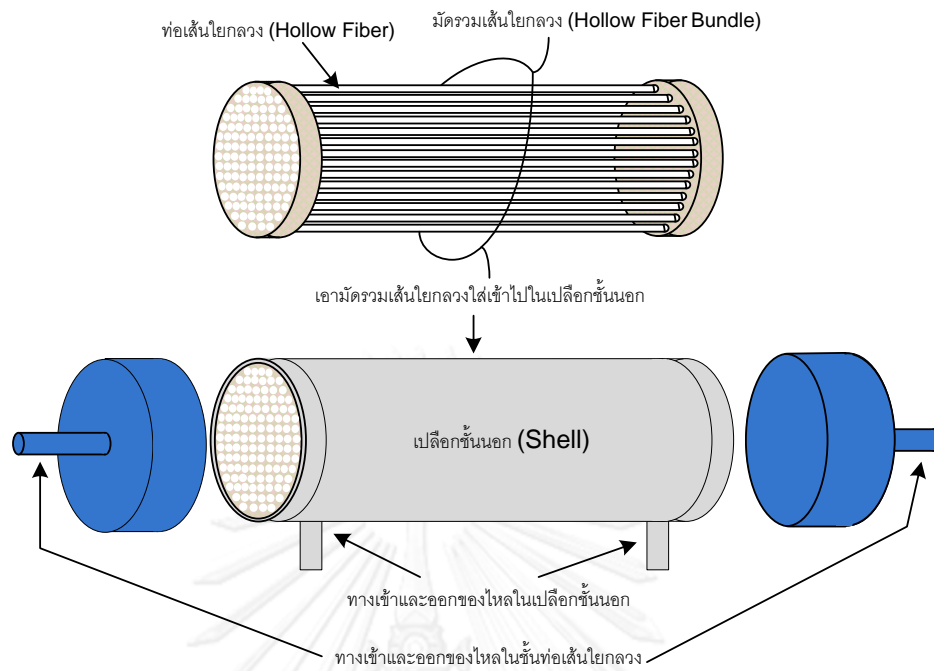
ตารางที่ 2. 6 แสดงคุณสมบัติในอุดมคติของสารสกัดและตัวทำละลาย

คุณสมบัติที่ดีของสารสกัด	คุณสมบัติที่ดีของตัวทำละลาย
1. สามารถสกัดไอออนในสภาวะกรดต่างๆ ได้	1. ละลายในสารละลายบัฟเฟอร์และสารละลายนำกลับได้ต่ำ
2. เลือกทำปฏิกิริยาเฉพาะกับไอออนที่ต้องการ	2. แยกจากเฟสตรงกันข้ามได้ง่าย
3. สามารถสกัดและนำกลับได้ดี	3. มีความหนืดปานกลาง
4. ละลายในตัวทำละลายได้ดี	4. มีความคงตัวเมื่อผสมกับสารสกัด
5. มีความเสถียรตลอดการดำเนินงาน	5. มีจุดวาบไฟสูงไฟ ไม่ระเหยง่าย ไม่เป็นพิษ
6. มีความจุไอออนได้มาก	6. ราคาถูก หาซื้อง่าย
7. ไม่ติดไฟ ไม่ระเหยง่าย ไม่เป็นพิษ	

2.6 โมดูลเส้นใยกลวง (Hollow Fiber modules) [48]

โมดูลเส้นใยกลวงเป็นงานที่ถูกพัฒนามาจากงานเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) ที่มีอยู่หลากหลายรูปแบบ เช่น เยื่อเลือกผ่านแบบแผ่น (Flat sheet) แบบท่อ (Tubular) และแบบแผ่นม้วน (Spiral Wound) โมดูลลักษณะนี้มีจุดเด่นอยู่ที่มีพื้นที่การถ่ายเทมวลที่สูงกว่ารูปแบบอื่นๆ โมดูลเส้นใยกลวงนี้มีลักษณะเป็นท่อเส้นใยกลวงขนาดเล็กจำนวนมากเรียงในแนวขนานกัน (Hollow Fiber) หลายหมื่นท่อมัดรวมกัน (Hollow Fiber Bundle) และยึดติดหัวท้ายด้วยซิลิโคน จากนั้นนำบรรจุลงในเปลือกชั้นนอก (Shell) ดังรูปที่ 2.5

นอกจากนี้วัสดุที่นำมาเส้นใยกลวงมีอยู่หลายชนิดส่วนมากขึ้นกับการนำไปใช้งาน เช่น ความยืดหยุ่นของวัสดุ ความทนทานต่อความร้อน ความดัน กรด เบส ทั้งนี้ยังรวมถึงความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ที่ต้องตระหนักเป็นอย่างมากเพราะการจะให้สารสกัดตั้งอยู่ในรูพรุนได้ วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยกลวงต้องดูดซับสารสกัดไว้ในรูพรุนได้ (ส่วนหนึ่งความหนืดของสารสกัดก็มีผลกับการถูกตรึงอยู่ในรูพรุนเช่นกัน) นอกจากนี้วัสดุชนิดนี้ต้องไม่ยอมให้สารละลายบัฟเฟอร์ที่ถูกรวบรวมเข้ามาภายในของรูพรุนเส้นใยกลวง (ผนังของเส้นใยกลวงทั้ง 2 ฝั่งต้องไม่เปื่อยด้วยสารละลายบัฟเฟอร์และสารละลายนำกลับ) ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยกลวงดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2. 5 แสดงลักษณะและส่วนประกอบของโมดูลเส้นใยกลวง

Hydrophilic
กลุ่มวัสดุที่ชอบน้ำ

CA

PAN, PES, PS, PVDF

Hydrophobic
กลุ่มวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ

PE, PP



รูปที่ 2. 6 แสดงชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยกลวงแบบที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (CA = Cellulose Acetate, PAN = Polyacrylonitrile, PES = Polyethersulfone, PS = Polysulfone, PVDF = Polyvinylidene fluoride, PE = Polyethylene, PP = Polypropylene)

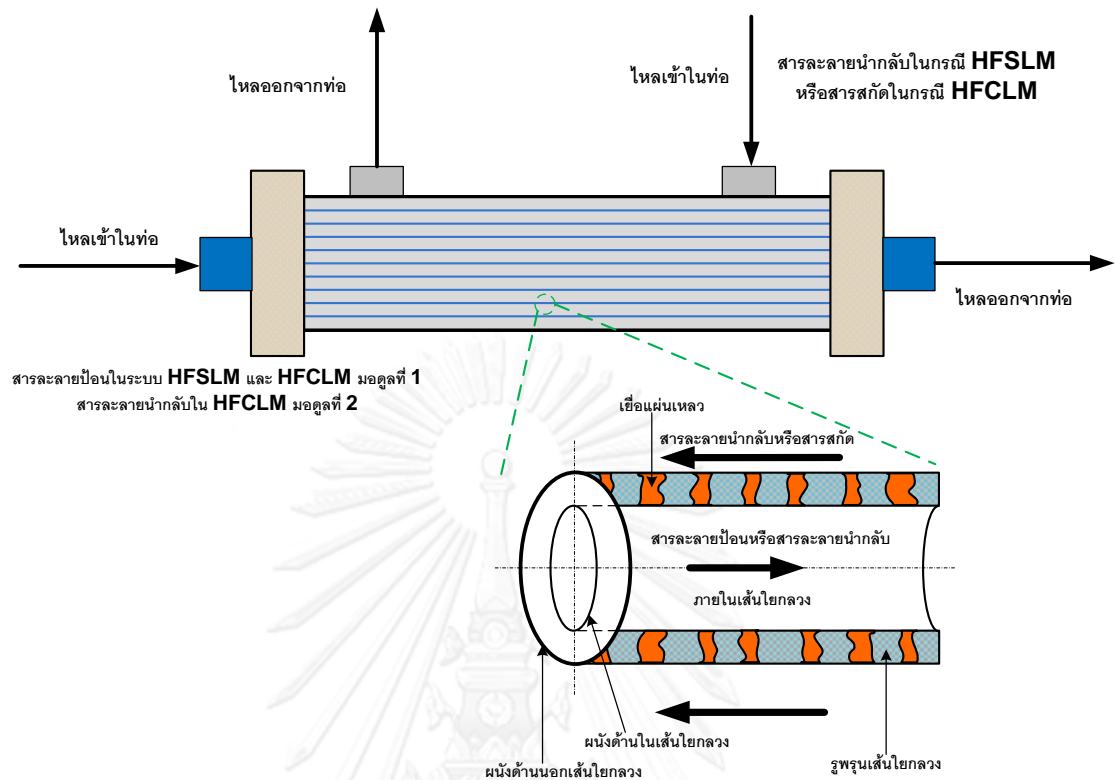
โมดูลเส้นใยกลวงนั้นมีวิธีที่สามารถนำมาใช้ได้หลากหลายรูปแบบ ในงานวิจัยนี้นำเสนอและเปรียบเทียบรูปแบบการใช้ไว้ 2 ระบบ คือ ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane, HFSLM) และระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow Fiber Contractor Liquid Membrane, HFCLM) ทั้ง 2 รูปแบบเป็นเยื่อแผ่นเหลวเหมือนกัน แต่ต่างกันที่ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจัดเป็นเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัว

รองรับหรือสารสกัดถูกตรึงอยู่ภายในรูพรุนทั้งหมดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และใช้โมดูลเพียงโมดูลเดียว แต่ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสเป็นเยื่อแผ่นเหลวแบบไม่มีตัวรองรับ สารสกัดถูกตรึงอยู่ภายในรูพรุนอยู่ส่วนหนึ่งแต่มีสารสกัดอีกส่วนที่อยู่นอกรูพรุนซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้และเป็นส่วนที่เชื่อมที่แลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง 2 โมดูล

2.6.1 การสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane, HFSLM)

ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะมีการนำโมดูลเส้นใยกลวงที่ใช้งานโดยฝังสารสกัดไว้ภายในรูพรุนของเส้นใยกลวงแล้วให้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลอยู่ที่ผนังทั้ง 2 ด้านของรูพรุน ทำให้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเพียงโมดูลเดียวที่สามารถทำการสกัดและนำกลับได้พร้อมกัน ลักษณะของระบบนี้คือ สารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนโลหะที่ต้องการแยกละลายอยู่ ไหลไปสัมผัสกับสารสกัดที่บริเวณผนังด้านในของรูพรุนทำให้เกิดการสกัด ไอออนโลหะและไอออนโลหะจะแพร่ผ่านสารสกัดไปฝั่งตรงข้ามเพื่อสัมผัสกับสารละลายนำกลับที่ผนังด้านนอกจะเกิดการนำกลับ โมดูลเส้นใยกลวงนี้ของไหลสามารถวิ่งเข้าออกได้ 2 ทาง คือ ทางฝั่งท่อ (ด้านในของท่อ) และทางฝั่งเปลือก (ด้านนอกของท่อ) ขณะที่เส้นใยกลวงแต่ละเส้นนั้นมีรูพรุน (Pore) ขนาดเล็กที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างด้านในและด้านนอกของท่อซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลสาร (Mass Transfer) ที่บริเวณผนัง (ด้านในและด้านนอก) ของเส้นใยกลวง

ในการดำเนินการให้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลอยู่ภายในโมดูลเส้นใยกลวงสามารถทำได้ทั้งให้สารละลายป้อนไหลอยู่ในฝั่งท่อ (tube side) แล้วให้สารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือก (shell side) ดังรูปที่ 2.7 หรือให้สารละลายป้อนไหลอยู่ในฝั่งเปลือก (shell side) แล้วให้สารละลายนำกลับไหลในฝั่งท่อ (tube side) และทิศทางการไหลเป็นการไหลแบบทิศทางเดียวหรือเป็นแบบสวนทางกันก็ได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบ

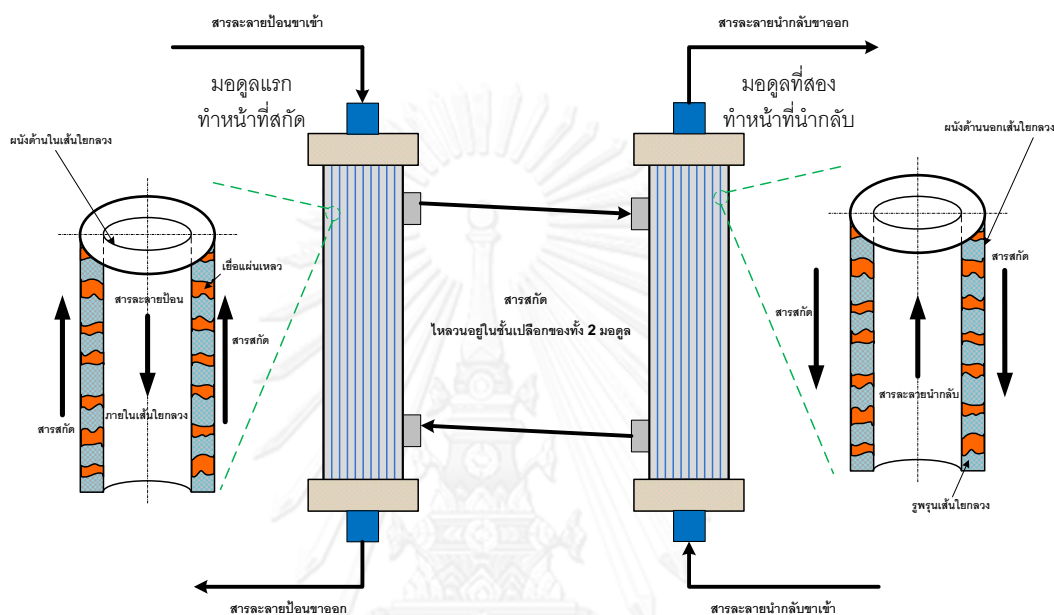


รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับบนเส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง [50] และการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อน สารละลายนำกลับ และสารสกัดทั้ง 2 โมดูลในระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

2.6.2 การสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow Fiber Contractor Liquid Membrane, HFCLM)

ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสจะใช้โมดูลเส้นใยกลวงจำนวน 2 โมดูลโดยโมดูลแรกทำหน้าที่เป็นหน่วยสกัดโดยส่วนที่อยู่ในท่อเป็นสายละลายป้อนหรือสารละลายนำกลับไหลอยู่ (แยกกันชนิดละโมดูล) ส่วนในชั้นเปลือกนั้นเป็นสารอินทรีย์ไหลวนเชื่อมกันอยู่ระหว่าง 2 โมดูลลักษณะของระบบนี้เหมือนกับระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงตรงส่วนของการสกัดแต่ไอออนของโลหะที่ถูกสกัดจะแพร่ผ่านจากผนังด้านในไปผนังด้านนอกจนออกจากโมดูลแรกที่ทำหน้าสกัดไปรวมกับสารสกัดอื่น ๆ ด้านนอกแล้ววนไปเข้าที่ผนังด้านนอกของโมดูลที่ 2 ที่ทำหน้าที่นำกลับแพร่ผ่านไปถึงผนังด้านในและเกิดการนำกลับกับสารละลายนำกลับ ส่วนสารสกัดจะไหลวนเข้าอยู่

ระหว่าง 2 โมดูลไปเรื่อยๆ ระบบนี้มีข้อดีตรงที่ถ้าสารสกัด (สารอินทรีย์) ที่ฝังตัวอยู่ในรูปพหุผลหลุดไปก็มีสารอินทรีย์ที่ไหลวนอยู่ด้านนอกเข้ามาทดแทนได้เรื่อยๆทำให้การสกัดไม่เสียประสิทธิภาพไป ลักษณะการไหลของ 2 โมดูลแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2. 8 แสดงลักษณะการไหลของทั้ง 2 โมดูล ทิศทางการไหลของสารละลายป้อน สารละลายนำกลับ และสารอินทรีย์

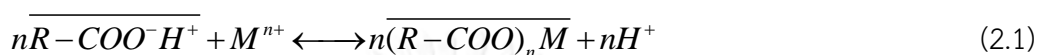
2.7 สารสกัด

สารสกัดที่นำมาใช้กับกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวนั้นสามารถแบ่งได้หลายรูปแบบส่วนใหญ่มักแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันของสารสกัดที่พร้อมทำปฏิกิริยาหรือตามลักษณะไอออนของสารละลายป้อนที่เกิดปฏิกิริยา คือ สารสกัดชนิดกรด, สารสกัดชนิดกลาง และสารสกัดชนิดเบส แต่สารสกัดชนิดกรดสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือสารสกัดชนิดกรด และสารสกัดชนิดคีเลต

2.7.1 สารสกัดชนิดกรด

สารสกัดชนิดกรดสารสกัดมีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดคาร์บอกซิลิก ($-\text{COO}^- \text{H}^+$) หรือกรดฟอสฟอริก ($=\text{POO}^- \text{H}^+$) เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเนียมไอออน (H^+) จะแตกตัวออกไปทำให้ประจุรวมของสารสกัดเป็นประจุลบ ดังนั้นหมู่ของไอออนโลหะที่เกิดปฏิกิริยาด้วยจึงเป็นโลหะที่มีประจุบวก เช่น Zn^{2+} ,

Cu^{2+} , Pd^{2+} ฯลฯ ปฏิกิริยาชนิดนี้ไอออนโลหะจะเข้าไปแทนที่ไฮโดรเนียมไอออนที่หลุดออกมา เมื่อเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์จะได้สารประกอบชนิดใหม่ที่มีโลหะอยู่ภายในสารสกัดที่มีประจุเป็นกลาง ดังสมการ 2.1 และสารสกัดจะปล่อยไฮโดรเนียมไอออนออกมาที่ฝั่งสารละลายป้อนทำให้เมื่อใช้สารสกัดชนิดกรดเมื่อเวลาผ่านไปนานพีเอชของสารละลายป้อนมีสิทธิ์ที่จะลดลง



สารสกัดชนิดกรดที่นิยมใช้ เช่น D2EHPA (Di-2-Ethylhexyl Phosphoric Acid), Cyanex 272 (Di-2,4,4-Trimethylpentyl Phosphinic Acid), Cyanex 301 (Di-2,4,4-Trimethylpentyl Dithiophosphinic Acid) เป็นต้น

2.7.2 สารสกัดชนิดคีเลต

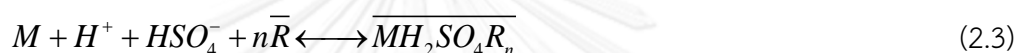
สารสกัดชนิดคีเลตเหมือนกับสารสกัดชนิดกรดในแง่ของหมู่ฟังก์ชันของสารสกัดที่แตกตัวให้ประจุเป็นลบและไอออนที่ต้องการสกัดมีประจุเป็นบวก แต่ต่างกับสารสกัดชนิดกรดที่รูปแบบของการเกิดปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดคีเลตสามารถเกิดพันธะกับไอออนโลหะที่ต้องการได้มากกว่า 1 พันธะ จึงทำให้สารประกอบชนิดใหม่ที่มีโลหะอยู่ภายในมีความความเสถียรมากกว่าสารสกัดชนิดกรดและใช้ปริมาณของสารสกัดน้อยกว่าสารสกัดชนิดกรด (จำนวนโมลที่เกิดปฏิกิริยาในกรณีที่โลหะมีประจุมากกว่า 1 การเกิดปฏิกิริยาแบบนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาแบบคีเลชัน ตามสมการ 2.2



สารสกัดชนิดคีเลตที่นิยมใช้ เช่น LIX 84I (2-Hydroxy-5-Nonylaceto-phenone Oxime)

2.7.3 สารสกัดชนิดกลาง

สารสกัดชนิดกลางหรือสารสกัดชนิดซอลเวทเป็นสารสกัดที่มีเฉพาะดอนเนอร์กรุ๊ปจึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ฉะนั้นสารสกัดชนิดนี้จะจับกับไอออนโลหะที่ไม่มีประจุและเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่ไม่มีประจุ ความสามารถของสารสกัดนี้ขึ้นกับการเกิดปฏิกิริยาซึ่งจำเป็นต้องอาศัยกรดเป็นสารสกัดร่วมในการเกิดปฏิกิริยาด้วย โดยทั่วไปความเข้มข้นของกรดที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการสกัดสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้สารสกัดชนิดนี้ยังสามารถสกัดไอออนโลหะที่มีประจุลบได้แต่สกัดได้ไม่ดีเท่าไอออนโลหะที่ไม่มีประจุ การเกิดปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดกลางเป็นไปตามสมการ 2.3



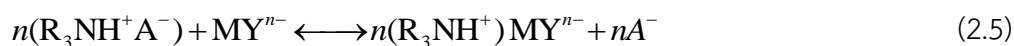
สารสกัดชนิดกลางที่นิยมใช้ในการวิจัย เช่น Cyanex 923 (Tri-Octylphosphine Oxide), Cyanex 471 (Tri-Isobutylphosphine Sulphide), TBP (Tri-Butyl-Phosphate) เป็นต้น

2.7.4. สารสกัดชนิดเบส

สารสกัดชนิดเบสส่วนใหญ่จะใช้เป็นหมู่ของเอมีนที่เป็นอนุพันธ์ของแอมโมเนีย สารสกัดชนิดเบสที่ใช้เชิงพาณิชย์เช่น พวแกมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium halides) ทั้งนี้มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary, RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary, R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary, R_3N) และชนิดจตุภูมิ (Quaternary, R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดจำพวกเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของสารประกอบไอออนโลหะที่อยู่ในรูปประจุลบ ในสารละลายป้อน กรณีของสารสกัดชนิดตติยภูมินั้นเพื่อให้การแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนโลหะเกิดขึ้นเอมีน (R_3N) ต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมโดยการทำปฏิกิริยากับกรด (HA) ดังสมการที่ 2.4



จากสมการที่ 2.4 เอมีนรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว ($R_3NH^+ A^-$) ในสารสกัดเมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ (MY^n) เกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการที่ 2.5



ตัวอย่างการใช้สารสกัดชนิดตติยภูมิ เช่น Trioctylamine (TOA, R_3N) สกัดไอออนปรอทที่อยู่ในรูป HgCl_2 เพื่อให้สารสกัด R_3N สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนปรอทได้ดีก่อนอื่นต้องเปลี่ยน HgCl_2 ให้อยู่ในรูปของ HgCl_4^{2-} โดยการเติมกรด HCl ดังปฏิกิริยาในสมการที่ 2.6



เมื่อ R_3N สัมผัสกับ HCl ที่สารละลายป้อน R_3N จะถูก protonate เป็น $\text{R}_3\text{NH}^+\text{Cl}^-$ ซึ่งอยู่ในรูปที่ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.7 จากนั้น HgCl_4^{2-} จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับ $\text{R}_3\text{NH}^+\text{Cl}^-$ ซึ่งเป็นสารสกัด ดังสมการที่ 2.8



สำหรับสารสกัดชนิดจตุภูมิเช่น Trioctylmethylammonium Chloride (Aliquat 336, $(\text{R}_3\text{N}^+\text{CH}_3)\text{Cl}^-$) สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นประจุลบได้โดยไม่ต้องมีกรดเข้าร่วมปฏิกิริยาการสกัด ดังแสดงสมการที่ 2.9



2.8 กลไกการถ่ายเทมวล

ในระบบของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้นถูกสร้างให้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับแยกออกจากกันเยื่อแผ่นเหลวที่มีสารสกัดอยู่ภายในรูพรุนของเส้นใยกลวงการที่ไอออนของโลหะจะผ่านสารละลายป้อนไปยังสารละลายนำกลับได้ ไอออนโลหะที่สารละลายป้อนต้องทำปฏิกิริยากับสารสกัดแล้วอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนก่อนจึงแพร่ผ่านสารสกัดไปได้แล้วจึงเกิดปฏิกิริยาอีกครั้งที่ฝั่งสารละลายนำกลับโดยที่สารสกัดก็กลับไปเยื่อแผ่นเหลวแล้วไอออนโลหะก็ผ่านไปฝั่งสารละลายนำกลับได้ ซึ่งปรากฏการณ์ของกลไกการถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ และการถ่ายเทมวลโดยอาศัยตัวนำพา

2.8.1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ (Diffusion Transport)

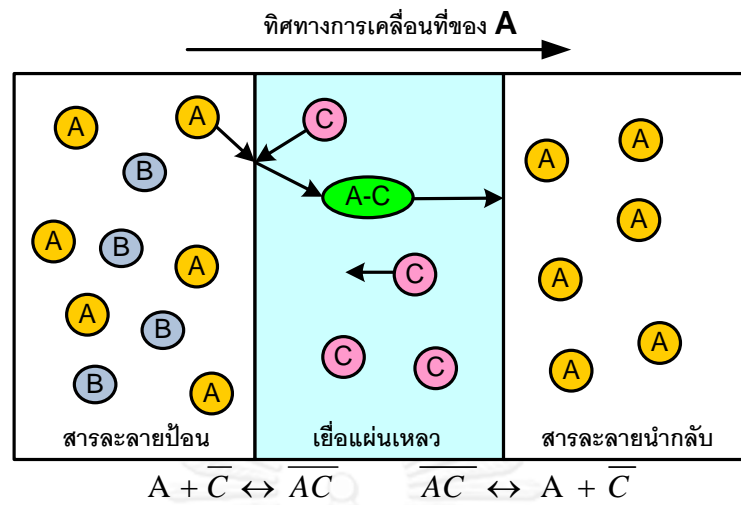
การถ่ายเทมวลแบบนี้ต้องไม่มีปฏิกิริยาการสกัดเกิดขึ้น การถ่ายเทมวลเกิดเมื่อไอออนโลหะจากสารละลายป้อนสัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวแล้วเกิดการแพร่ผ่านรูพรุนของเส้นใยกลวงไปยังสารละลายนำกลับ การถ่ายเทมวลในลักษณะนี้จะอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายทั้ง 2 ฝั่งเป็นแรงที่ผลักดันให้เกิดการแพร่

2.8.2 การถ่ายเทมวลแบบอาศัยตัวนำพา (Facilitated Transport)

การถ่ายเทมวลแบบนี้เกิดเมื่อมีตัวพา ตัวพาในที่นี้คือสารสกัดที่ทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนตัวใหม่ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนนี้จะผ่านเยื่อแผ่นเหลว หรือจะต้องเกิดปฏิกิริยาการสกัดก่อนจึงเกิดการนำพาจากสารละลายป้อนไปยังสารละลายนำกลับ การถ่ายเทมวลชนิดนี้แยกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. การถ่ายเทมวลอย่างง่าย (Simple Facilitated Transport)

เกิดขึ้นเมื่อมีแต่สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะกับสารสกัดเคลื่อนที่จากสารละลายป้อนสู่สารละลายนำกลับเท่านั้นไม่มีที่องค์ประกอบของไฮโดรเนียมไอออน (H^+) เคลื่อนที่ตามด้วยรูปแบบของการสกัดชนิดนี้ เมื่อ A คือ ไอออนต้องการสกัด, B คือ ไอออนอื่นๆที่ปนอยู่ในสารละลายป้อนอื่นๆ C คือ สารสกัด เมื่อสารสกัด (C) เกิดปฏิกิริยากับสารที่ต้องการ (A) เท่านั้นแล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ (AC) แล้วจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว ไปฝั่งสารละลายนำกลับแล้วปล่อยสารสกัด (C) กลับมาที่เยื่อแผ่นเหลว ส่วนสารที่ต้องการ (A) จะมาอยู่ที่สารละลายนำกลับดังรูปที่ 2.9



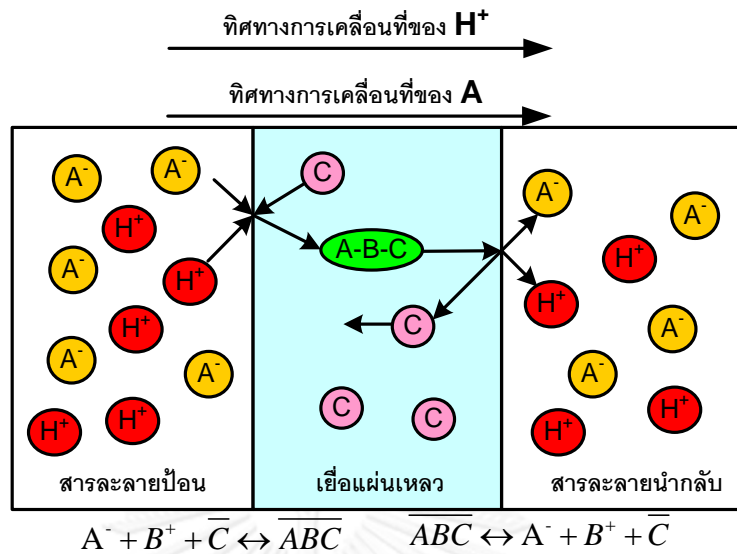
รูปที่ 2. 9 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลอย่างง่าย

2. การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (Coupled Facilitated Transport)

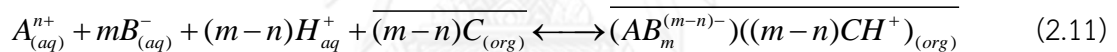
การถ่ายเทมวลแบบนี้ต้องมีไอออน 2 ชนิดถูกถ่ายเทพร้อมๆกันคือ ไอออนของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะและไฮโดรเนียมไอออน การถ่ายเทมวลแบบนี้เกิดเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการสกัดเป็นไอออน ซึ่งวิธีการนี้แรงที่ขับเคลื่อนขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของไอออนร่วมในสารละลายป้อน ซึ่งเราสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

(1) การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ในทิศทางเดียวกัน (Coupled Facilitated Co-Transport)

เมื่อ A คือ ไอออนที่ต้องการสกัด, B คือ ไอออนร่วม, C คือ สารสกัด วิธีนี้สารสกัด (C) จะเกิดปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการ (A) และไอออนร่วม (B) แล้วเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ (ABC) แล้วจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับแล้ว ไอออนที่ต้องการ (A) กับไอออนร่วม (B) จะมาอยู่ที่สารละลายนำกลับ แล้วปล่อยสารสกัด (C) กลับมาที่เยื่อแผ่นเหลว จะเห็นว่าสารที่ต้องการสกัด (A) กับไอออนร่วม (B) มีทิศทางการถ่ายเทมวลไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูป 2.12 ในกระบวนการนี้พบในสารสกัดชนิดกลาง ดังสมการที่ 2.10 และสารสกัดชนิดเบสดังสมการที่ 2.10

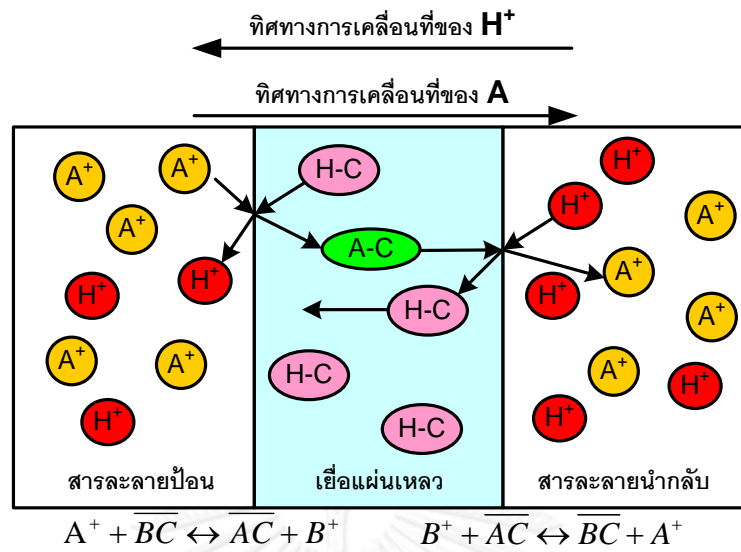


รูปที่ 2. 10 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ในทิศทางเดียวกัน



(2) การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ในทิศทางสวนกัน (Coupled Facilitated Counter-transport)

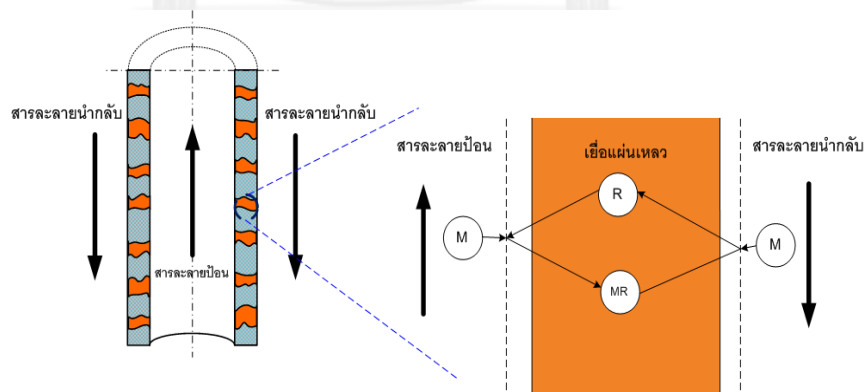
เมื่อ A คือ ไอออนที่ต้องการสกัด , B คือ ไอออนร่วม , BC คือ สารสกัด วิธีนี้สารสกัด (BC) จะเกิดปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการ (A) แล้วปล่อยไอออนร่วม (B) ที่สารละลายป้อนแล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ (AC) แล้วจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปฝั่งสารละลายนำกลับแล้ว สารที่ต้องการสกัด (A) จะมาอยู่ที่สารละลายนำกลับแล้วปล่อยสารสกัด (BC) กลับมาที่เยื่อแผ่นเหลวแต่มันจะดึงไอออนร่วม (B) จากสารละลายนำกลับเข้าไปที่เยื่อแผ่นเหลวด้วย พบว่าสารที่ต้องการสกัด (A) กับไอออนร่วม (B) มีทิศทางการถ่ายเทมวลไปในทิศทางสวนกันดังรูป 2.13 ในกระบวนการประเภทนี้พบในสารสกัดชนิดกรด ดังสมการที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ในทิศทางสวนกัน



การถ่ายเทมวลที่กล่าวข้างต้นเกิดขึ้นบริเวณเยื่อแผ่นเหลว (อยู่ระหว่างผนังภายในและด้านนอกของเส้นใยกลาง) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเกิดที่บริเวณผิวรอยต่อของผนังทั้ง 2 ฝั่งของเส้นใยกลางที่ติดกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังรูป 2.12

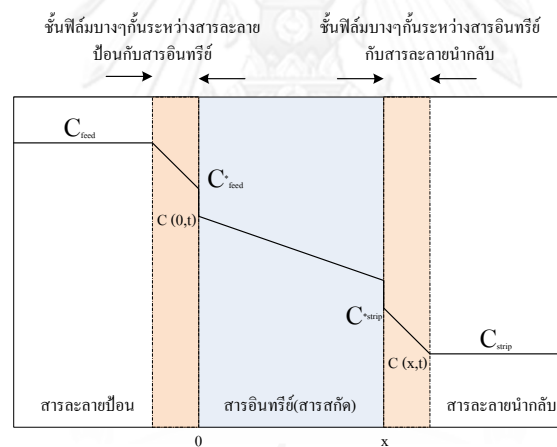


รูปที่ 2.12 แสดงบริเวณการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายป้อน สารสกัด (เยื่อแผ่นเหลว) และสารละลายนำกลับ

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลของไอออน สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ

1. การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังรอยต่อของเยื่อแผ่นเหลว
2. การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
3. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ
4. การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (นำกลับ) ของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวของเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ
5. การแพร่ของไอออนโลหะจากรอยต่อของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ ดังรูปที่

2.13



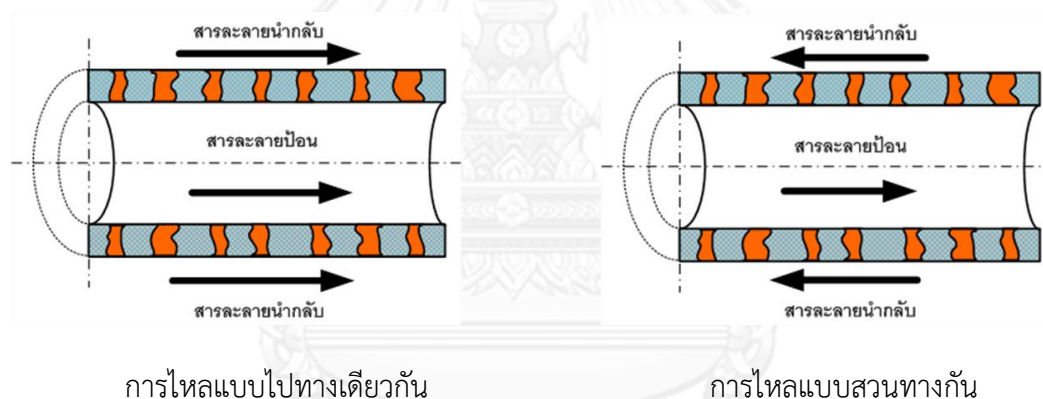
รูปที่ 2.13 แสดงขั้นตอนของการถ่ายเทมวล

2.9 การประยุกต์ใช้โมดูลเส้นใยกลาง

1. การใช้โมดูลเส้นใยกลางแบบ 1 โมดูล (ใช้แบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง)
2. การใช้โมดูลเส้นใยกลางแบบหลายโมดูล (ใช้แบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง)
3. การใช้โมดูลเส้นใยกลางโดยใช้วิธีเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลางแบบสัมผัส

ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับของโมดูลเส้นใยกลางสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.14 คือ

1. การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับทิศทางเดียวกัน
2. การไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีทิศทางสวนทางกัน



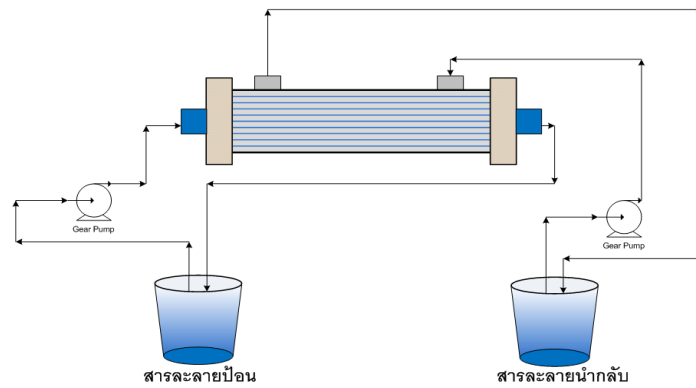
รูปที่ 2.14 ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในโมดูลเส้นใยกลาง

2.9.1 รูปแบบการปฏิบัติการ (Operation Mode) แบบ 1 โมดูล [51]

ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือ แบบไหลวน (Batch Operation Mode) แบบไหลผ่านหรือไหลต่อเนื่อง (Continuous Operation Mode) และแบบกึ่งไหลวน (Semi-Batch Operation Mode)

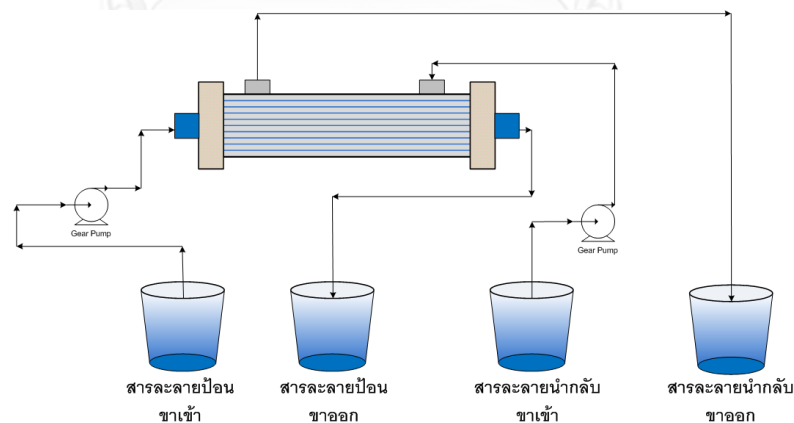
แบบไหลวน (Batch Operation Mode) ระบบนี้ใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับอย่างละ 1 ถัง โดยที่สารละลายป้อนเข้าและขาออกต่างไหลวนกันอยู่ภายในถังของสารละลายป้อน ส่วนสารละลายนำกลับเข้าและขาออกก็ไหลวนกันอยู่ภายในถังของสารละลายนำกลับเช่นเดียวกัน

ระบบปฏิบัติการแบบนี้มักใช้เมื่อมีสารละลายป้อนปริมาณน้อยๆ ซึ่งข้อดีของระบบแบบนี้คือ สามารถสกัดไอออนโลหะจากสารละลายป้อนได้เกือบหมด ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบไหลวน

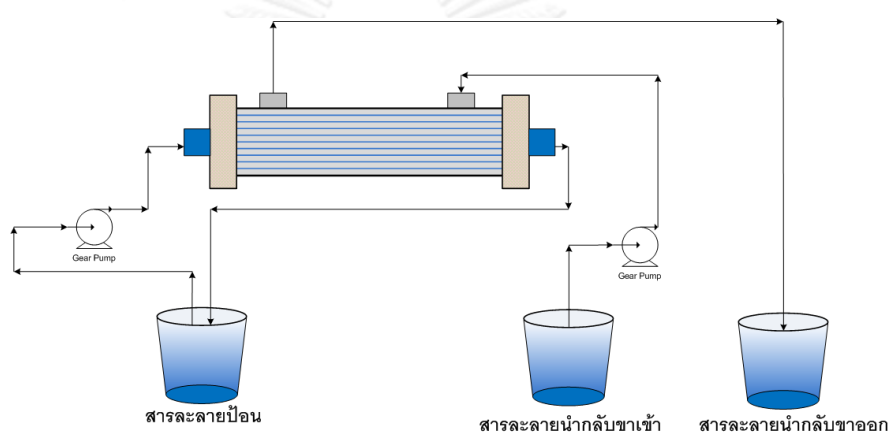
แบบไหลผ่านหรือไหลต่อเนื่อง (Continuous Operation Mode) ระบบนี้ใช้ 4 ถังซึ่งแบ่งเป็น สารละลายป้อน 2 ถัง (ขาเข้าและขาออก) และสารละลายนำกลับ 2 ถัง (ขาเข้าและขาออก) ซึ่งทำให้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับวิ่งสวนทางกัน ระบบปฏิบัติการแบบนี้มักใช้เมื่อสารละลายป้อนมีปริมาณมากๆ ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถสกัดไอออนโลหะจากสารละลายป้อนในปริมาณที่มากได้ ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบไหลผ่านหรือไหลต่อเนื่อง

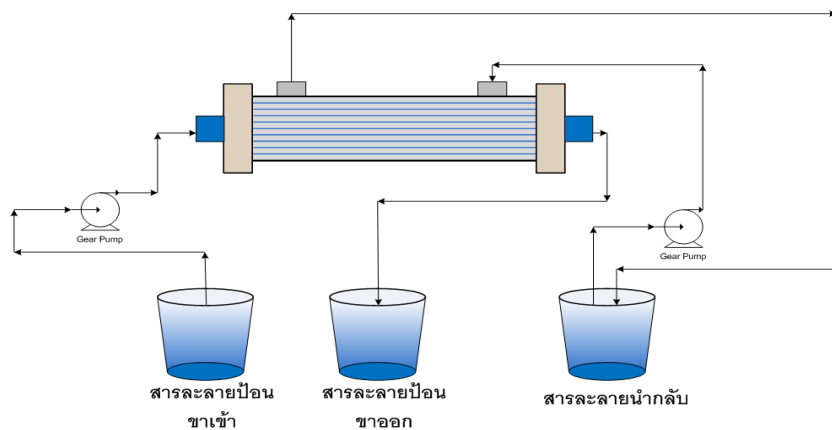
แบบกึ่งไหลวน (Semi-Batch Operation Mode) ระบบนี้ใช้ถัง 3 ถังและมีระบบปฏิบัติการ ทั้งไหลวนและไหลผ่านอยู่ด้วยกันสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ

ลักษณะที่สารละลายป้อนไหลวนและสารละลายนำกลับไหลผ่าน (Semi-Batch Feed Operation Mode) ระบบนี้สารละลายป้อนจะมี 1 ถังซึ่งทั้งขาเข้าและขาจะไหลวนอยู่ในโมดูล แต่ สารละลายนำกลับมี 2 ถัง (ถังขาเข้าและถังขาออก) ระบบแบบนี้ใช้เมื่อมีปริมาณสารละลายป้อน น้อยๆ แต่ต้องการสารละลายนำกลับเป็นปริมาณมาก ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งไหลวนในลักษณะ สารละลายป้อนไหลวนและสารละลายนำกลับไหลผ่าน

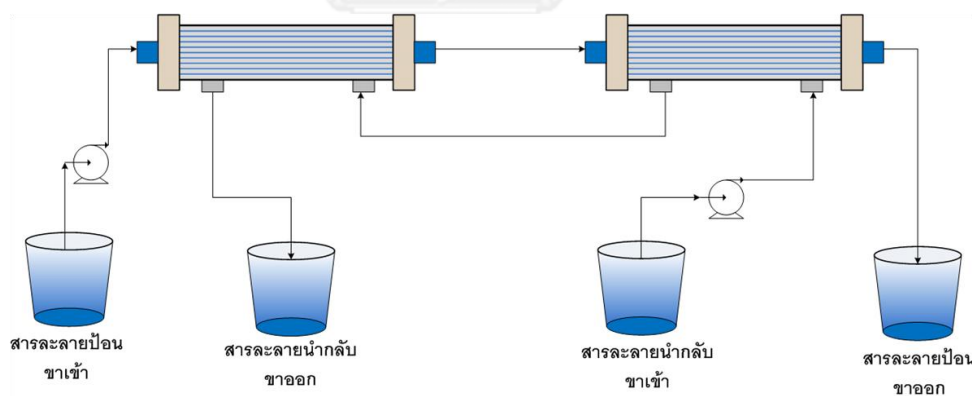
ลักษณะที่สารละลายนำกลับไหลวนและสารละลายป้อนไหลผ่าน (Semi-Batch Strip Operation Mode) ในระบบนี้สารละลายนำกลับมี 1 ถังที่ขาเข้าและขาออกไหลวนกันผ่านโมดูล แต่ สารละลายป้อนมีเพียงถังเดียว ซึ่งระบบปฏิบัติการแบบนี้เหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับงานบำบัด ในอุตสาหกรรมอย่างยิ่ง เพราะนอกจากสกัดไอออนโลหะในสารละลายป้อนได้มากแล้ว ยังสามารถ เพิ่มความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับให้มีค่าสูงขึ้นได้อีก ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2. 18 แสดงเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งไหลวนในลักษณะสารละลายนำกลับไหลวนและสารละลายป้อนไหลผ่าน

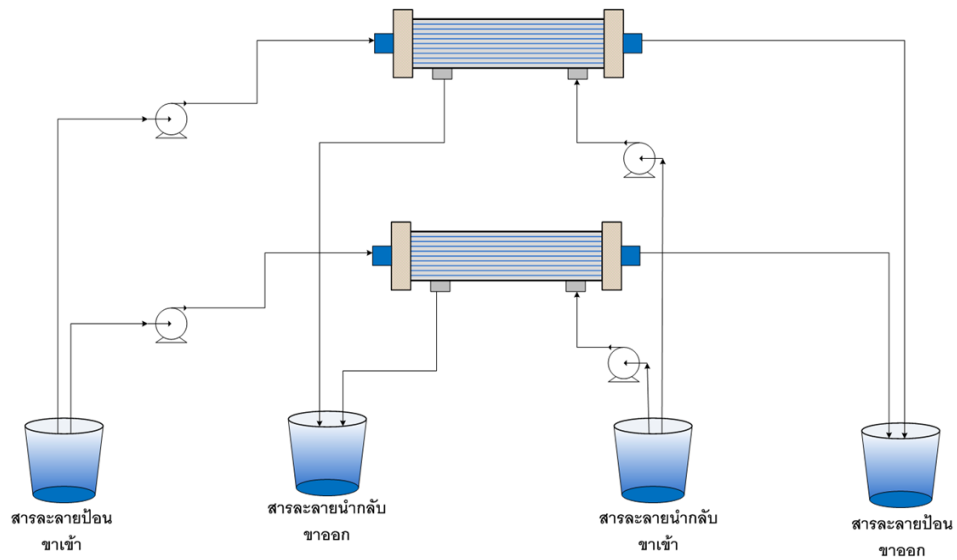
2.9.2 การใช้โมดูลเส้นใยกลางแบบหลายโมดูลในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง

การต่อโมดูลแบบอนุกรม การต่อโมดูลในลักษณะนี้ทำเมื่อการสกัดที่ผ่านโมดูลแรกยังมีค่าที่สูงอยู่จึงต้องต่ออีกโมดูลเพื่อลดความเข้มข้นของสารที่ถูกสกัด ดังรูปที่ 2.19



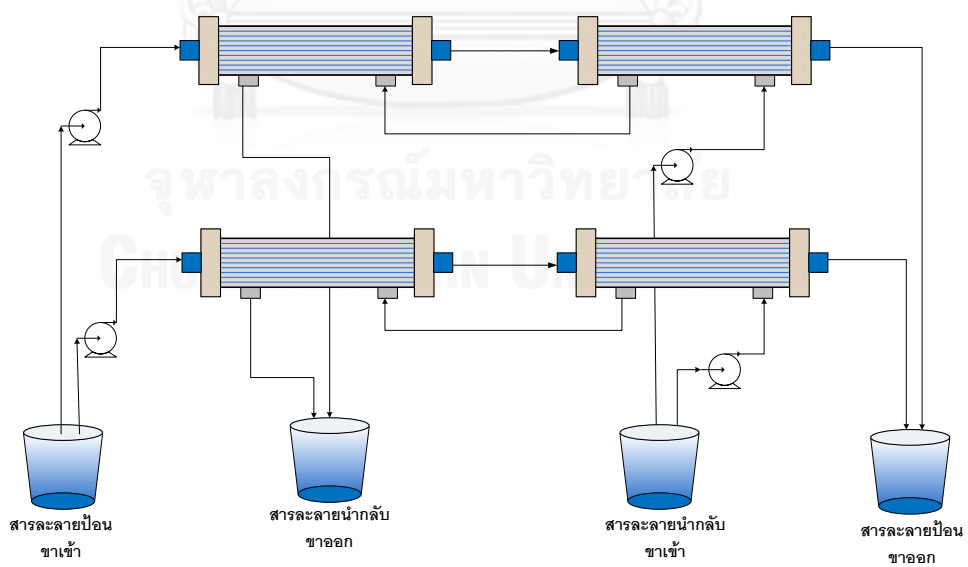
รูปที่ 2. 19 แสดงการต่อโมดูลเส้นใยกลางแบบอนุกรม

การต่อโมดูลแบบขนาน การต่อในลักษณะนี้ใช้เมื่อการสกัดในแต่ละโมดูลมีค่าตามต้องการ แต่ต้องการใช้ในปริมาณสารที่ถูกสกัดมีปริมาณมาก ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2. 20 แสดงการต่อโมดูลเส้นใยถลุงแบบขนาน

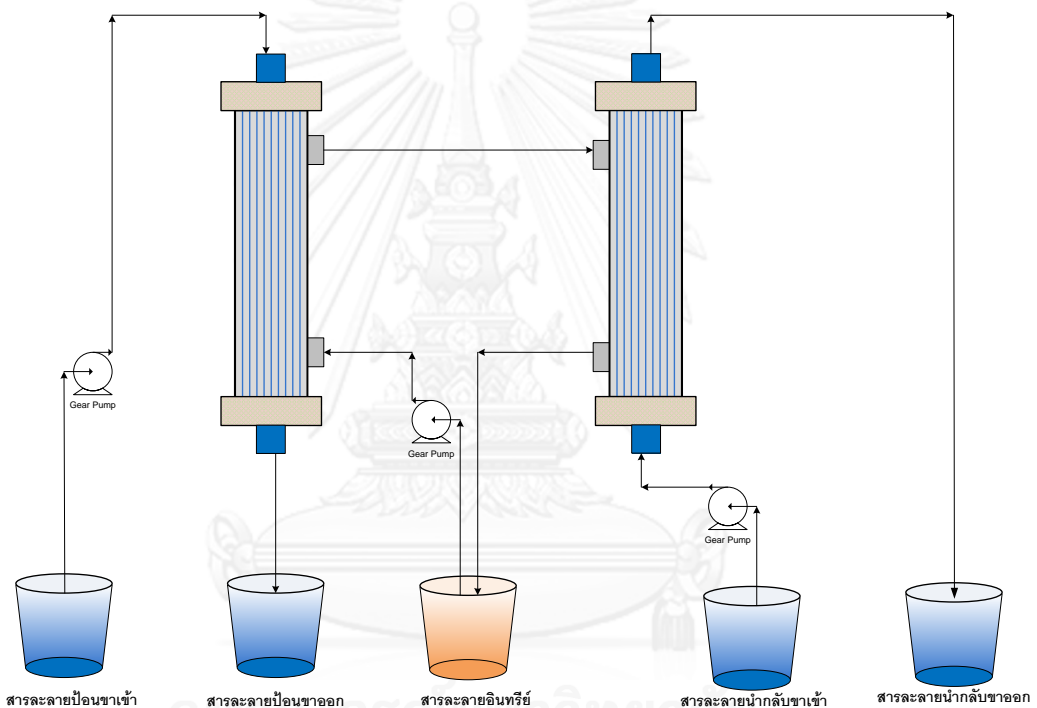
การต่อโมดูลแบบผสม ใช้เมื่อความเข้มข้นสารที่ถูกสกัดและปริมาณที่ถูกสกัดมีค่าต่ำกว่าที่ ต้องการ ซึ่งการทำแบบนี้เปลืองโมดูลเป็นอย่างมาก ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2. 21 แสดงการต่อโมดูลเส้นใยถลุงแบบผสม

2.9.3 การใช้โมดูลเส้นใยกลวงโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow Fiber Contractor Liquid Membrane, HFCLM)

ระบบจะใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูลโดยที่โมดูลแรกทำหน้าที่เป็นหน่วยสกัดและโมดูลที่ 2 ทำหน้าที่เป็นหน่วยนำกลับโดยมีสารสกัด (สารละลายอินทรีย์) เป็นตัวเชื่อมระหว่าง 2 โมดูลนี้โดยที่สารละลายป้อนจะไหลในท่อของโมดูลแรกและสารละลายนำกลับไหลในท่อของโมดูล 2 ส่วนสารสกัดไหลในเปลือกของทั้ง 2 โมดูล ในระบบนี้สารสกัดที่ไหลอยู่ในชั้นเปลือกจะซึมผ่านเข้าไปตั้งอยู่ในรูพรุนภายในเยื่อแผ่นเหลว ส่วนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลอยู่ในท่อและไม่สามารถเข้าไปในเยื่อแผ่นเหลวทำมาจากพอลิพรพิลีนที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำได้ ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสในรูปแบบการไหลแบบต่อเนื่อง

2.10 ทฤษฎีการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.10.1 การคำนวณร้อยละการสกัด (Percentage of Extraction, %E) ร้อยละการนำกลับ (Percentage of Stripping, %S) และร้อยละการเบี่ยงเบน (% Deviation)

$$\% \text{ Extraction} = \frac{[C]_{f,in} - [C]_{f,out}}{[C]_{f,in}} \times 100 \quad (2.13)$$

$$\% \text{ Stripping} = \frac{\frac{d[C]_{s,out}}{dt} \times V_s}{[C]_{f,in} \times v} \times 100 \quad (2.14)$$

$$\% \text{ Deviation} = \frac{\sum_{i=1}^j \left(\frac{C_{Expt} - C_{Theo}}{C_{Expt}} \right)}{j} \times 100 \quad (2.15)$$

โดยที่

$[C]_{f, in}$ = ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายป้อนขาเข้า (ส่วนใน
พื้นล้านส่วน)

$[C]_{f, out}$ = ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายป้อนขาออก (ส่วนใน
พื้นล้านส่วน)

$[C]_{s, out}$ = ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายนำกลับขาออก (ส่วนใน
พื้นล้านส่วน)

V_s = ปริมาตรของสารละลายนำกลับ (ลิตร)

v = อัตราการไหลในการไหลของสารละลายป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)

C_{Expt} = ความเข้มข้นของไอออนที่ได้จากการทดลอง

C_{Theo} = ความเข้มข้นของไอออนที่ได้จากการคำนวณ

2.10.2 กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) [24]

งานวิจัยนี้ศึกษาการถ่ายเทมวลจากฝั่งสารละลายป้อนไปยังสารละลายนำกลับ นอกจากนี้ยังมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีผู้ศึกษาไว้มาทำนายการถ่ายเทมวลนี้ด้วย ซึ่งแบบจำลองนี้นำมาใช้นี้มีพื้นฐานจากการทำสมดุลของมวลสารสาร (Mass Balance) หรือกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) ซึ่งมีเทอมหลักๆ ดังต่อไปนี้

$$\{\text{Convection In}\} - \{\text{Convection Out}\} + \{\text{Diffusion}\} - \{\text{Reaction}\} = \{\text{Accumulation}\}$$

เมื่อ

Convection In = Rate of mass transport into the system by convection

Convection Out = Rate of mass transport out of the system by convection

Diffusion = Rate of mass transport through the system by diffusion

Reaction = Rate of mass extracted by extraction reaction

Accumulation = Rate of mass accumulation within the small segment

จากเทอมข้างต้นสามารถเขียนเป็นเทอมสมการต่างๆ ได้ดังนี้

$$QC_{A(x-1,t)} - QC_{A(x,t)} + \frac{A_c D}{\Delta x} [C_{A(x,t)} - C_{A(x-1,t)}] + r_{A(x,t)} V_p = V_t \frac{dC_{A(x,t)}}{dt} \quad (2.16)$$

การใช้กฎการอนุรักษ์มวลข้างต้นพร้อมกันทุกเทอม หากนำมาค่าทั้งหมดแก่สมการจะเกิดความยากมาก ดังนั้นจึงต้องมีการตั้งสมมติฐานเพื่อตัดบางเทอมหรือตัวแปรบางตัวที่ไม่มีผลหรือส่งผลต่อระบบที่ศึกษาน้อยที่สุด ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ประกอบด้วยสมมติฐาน (Assumption) ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลอง (Isothermal)
2. ของไหลต้องเป็นไปตามกฎของ Newtonian Fluid
3. ทุกอัตราการไหลของการทดลองของไหลต้องเป็นแบบ laminar flow
4. ความพรุนของท่อมีขนาดเท่ากันหมดตลอดความยาวท่อ
5. การเกิดปฏิกิริยาเกิดบริเวณชั้นฟิล์มของรอยต่อชั้นน้ำกับสารอินทรีย์เท่านั้น
6. เยื่อแผ่นเหลวไม่มี fouling

7. ของเหลวในชั้นเยื่อแผ่นเหลวไม่สามารถละลายเข้ากับชั้นน้ำได้ (ไม่มีการสูญเสียเยื่อแผ่นเหลวจากกรพูนของเส้นใยกลาง)

2.10.3 Reaction Flux Model [19]

การคำนวณหาอันดับ (Order) และค่าคงที่ (Rate Constant) การเกิดปฏิกิริยา [52]

ในการหาอันดับและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยานั้นสามารถหาได้หลายวิธี เช่น การทำดิฟเฟอเรนเชียล หรือการทำอินทิเกรต เป็นต้น แต่ในที่นี้ด้วยแบบของข้อมูลที่มีและความง่ายในการคำนวณจึงเลือกที่จะหาข้อมูลอันดับของอันดับและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากการทำอินทิเกรต (Integration Method) ซึ่งอาศัยการเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นกับเวลาในเทอมต่างๆ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2. 7 แสดงการเขียนกราฟหาค่าลำดับและค่าคงที่ของปฏิกิริยา

อันดับของปฏิกิริยา (n)	แกน X	แกน Y	ค่าความชัน	หน่วยของค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา
n = 0	เวลา (นาที่)	C_a	-k	mg/L · min
n = 1	เวลา (นาที่)	$\ln(C_{a0}/C_a)$	k	min ⁻¹
n = 2	เวลา (นาที่)	$1/C_a$	k	L/mg · min

จากกฎการอนุรักษ์มวล ในแบบจำลองนี้ตัดเทอมของการแพร่ผ่านทิ้งเหลือเทอมต่างๆ ได้นำเทอม $\Delta x A_c$ หารตลอดแล้วนำมาเข้ากับเทอม limit Δx เข้าสู่ 0 จัดเทอมใหม่ได้ตามสมการ 2.17 และแสดงดังรูปที่ 2.23

$$-\frac{Q}{A_c} \frac{\partial C_{A(x,t)}}{\partial x} - \frac{V_p}{V_t} r_{A(x,t)} = \frac{\partial C_{A(x,t)}}{\partial t} \quad (2.17)$$

เมื่อ

Q = อัตราการไหล

A_c = พื้นที่หน้าตัดภายในเส้นใยกลาง

L = ความยาวของเส้นใยกลาง

X = ระยะทาง

t = เวลา

$C_{A(x,t)}$ = ความเข้มข้นที่ระยะทางและเวลาต่างๆ

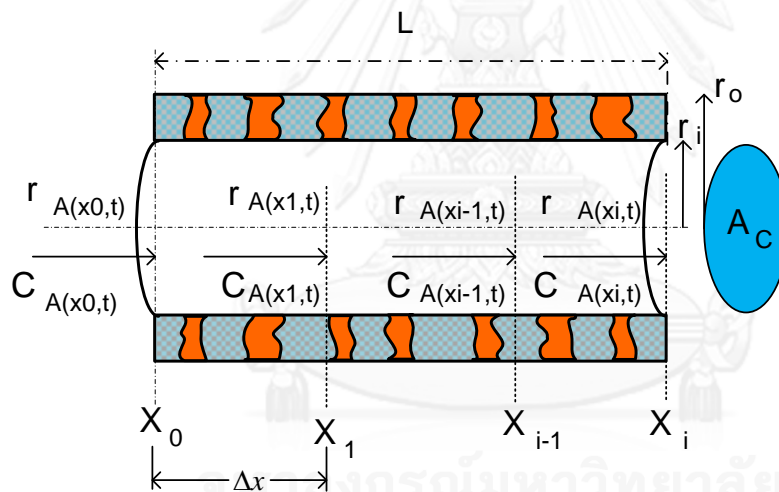
V_t = ปริมาตรของสารภายในเส้นใยกลางหาได้จาก $A_c \times L$

V_p = ปริมาตรของสารภายในรูพรุนเส้นใยกลางหาได้จาก $\pi(r_o - r_i)^2 \varepsilon L$

ε = ความพรุนของเส้นใยกลาง

r_i = รัศมีภายในเส้นใยกลาง

r_o = รัศมีภายนอกเส้นใยกลาง



รูปที่ 2. 23 แสดงรูปแบบการถ่ายโอนมวลสารภายในท่อของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง

จากสมการ 2.17 เมื่อพิจารณาที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) โดยแบ่งสมการตามอันดับของปฏิกิริยาได้เป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1. ปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์ ($n = 0$) ตามสมการ 2.18

$$C_{A(L,0)} = C_{A(0,0)} + \left(\frac{V_p}{V_t} \right) \frac{k_f A_C}{Q} L \quad (2.18)$$

กรณีที่ 2. ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ($n = 1$) ตามสมการ 2.19

$$C_{A(L,0)} = C_{A(0,0)} e^{-\left(\frac{V_p}{V_t} \right) \frac{k_f A_C}{Q} L} \quad (2.19)$$

กรณีที่ 3. ปฏิกิริยาอันดับที่ไม่ใช่ศูนย์และหนึ่ง ($n \neq 0, 1$) ตามสมการ 2.20

$$C_{A(L,0)} = \left[C_{A(0,0)}^{1-n} + \left(\frac{V_p}{V_t} \right) \frac{(n-1)k_f A_C}{Q} L \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (2.20)$$

จากสมการ 2.18 เมื่อพิจารณาที่เวลาใดๆ ($t \neq 0$) ตามอันดับของปฏิกิริยาแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1. ปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์ ($n = 0$) ตามสมการ 2.21

$$\bar{C}_{A(L,t)} = \bar{C}_{A(0,t-\tau_0)} + k_f(t-\tau_0) - k_f t \quad (2.21)$$

กรณีที่ 2. ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ($n = 1$) ตามสมการ 2.22

$$\bar{C}_{A(L,t)} = e^{-\alpha} \bar{C}_{A(0,t-\tau_0)} \quad (2.22)$$

กรณีที่ 3. ปฏิกิริยาอันดับที่ไม่ใช่ศูนย์และหนึ่ง ($n \neq 0, 1$) ตามสมการ 2.23

$$\bar{C}_{A(L,t)} = e^{-\beta} \bar{C}_{A(0,t-\tau_0)} \quad (2.23)$$

โดยตัวแปรจากสมการ 2.21 - 2.23 แสดงในสมการที่ 2.24 - 2.28

$$\tau_0 = \frac{A_C L}{Q} \quad (2.24)$$

$$\alpha = \left(\frac{V_p}{V_t} \right) \frac{k_f A_C L}{Q} \quad (2.25)$$

$$\beta = \left(\frac{V_p}{V_t} \right) \left(\frac{A_c k_f n}{Q \gamma} \right) \ln \left(\frac{\gamma L + \lambda}{\lambda} \right) \quad (2.26)$$

$$\gamma = \left(\frac{V_p}{V_t} \right) \frac{(n-1) k_f A_c}{Q} \quad (2.27)$$

$$\lambda = C_{A(0,0)}^{1-n} \quad (2.28)$$



บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

ตารางที่ 3. 1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลองกับสารละลายชนิดต่างๆ

ชนิดสารละลาย	ตัวทำละลาย	ตัวถูกละลาย	ตัวปรับสภาวะ
สารละลายป้อน	น้ำกลั่น	Hg(NO ₃) ₂ , As ₂ O ₃	HNO ₃ , NaOH
เยื่อแผ่นเหลว	เคโรซีน หรือ โทลูอีน หรือ น้ำมันถั่วเหลือง หรือ น้ำมันดอกทานตะวัน	Aliquat 336 หรือ Cyanex 923 หรือ LIX-841	
สารละลายนำกลับ	น้ำกลั่น		HNO ₃ , NaOH

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation (รูปที่ 3.1) ประกอบด้วย

- เครื่องสูบลม 2 ชุด ที่มีอัตราการไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที
- มาตรวัดและชุดควบคุมอัตราการไหล 2 ชุด
- มาตรวัดความดัน 2 ชุด

3.2.2 อุปกรณ์เส้นใยกลางที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีนชนิดมีรูพรุน Liqui-Cel[®] Membrane Contactors X-50 Fiber ดังรูปที่ 3.1 และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3. 1 แสดงอุปกรณ์โมดูลเส้นใยกลางที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีน

ตารางที่ 3. 2 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลางพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะ	คุณลักษณะ
วัสดุเส้นใยกลาง	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง	240 μm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลาง	300 μm
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 μm
ความพรุนของเส้นใยกลาง	30 %
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 kg/cm^2 (60 psi)
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m^2 (15.2 ft^2)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 $\text{cm}^2 / \text{cm}^3$ (74.4 m^2 / m^3)
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	5 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 70 $^{\circ}\text{C}$
มิติของชุดเส้นใยกลาง (DXL)	7.74 \times 25.6 cm.
จำนวนเส้นใยกลาง	35,000 เส้น

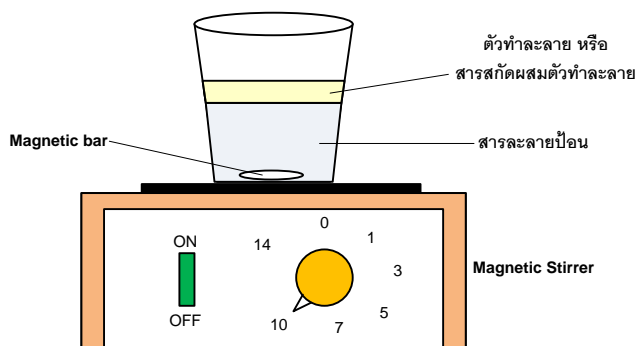
3.2.3 เครื่อง Flow injection Mercury System (FIMS) รุ่น XLAS-400 และ GFAAS (Grafies Furnace Atomic Absorption Spectrometer) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น 4110ZL เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูตามลำดับ

3.2.4 อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ เช่น บีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ปีเปต กรวยแยกสาร แท่งแก้วคนสาร เครื่องรักษาอุณหภูมิ (water bath)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1. ศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid-Extraction) มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนของปรอทและสารหนู ปริมาตร 100 มิลลิลิตรที่สังเคราะห์ขึ้นมาเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมตัวทำละลายที่กำหนดไว้ เช่น เคโรซีน, โทลูอีน, น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกทานตะวัน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. นำสารละลายป้อนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรผสมกับตัวทำละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารละลายในบีกเกอร์นำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายทำการปั่นกวน ดังรูป 3.2 เป็นเวลาประมาณครึ่งชั่วโมง แล้วนำไปใส่ในกรวยแยกตั้งทิ้งไว้รอจนกว่าสารละลายป้อนและสารสกัดแยกชั้นกันเมื่อแยกชั้นแล้ว ให้เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (3) โดยเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายจนครบ
5. นำตัวอย่างที่เก็บจากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทด้วยเครื่อง FIMS และความเข้มข้นของสารหนูด้วยเครื่อง GFAAS (Grafies Furnace Atomic Absorbtion Scopy, AA-Grafies)



รูปที่ 3. 2 แสดงการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

3.3.2. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารสกัดในตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid-Extraction) มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนของปรอทและสารหนู ปริมาตร 100 มิลลิลิตรที่สังเคราะห์ขึ้นมา เก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารสกัดที่เลือกไว้ เช่น Aliquat 336, Cyanex 923, LIX 84I ผสมกับตัวทำละลายที่สกัดปรอทและสารหนูได้ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.1 ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยปริมาตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร
3. นำสารละลายป้อนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรผสมกับสารสกัดและตัวทำละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารละลายลงในบีกเกอร์นำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายทำการปั่นกวน ดังรูป 3.2 เป็นเวลาประมาณครึ่งชั่วโมง แล้วนำไปใส่ในกรวยแยกตั้งทิ้งไว้รอจนกว่าสารละลายป้อนและสารสกัดแยกชั้นกันเมื่อแยกชั้นแล้ว ให้เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (3) โดยเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารสกัดในตัวทำละลายจนครบ
5. นำตัวอย่างที่เก็บจากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทด้วยเครื่อง FIMS และความเข้มข้นของสารหนูด้วยเครื่อง GFAAS

3.3.3. ศึกษาผลของพีเอชในสารละลายป้อนในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid-Extraction) มีขั้นตอนดังนี้

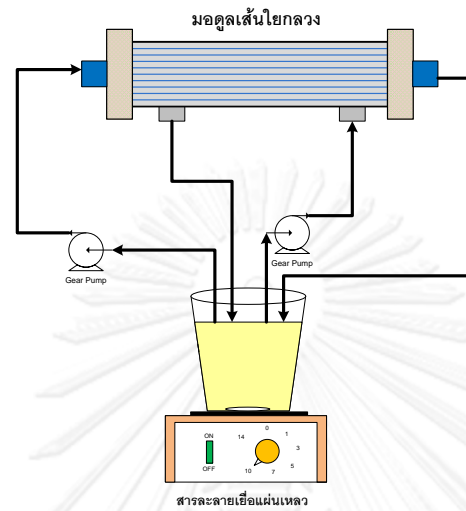
1. เตรียมสารละลายป้อนของปรอทและสารหนู ปริมาตร 100 มิลลิลิตรจากนั้นนำมาปรับสภาพกรด-เบสโดยกำหนดพีเอช 2, 4, 7, 10 และ 12 ในสภาพที่เป็นกรด

- ให้ปรับด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และสถานะที่เป็นเบสให้ปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เก็บตัวอย่างเริ่มต้นนำไปวิเคราะห์
- เตรียมสารสกัดและตัวทำละลายที่สามารถสกัดปรอทและสารหนูได้ดีที่สุดจากการทดลองที่ 3.3.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
 - นำสารละลายป้อนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรผสมกับสารสกัดและตัวทำละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงในบีกเกอร์นำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายทำการปั่นกวน ดังรูป 3.2 เป็นเวลาประมาณครึ่งชั่วโมง แล้วนำไปใส่ในกรวยแยกตั้งทิ้งไว้รอจนกว่าสารละลายป้อนและสารสกัดแยกชั้นกันเมื่อแยกชั้นแล้ว ให้เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์
 - ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (3) โดยเปลี่ยนค่าพีเอชของสารละลายป้อนจนครบ
 - นำตัวอย่างที่เก็บจากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทด้วยเครื่อง FIMS และความเข้มข้นของสารหนูด้วยเครื่อง GFAAS

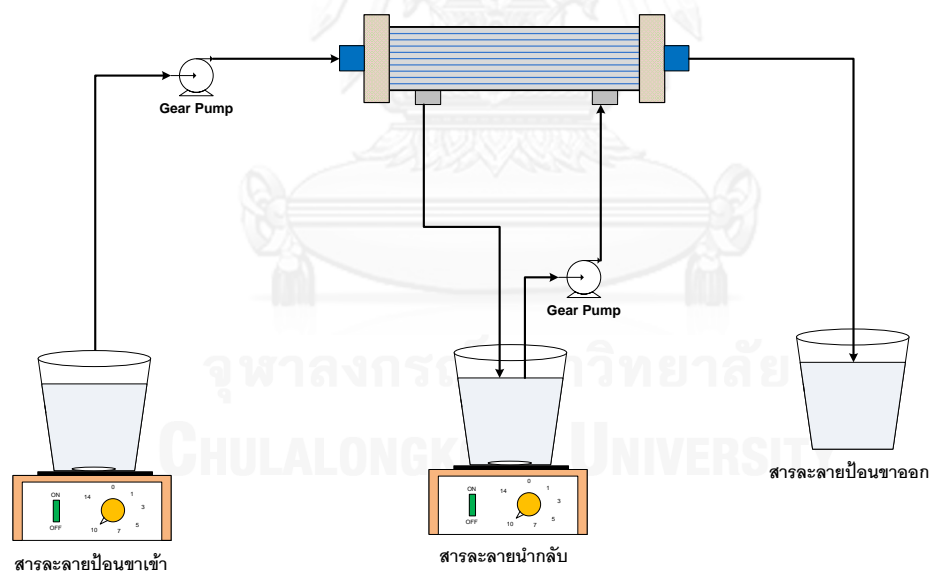
3.3.4. ศึกษาผลของสถานะความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) มีขั้นตอนดังนี้

- เตรียมสารละลายป้อนของปรอทและสารหนู ปริมาตร 5 ลิตรปรับสถานะกรดหรือเบสโดยในสถานะที่เป็นกรดให้ปรับด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และสถานะที่เป็นเบสให้ปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงในถังนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายทำการปั่นกวนและเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว เพื่อใช้ตรึงอยู่ในโมดูลเส้นใยกลวง โดยผสมสารสกัด Aliquat 336 ปริมาตร 100 มิลลิลิตรลงในเคโรซีนปรับปริมาตรจนได้ 1 ลิตร (ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร) นำไปยัดตรึงอยู่ในรูพรุนของโมดูลเส้นใยกลวงทำโดยนำสารละลายที่เตรียมมาผ่านปั๊มวนเข้าทั้งทางท่อและเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวงเป็นเวลา 30 นาที ดังรูป 3.3
- เตรียมสารละลายนำกลับปริมาตร 4 ลิตรโดยเตรียมเป็นพีเอช โดยในสถานะที่เป็นกรดให้ปรับด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และสถานะที่เป็นเบสให้ปรับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารใส่ลงในถังนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายทำการปั่นกวนเก็บและตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
- ใส่สารละลายป้อนเข้าทางท่อของโมดูลเส้นใยกลวงแบบไหลผ่านและใส่สารละลายนำกลับเข้าเปลือกโมดูลเส้นใยกลวงแบบไหลวนโดยให้สารละลายทั้ง 2 ชนิดไหลสวนทางกันด้วยอัตราเร็ว 100 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.4 เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 นาทีเพื่อนำไปวิเคราะห์ปรอทและสารหนู

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าพีเอชในสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับจนครบ
6. นำตัวอย่างที่เก็บจากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทด้วยเครื่อง FIMS และความเข้มข้นของสารหนูด้วยเครื่อง GFAAS



รูปที่ 3.3 แสดงวิธีการนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวตั้งไว้ภายในมอดูลเส้นใยกลวง



รูปที่ 3.4 แสดงการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

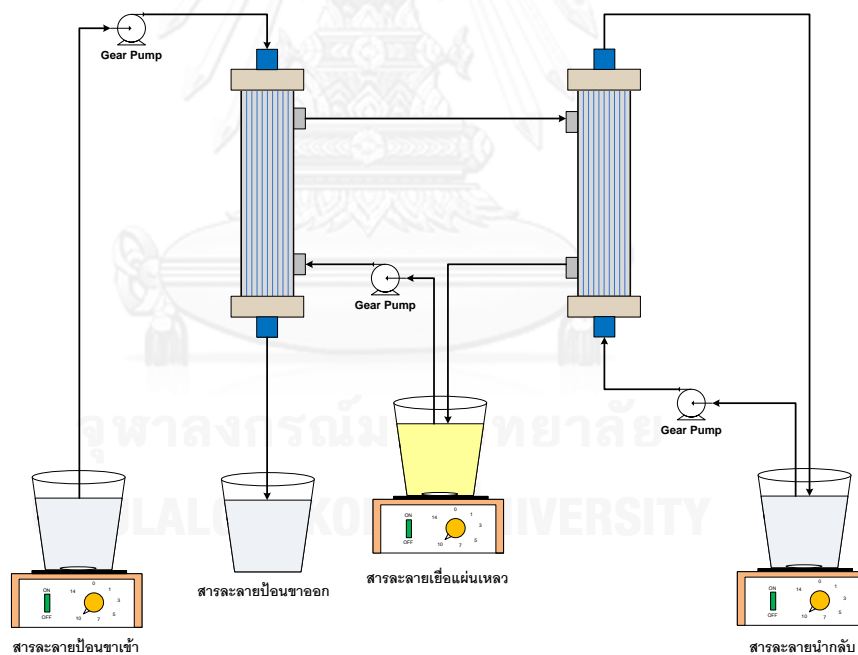
3.3.5. ศึกษาผลของอัตราการไหลในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนของปรอทและสารหนู ปริมาตร 5 ลิตรปรับสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.3.4 ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารใส่ในถังนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลาย ทำการปั่นกวนและเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว เพื่อใช้ตรึงอยู่ในโมดูลเส้นใยกลวง โดยผสมสารสกัด Aliquat 336 ปริมาตร 100 มิลลิลิตรลงในเคโรซีนปรับปริมาตรจนได้ 1 ลิตร (ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร) นำไปยึดตรึงอยู่ในรูปทรงของโมดูลเส้นใยกลวงทำโดยนำสารละลายที่เตรียมมาผ่านปั๊มวนเข้าทั้งทางท่อและเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวงเป็นเวลา 30 นาที ดังรูป 3.3
3. เตรียมสารละลายนำกลับปริมาตร 4 ลิตรโดยเตรียมจากสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.3.4 ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารใส่ลงในถังนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายทำการปั่นกวนเก็บและตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
4. ใส่สารละลายป้อนเข้าทางท่อของโมดูลเส้นใยกลวงแบบไหลผ่านและใส่สารละลายนำกลับเข้าเปลือกโมดูลเส้นใยกลวงแบบไหลวนโดยให้สารละลายทั้ง 2 ชนิดไหลสวนทางกันด้วยอัตราเร็ว 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ดังรูปที่ 3.4 เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 นาทีเพื่อนำไปวิเคราะห์ปรอทและสารหนู
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยปรับอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100, 300 และ 500 มิลลิลิตรต่ออนาทีจนครบ
6. นำตัวอย่างที่เก็บจากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทด้วยเครื่อง FIMS และความเข้มข้นของสารหนูด้วยเครื่อง GFAAS

3.3.6. ศึกษาผลของอัตราการไหลในการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow Fiber Contactor Liquid Membrane) มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อนของปรอทและสารหนู ปริมาตร 5 ลิตรปรับสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.3.4 ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงในถังนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายทำการปั่นกวนและเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว โดยผสมสารสกัด Aliquat 336 ปริมาตร 150 มิลลิลิตรลงในเคโรซีนปรับปริมาตรจนได้ 1.5 ลิตร (ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร) ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารใส่ลงในถังนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายทำการปั่นกวน

3. เตรียมสารละลายนำกลับปริมาตร 4 ลิตร โดยเตรียมจากสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.3.4 ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงในถังนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารละลายทำการปั่นกวนเก็บและตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
4. โมดูลแรกใส่สารละลายป้อนเข้าทางท่อของโมดูลเส้นใยกลวงแบบไหลผ่านและใส่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวทางเปลือกโดยให้ไหลสวนแบบสวนทางกัน จากนั้นนำสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ออกจากเปลือกโมดูลแรกเข้าสู่เปลือกของโมดูลที่สองและเอากลับมาไว้ในถังเดิมให้ไหลวนอยู่ในระบบ ใส่สารละลายนำกลับเข้าท่อของโมดูลเส้นใยกลวงโมดูลที่สองแบบไหลวนโดยให้สารละลายทั้ง 2 ชนิดไหลสวนทางกันด้วยอัตราเร็ว 100 มิลลิลิตรต่อนาที ดังรูปที่ 3.5 เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับที่เวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 นาทีเพื่อนำไปวิเคราะห์ปรอทและสารหนู
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยปรับอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100, 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาทีจนครบ
6. นำตัวอย่างที่เก็บจากการทดลองไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทด้วยเครื่อง FIMS และความเข้มข้นของสารหนูด้วยเครื่อง GFAAS



รูปที่ 3. 5 แสดงการสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

3.4 ขั้นตอนการทำความสะอาดโมดูลเส้นใยกลวง

ในขณะที่กำลังทำการทดลองแต่ละการทดลองนั้นจะมีสิ่งเจือปนต่างๆที่ค้างอยู่ในโมดูลเส้นใยกลวง เช่น สารเคมีหรือสิ่งสกปรกต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้รูพรุนของเส้นใยกลวงเกิดการอุดตันซึ่งส่งผลต่อการไหลและประสิทธิภาพของการสกัดของโมดูลเส้นใยกลวงครั้งต่อไป ดังนั้นเมื่อทำการทดลองเสร็จแต่ละรอบจำเป็นต้องมีการล้างหรือทำความสะอาดโมดูลเส้นใยกลวงทันทีเพื่อลดปัญหาดังกล่าว ซึ่งการทำความสะอาดโมดูลเส้นใยกลวงมีขั้นตอนดังนี้

1. หลังจากทำการทดลองเสร็จให้ใช้น้ำกลั่นไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลวงประมาณ 10-20 นาที ทั้งทางท่อและทางเปลือกของโมดูลเส้นใยกลวง
2. ทำการเขย่าโมดูลเส้นใยกลวงเบาๆ เพื่อให้สิ่งสกปรกต่างๆที่ตกค้างอยู่ในรูพรุนหลุดออกมาในขณะที่น้ำกลั่นไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลวงเป็นระยะๆ
3. สังเกตน้ำกลั่นที่ไหลออกมาจากโมดูลทั้ง 2 ฝั่ง (น้ำกลั่นที่ไหลในท่อและที่ไหลในเปลือก) ถ้ายังมีคราบน้ำมันหรือสิ่งสกปรกอื่นๆที่ทำให้น้ำกลั่นไม่ใส (ขุ่น) เหมือนเขาเข้าไปให้ไหลผ่านไปเรื่อยๆจนกว่าน้ำกลั่นเขาออกจะมีลักษณะใส
4. ใช้ตัวทำละลายที่สามารถทำความสะอาดรูพรุนของเส้นใยกลวงได้ เช่น ทีโพลล์ละลายในน้ำและนำไปไหลวนอยู่ในโมดูลเส้นใยกลวงทั้งทางท่อและทางเปลือกเป็นเวลา 20-30 นาทีและควรเขย่าโมดูลเส้นใยกลวงเบาๆไปพร้อมกันด้วยเพื่อเป็นการไล่อากาศที่ค้างอยู่และให้เข้าไปทำความสะอาดอย่างทั่วถึง
5. ใช้น้ำกลั่นไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลวงอีกครั้งประมาณ 20-30 นาที เพื่อที่ล้างตัวทำละลายไม่ให้เหลืออยู่ในรูพรุนของเส้นใยกลวงและให้สังเกตดูว่าน้ำที่ออกมาจากโมดูลเส้นใยกลวงต้องไม่มีฟองที่เกิดทีโพลล์ (ถ้ายังเหลือฟองอยู่ให้ล้างไปจนกว่าไม่มีฟอง) เพราะถ้ามีฟองเหลืออยู่แสดงว่าสารที่ใส่เข้าไปทำความสะอาดตกค้างอยู่ซึ่งทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้
6. ให้อากาศไหลผ่านในโมดูลเส้นใยกลวงทั้งโมดูลเส้นใยกลวงเพื่อเอาหน้าที่ค้างอยู่ในโมดูลเส้นใยกลวงออกมาให้หมดทั้งโมดูลเส้นใยกลวงไว้รอนแห้ง หรืออาจใช้ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) ไหลวนในโมดูลเส้นใยกลวงเพื่อทำให้เส้นใยกลวงแห้งเร็วยิ่งขึ้น (ในกรณีที่ต้องการนำโมดูลเส้นใยกลวงมาใช้ทำการทดลองต่อเนื่อง)

3.5 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.5.1 วิธีการวิเคราะห์ปรอทโดยใช้เครื่อง FIMS รุ่น XLAS-400

สารเคมีที่ใช้

1. 5% KMnO_4
2. Mix Acid**
3. 5% $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$
4. 10% Hydroxylamine Hydrochloride
5. 3% HNO_3
6. 0.2% Na_2BH_4 in 0.05% NaOH

** วิธีเตรียม Mix acid : ค่อยๆเติม HNO_3 (Nitric acid) 250 มิลลิลิตร ลงในน้ำ 250 มิลลิลิตร ช้าๆ เสร็จแล้วค่อยเติม H_2SO_4 (Sulfuric acid) 500 มิลลิลิตร เมื่อผสมเสร็จทิ้งสารละลายไว้จนเย็น

วิธีการย่อยปรอทในน้ำ

1. ปิเปตตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ (ชนิดมีฝาปิด) เติม 5% KMnO_4 และ Mix Acid อย่างละ 2 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. เติม 5% $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 2 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วนำไปย่อยด้วย water bath ที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 15 นาที
3. นำออกจาก water bath ตั้งทิ้งไว้จนเย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. ค่อยๆเติม 10% Hydroxylamine Hydrochloride (เพื่อกำจัด Manganese dioxide) จนได้สารละลายที่ใสไม่มีสีเจือปน
5. เทสารละลายในขวดรูปชมพู่ลง volumetric flask ขนาด 50 มิลลิลิตร ค่อยๆล้างขวดชมพู่ด้วยน้ำกลั่นประมาณ 2 รอบจึงปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FIMS

Standard สำหรับวัดด้วยเครื่อง FIMS

เตรียมจาก $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ solution 1,000 ส่วนในล้านส่วน นำมาเติมน้ำกลั่นจนได้ความเข้มข้น 0.5, 1, 5, 10, 20, 30 ส่วนในพันล้านส่วน

Mobile Phase

1. 3% HNO_3 เตรียมจาก Nitric acid 30 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ 1 ลิตร
2. 0.2% Na_2BH_4 in 0.05% NaOH เตรียมโดย ชั่ง Na_2BH_4 2 g. และ NaOH 0.5 g. นำมาละลายน้ำและผสมกันแล้วจึงปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร

การวิเคราะห์ปรอท

นำปรอทไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Flow injection Mercury System (FIMS) รุ่น XLAS-400 ดังรูป 3.6



รูปที่ 3. 6 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ปรอทเครื่อง FIMS รุ่น XLAS-400

3.5.2. วิธีการวิเคราะห์สารหนูโดยใช้เครื่อง GFAAS ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น 4110 ZL

สารเคมีที่ใช้

1. HNO_3
2. HCl
3. H_2O_2
4. KI
5. Ascorbic acid
6. NaOH
7. Na_2BH_4

วิธีการย่อยสารหนูในน้ำ

1. ปิเปตตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิลิตร ใส่ลงใน DigiTube เติม 1:1 HNO_3 (HNO_3 กับ DI water ในอัตราส่วน 1:1) 5 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนาฬิกา ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที
2. เติม HNO_3 2.5 มิลลิลิตร แล้วจึงนำ DigiTube ใส่ลงใน Heating Box ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 95°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นใน Heating Box อีก 30 นาที
3. เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร และเติม 30% H_2O_2 2 มิลลิลิตร เอากระจกนาฬิกาที่ปิด DigiTube ออก แล้วตั้ง Heating Box ที่อุณหภูมิไว้ 95°C ปล่อยให้สารละลายระเหยไปเรื่อยๆ จนเหลือสารละลายน้อยกว่า 5 มิลลิลิตร จึงนำออกจาก Heating Box มาทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 15 นาที
4. เติม HCl 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 15 นาที
5. ปรับปริมาตรที่ DigiTube ด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

วิธีการ Delivertise สารหนู

1. นำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการย่อยแล้ว 5 มิลลิลิตร มาใส่ใน volumetric flask 50 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย 10% KI ใน 5% Ascorbic acid 5 มิลลิลิตร ตามด้วย HCl 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 45 นาที
3. ปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง GFAAS ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น 4110 ZL

การวิเคราะห์สารหนู

นำสารหนูไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง GFAAS ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น 4110 ZL ดังรูป 3.7



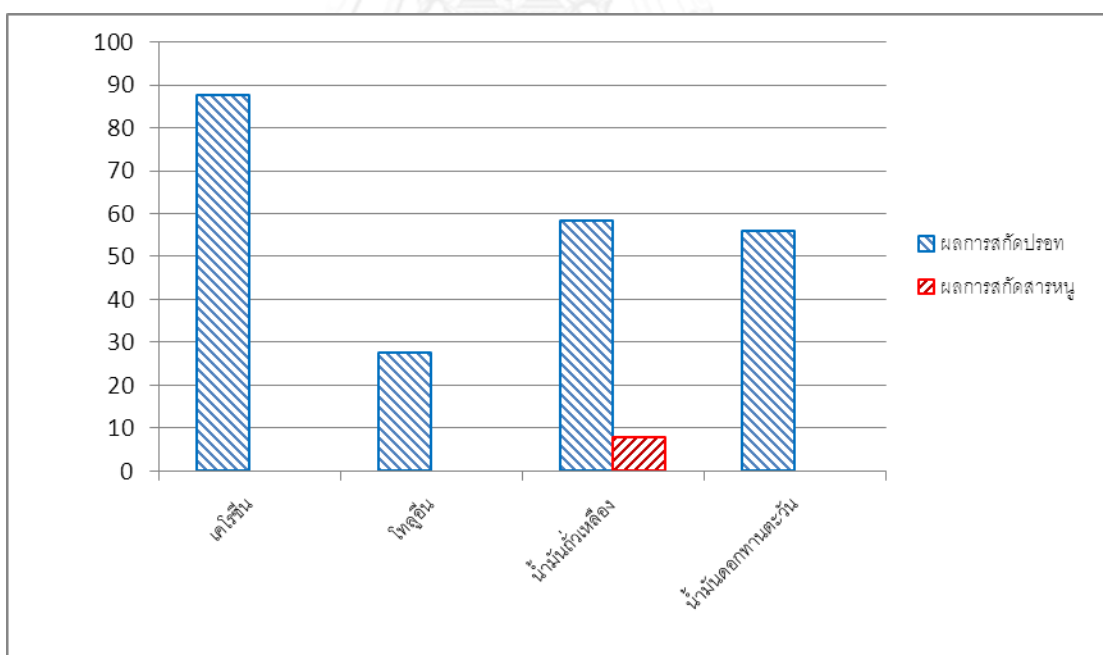
รูปที่ 3. 7 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์สารหนู GFAAS ยี่ห้อ Perkin รุ่น 4110 ZL

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการคัดเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการสกัดโปรทและสารหนูโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

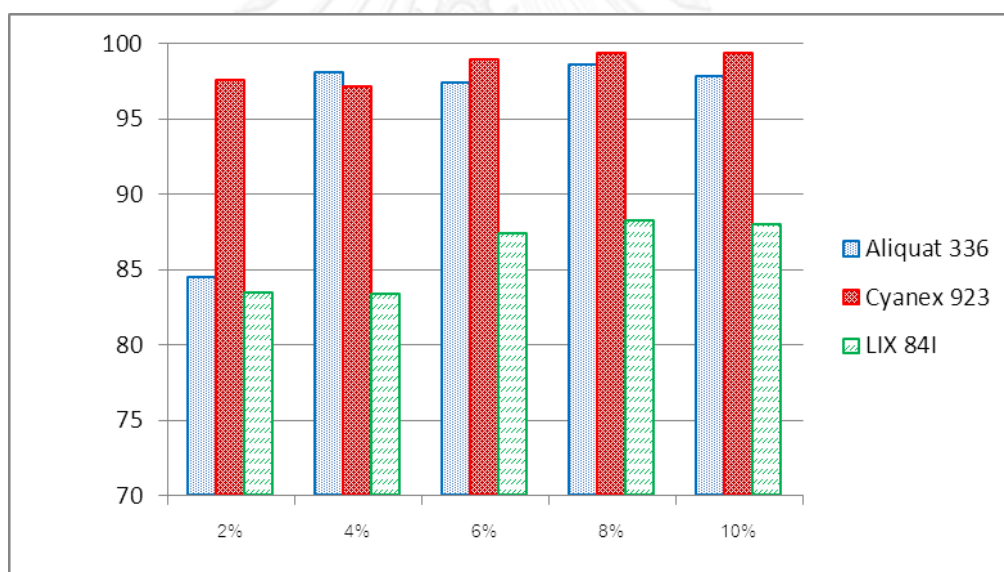
การทดลองนี้ศึกษาเพื่อหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับการสกัดไอออนโปรทและสารหนูความเข้มข้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ โดยเลือกใช้ตัวทำละลายได้แก่ เคโรซีน โทลูอิน น้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันดอกทานตะวัน ทำการทดลองโดยการวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ผลการศึกษาพบว่า ตัวทำละลายทุกชนิดสามารถสกัดโปรทได้ โดยที่เคโรซีนสามารถสกัดได้สูงสุดร้อยละ 87.83 รองลงมาคือ น้ำมันถั่วเหลืองร้อยละ 58.63 น้ำมันดอกทานตะวันร้อยละ 55.96 และสุดท้ายโทลูอินได้ร้อยละ 27.71 ดังนั้นการสกัดโปรทจึงเลือกใช้เคโรซีนเป็นตัวทำละลาย ส่วนสารหนูมีเพียงน้ำมันถั่วเหลืองเท่านั้นที่สกัดได้และได้เพียงแค่อ้อยละ 8 เท่านั้น ดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงค่าการสกัดโปรทและสารหนูโดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่างๆ โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย

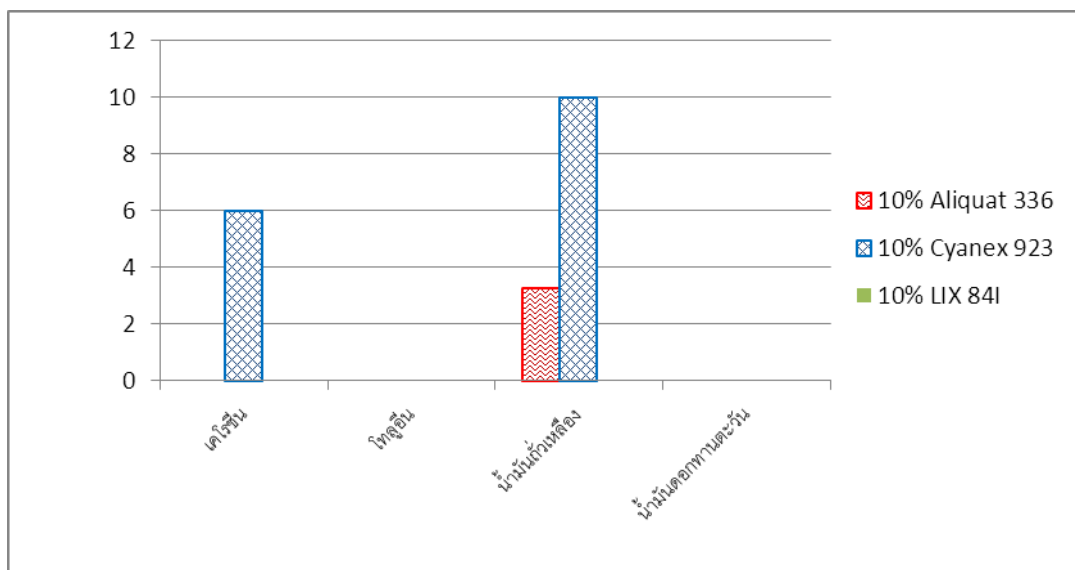
4.2 ผลของการเลือกสารสกัดและปริมาณสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดโปรตีนและสารหนูด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

การทดลองนี้ศึกษาเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปริมาณสารสกัดกับตัวทำละลายที่ถูกเลือกในหัวข้อ 4.1 การทดลองนี้ใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยการเพิ่มค่าสารสกัดของ Aliquat 336, Cyanex 923 และ LIX 84I ร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยปริมาตร ผลการศึกษาการสกัดของโปรตีนโดยใช้โครซีนตัวทำละลายพบว่า สามารถสกัดได้ร้อยละ 87 นั้นเมื่อเติมสารสกัดในสัดส่วนต่างๆ ปรากฏว่า LIX 84I ตั้งแต่ร้อยละ 2 ถึง 10 ค่าการสกัดไม่แตกต่างจากการใช้โครซีนเป็นตัวทำละลาย เมื่อใช้ Aliquat 336 ร้อยละ 2 ในโครซีนพบว่าค่าไม่แตกต่างจากการใช้โครซีนอย่างเดียว แต่เมื่อใช้ Aliquat 336 ร้อยละ 4 ขึ้นไปสามารถเพิ่มการสกัดโปรตีนได้ถึงร้อยละ 98 Cyanex 923 สามารถสกัดโปรตีนได้เกินร้อยละ 98 ตั้งแต่ร้อยละ 2 ขึ้นไป ฉะนั้นในการสกัดโปรตีนจึงเลือกใช้ Aliquat 336 หรือ Cyanex 923 ในสัดส่วนร้อยละ 4 ถึง 10 ดังรูป 4.2



รูปที่ 4. 2 แสดงผลการสกัดโปรตีนของสารสกัดชนิดต่างๆ ปริมาตรต่างๆ ในตัวทำละลายโครซีน ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ผลการทดลองของสารหนู ปรากฏว่ามีเพียงร้อยละ 10 ของสารสกัด Cyanex 923 ในตัวทำละลายโครซีนและน้ำมันถั่วเหลืองกับสารสกัด Aliquat 336 ในตัวทำละลายโครซีนเท่านั้นที่สามารถสกัดได้และแต่ได้สูงสุดเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น ดังรูป 4.3

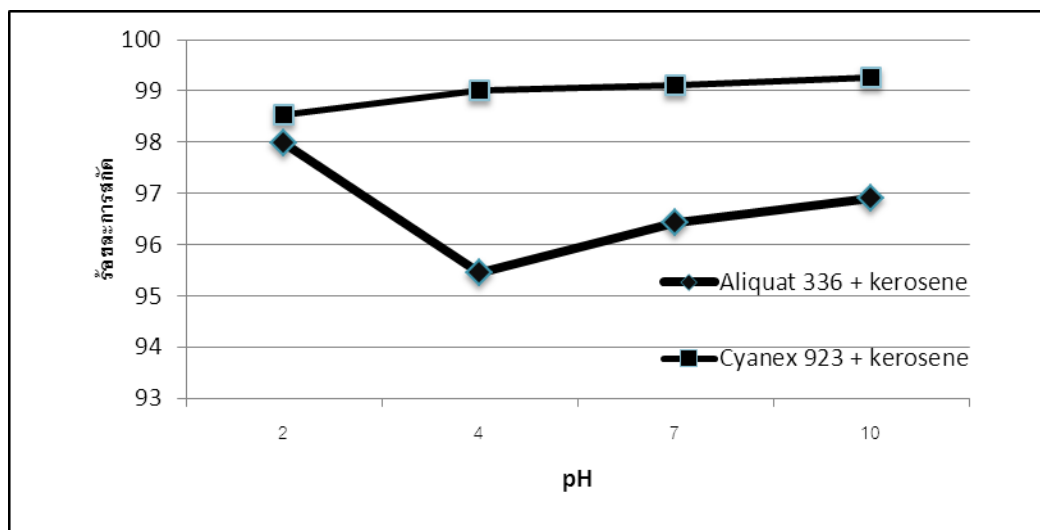


รูปที่ 4.3 แสดงค่าการสกัดปรอทและสารหนูของสารสกัดชนิดต่างๆในสัดส่วนร้อยละ 10 ของสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีนด้วยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย

4.3 ผลของพีเอชในสารละลายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อ การสกัดปรอทและสารหนู

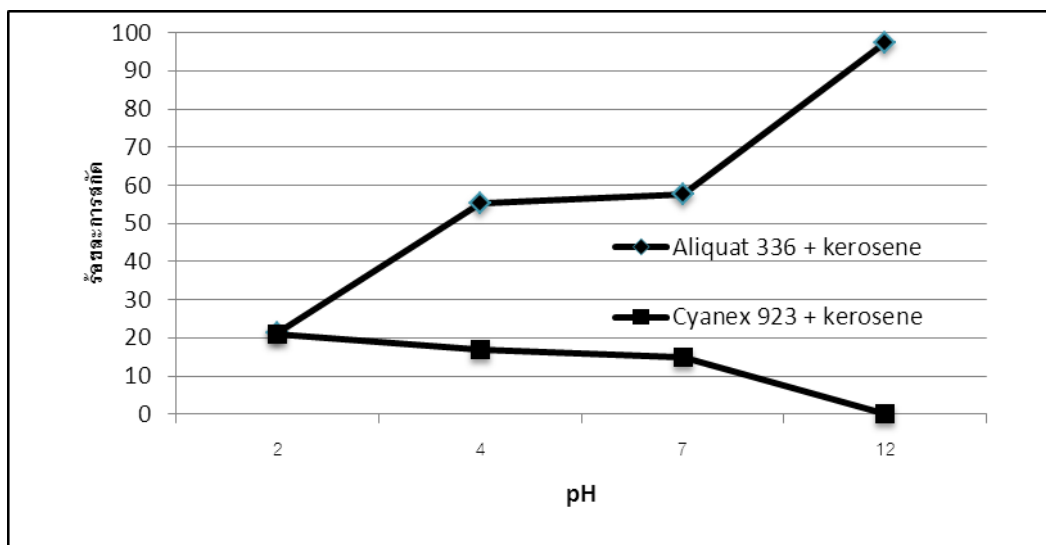
การศึกษานี้เพื่อหาชนิดและปริมาณของสารสกัดที่เหมาะสมกับตัวทำละลายในการสกัดปรอทและสารหนู การทดลองนี้เลือกปรับค่าของพีเอชในสารละลายป้อนตั้งแต่ 2, 4, 7 และ 10 นำมาผ่านวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยเลือกสารสกัดเป็น Aliquat 336 กับ Cyanex 923 ร้อยละ 10 โดยปริมาณในตัวทำละลายเคโรซีน เนื่องจากผลการทดลองที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าสามารถสกัดปรอทได้ดีแต่มีปัญหาอยู่ที่การสกัดสารหนูที่แทบไม่สามารถสกัดได้เลย

ผลศึกษาการสกัดปรอทมีความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ส่วนในพันล้านส่วนที่ค่าพีเอชต่างๆกัน เมื่อใช้ Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน พบว่าสกัดปรอทได้ดีที่สุดในสภาวะที่เป็นกรดแก่ (พีเอช 2) และค่าการสกัดลดลงเรื่อยๆเมื่อความเป็นกรดลดลง (พีเอชสูงขึ้น) และสามารถสกัดได้สูงขึ้นอีกครั้งในสภาวะที่เป็นกลางและเบส (พีเอชมากกว่า 7) เมื่อใช้ Cyanex 923 เป็นสารสกัดพบว่า ค่าการสกัดค่อนข้างเสถียรและการสกัดมากกว่าร้อยละ 98 จากผลการทดลองนี้ทำให้เราพอสรุปได้ว่าปรอทในช่วงสภาวะกรดปรอทอยู่ในรูปของ $Hg(NO_3)_2$ หรือ $Hg(NO_3)_4^{2-}$ เพราะทั้ง 2 เอมอนี้สามารถสกัดด้วยสารสกัดชนิดกลาง (Cyanex 923) ได้และส่วนใหญ่ควรอยู่ในรูป $Hg(NO_3)_2$ เพราะสารสกัดชนิดกลางสามารถสกัดรูปนี้ได้ดีกว่าสารสกัดชนิดเบส (Aliquat 336) ที่สกัดได้ดีเฉพาะ $Hg(NO_3)_4^{2-}$ เท่านั้น (หัวข้อ 2.7.3 และ 2.7.4) ดังรูป 4.4



รูปที่ 4. 4 แสดงค่าการสกัดปรอทของสารสกัด Aliquat 336 และ Cyanex 923 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีนที่ค่าพีเอชต่างๆ โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย

ผลศึกษาการสกัดสารหนูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1,000 ส่วนในพันล้านส่วน แล้วเปลี่ยนค่าพีเอชจากกรดไปจนถึงเบสในสารละลายป้อน พบว่า สารสกัดชนิดกลาง (Cyanex 923) ในช่วงที่เป็นกรดสามารถสกัดสารหนูได้ประมาณร้อยละ 20 และเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น สกัดสารหนูได้ลดลงจนสถานะที่เป็นเบสจัด (พีเอช 12) ไม่สามารถสกัดสารหนูได้เลย ในทางตรงกันข้ามสารสกัดชนิดเบส (Aliquat 336) สามารถสกัดสารหนูได้ร้อยละ 20 ที่สถานะที่เป็นกรดแต่สามารถสกัดสารหนูได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อความเป็นเบสเพิ่มขึ้น (พีเอชลดลง) และในสถานะที่เป็นเบสจัด (พีเอช 12) สารสกัดชนิดเบสสามารถสกัดสารหนูได้มากที่สุดถึงร้อยละ 97.47 ทั้งนี้พบว่า สารหนูมีการเปลี่ยนรูปเป็นไปตามทฤษฎีการเปลี่ยนรูปของสารหนูในสถานะที่ค่าพีเอชต่างกัน [43] ในสถานะที่เป็นกรดสารหนูอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ (H_3AsO_4) และเมื่อความเป็นเบสเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนรูปไปโดยได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ทำให้มีประจุลบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ คือ $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$, AsO_4^{3-} ตามลำดับ โดยทฤษฎีของสารสกัดชนิดเบสเมื่อค่าประจุลบยิ่งมากการสกัดด้วยสารสกัดชนิดเบสอย่าง Aliquat 336 ก็ยิ่งสกัดได้ดีขึ้นมาก ดังแสดงในรูป 4.5



รูปที่ 4. 5 แสดงค่าการสกัดสารหนูโดยเปรียบเทียบสารสกัด Aliquat 336 และ Cyanex 923 ใน ปริมาตรร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีนที่ค่าพีเอชต่างๆ โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย

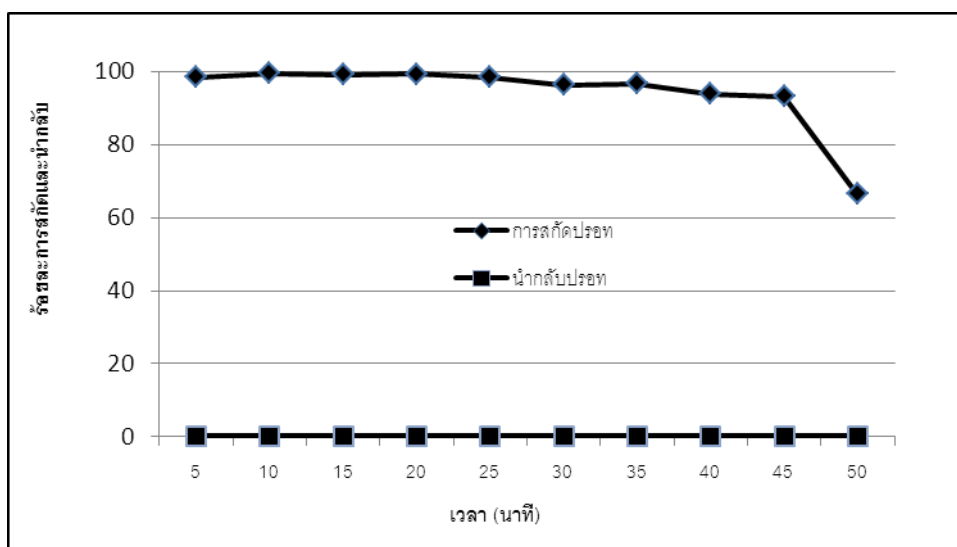
จากผลการทดลองนี้พบว่า การสกัดปรอทโดยใช้สารสกัดชนิดกลางอย่าง Cyanex 923 สกัด ปรอทได้สูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งในทุกๆพีเอชแต่ Aliquat 336 สามารถสกัดปรอทได้เกินมาตรฐาน ในสภาวะที่เป็นกรดแก่กับเบสแก่เท่านั้น ส่วนสารหนู พบว่า Aliquat 336 สามารถสกัดสารหนู มากกว่า Cyanex 923 ในทุกพีเอช โดยเฉพาะในช่วงที่เป็นเบสแก่ (พีเอช12) Aliquat 336 สามารถ สกัดได้สูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้นในการสกัดปรอทและสารหนูจากน้ำเสียปนเปื้อนโดยใช้โมดูลของเส้นใย กลวง (ทั้งระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบ สัมผัส) จึง เลือกใช้ Aliquat 336 เป็นสารสกัดโดยใช้ปริมาตรร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน

4.4 ผลการสกัดและนำกลับปรอทและสารหนูด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้ใช้ปรอทและสารหนูที่ความเข้มข้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วน ตามลำดับ สารสกัดที่ถูกตรึงอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวคือ Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยเลือกใช้อัตราการไหลในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที การทดลองนี้ผู้วิจัยเลือกทดลองที่ความแตกต่างของกรดและเบสในสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการสกัดและนำกลับ โดยเลือกปรับสภาวะที่เป็น กรดด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และปรับสภาวะที่เป็นเบสโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทั้งในฝั่ง ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ โดยการทดลองในขั้นตอนนี้กำหนดไว้ 5 สภาวะได้แก่

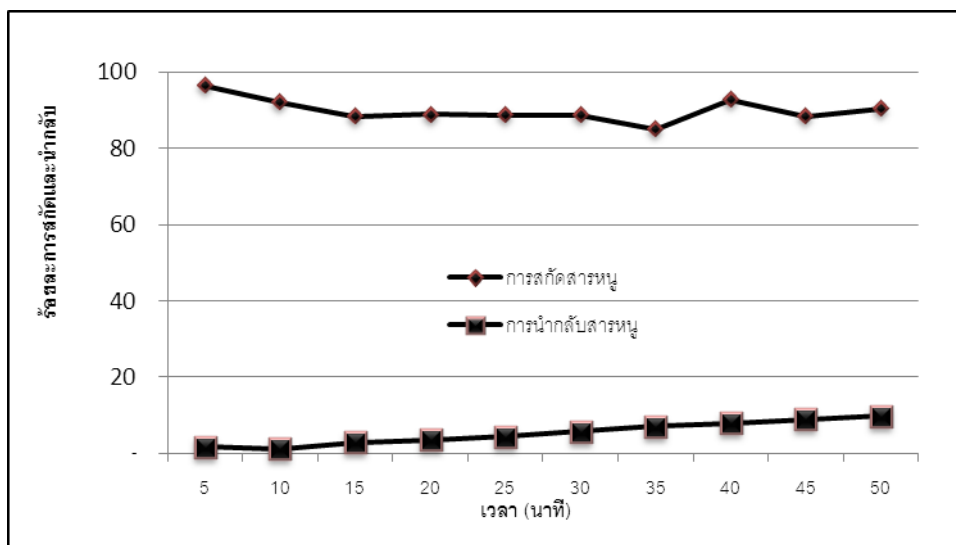
4.4.1 ผลการสกัดในสถานะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นเบส

จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นเบส ปรอทในช่วงแรกสามารถสกัดสูงกว่าค่ามาตรฐาน แต่เมื่อผ่านไป 30 นาทีพบว่าค่าการสกัดปรอทต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ด้านการนำกลับพบว่าปรอทไม่สามารถนำกลับได้เลย ดังรูป 4.6



รูปที่ 4. 6 แสดงค่าการสกัดและนำกลับปรอทในสารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในสถานะที่สารละลายป้อนเป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นเบส

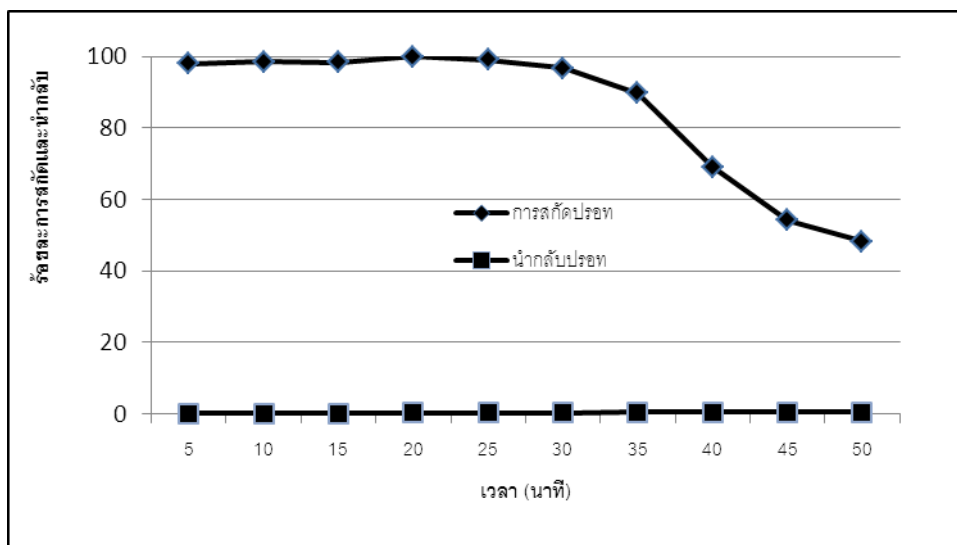
กรณีของสารหนูในสถานะที่สารละลายป้อนเป็นเบสตลอดเวลา 50 นาทีที่ทำการทดลองสามารถสกัดสารหนูได้เกินค่ามาตรฐานและค่าก็ยังมีแนวโน้มคงที่ต่อไปเรื่อยๆ ส่วนการนำกลับนั้นมีความแนวโน้มที่กำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังรูป 4.7



รูปที่ 4. 7 แสดงค่าการสกัดและนำกลับสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นเบส

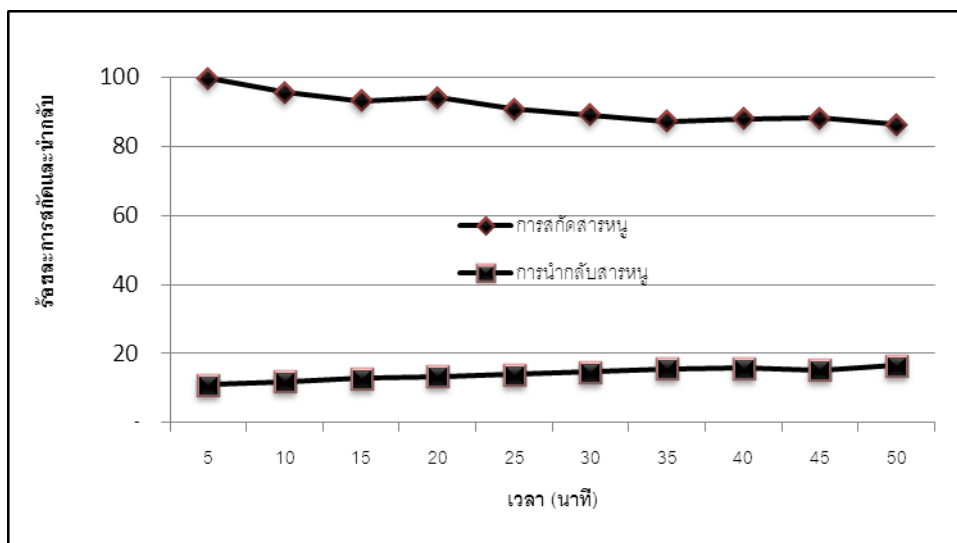
4.4.2 ผลการสกัดในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นกรด

จากการศึกษาพบว่าในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นเบส พรอทสามารถสกัดได้เกินค่ามาตรฐานแค่ 30 นาทีเท่านั้นแล้วหลังจากนั้นค่าการสกัดก็ตกลงอย่างรวดเร็ว ส่วนสารละลายนำกลับที่เป็นกรดก็ไม่สามารถนำกลับพรอทได้เลยเป็นไปได้อย่างไรในการสกัดพรอทที่สภาวะสารละลายป้อนเป็นเบสไม่เหมาะกับการใช้ Aliquat 336 แม้ว่าสกัดได้เกินมาตรฐานแต่ก็ทำได้แค่ช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น ดังรูป 4.8



รูปที่ 4. 8 แสดงค่าการสกัดและนำกลับปรอทโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นกรด

การสกัดสารหนูในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นกรดนั้นพบว่าตลอดเวลา 50 นาทีที่ทำการทดลองสามารถสกัดสารหนูได้เกินค่ามาตรฐานและแม้ว่าค่าแนวโน้มตกลงเล็กน้อยแต่เชื่อว่าสามารถสกัดต่อไปเรื่อยๆ โดยที่ค่าการสกัดที่ได้ยังคงสูงกว่ามาตรฐาน ส่วนการนำกลับนั้นค่าการนำกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากผลการทดลองพบว่าการที่เลือกใช้ Aliquat 336 สกัดสารหนูในสภาวะที่เป็นเบสนั้นเหมาะสมทั้งยังทำให้การนำกลับมีค่าที่เพิ่มขึ้น ดังรูป 4.9

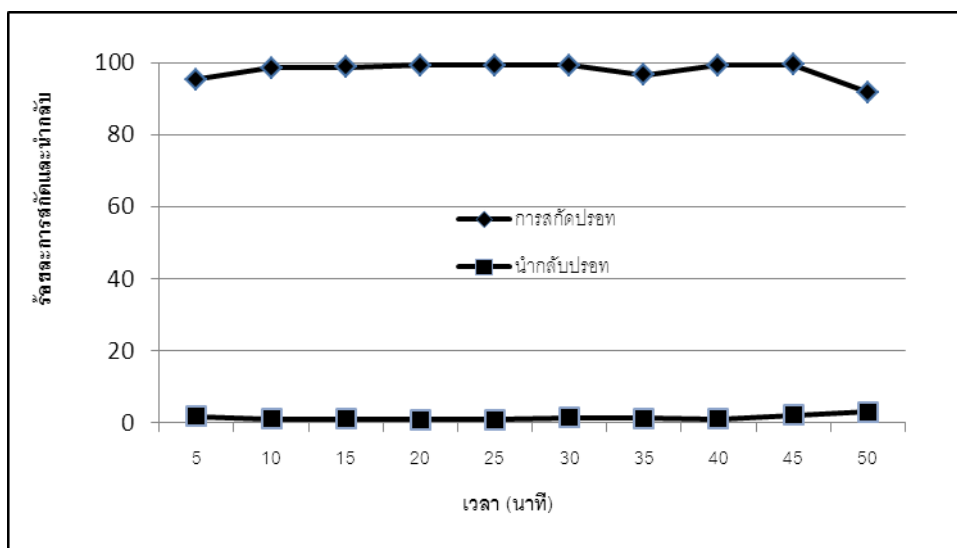


รูปที่ 4. 9 แสดงค่าการสกัดและนำกลับสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นกรด

จากผลการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงใน 2 โมดูลที่ผ่านมา พบว่า ในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นเบสการสกัดปรอทและสารหนูสามารถสกัดได้ในค่าที่สูงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งทั้งคู่ แต่พอเวลาผ่านไปการสกัดปรอทเริ่มตกลงอย่างชัดเจน ส่วนการนำกลับนั้นพบว่า ปรอทไม่สามารถนำกลับได้เลยทั้งนี้อาจเป็นเพราะปรอทอยู่ในรูปที่ไม่เหมาะสมที่นำกลับคือ เมื่อสารละลายป้อนที่เป็นเบสปรอทอยู่ในรูปของ $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Hg}(\text{OH})_4^{2-}$ เพราะเป็นเบสแก่มีปริมาณของไฮดรอกไซด์ (OH^-) อยู่มาก ส่วนฝั่งสารละลายนำกลับนั้นเป็นกรดไนตริก (HNO_3) อยู่มาก ถ้านำกลับต้องอยู่ในรูปของ $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ หรือ $\text{Hg}(\text{NO}_3)_4^{2-}$ โดยปกติปรอทชอบทำปฏิกิริยากับ Cl^- , OH^- มากกว่า NO_3^- ดังนั้นปรอทจึงเลือกที่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์มากกว่าจะมาในฝั่งการนำกลับจึงเป็นเหตุให้ไม่เกิดการนำกลับของปรอทซึ่งทำให้จำนวนโมเลกุลของสารสกัดอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่ค้างอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวจึงส่งผลกระทบต่อทำให้การสกัดปรอทลดลง ส่วนการสกัดและนำกลับสารหนูพบว่าการสกัดสารหนูมีความเสถียรมาก (Stability) เนื่องจากตลอด 50 นาทีสามารถสกัดได้ผ่านเกณฑ์ตลอด ส่วนการนำกลับสารหนูนั้นพบว่า สามารถนำกลับได้และมีค่าแนวโน้มการนำกลับที่สูงขึ้นได้อีก หากพิจารณาพบว่าการนำกลับในโมดูล 2 (ที่สารนำกลับเป็นกรด) ดีกว่าโมดูลแรก (สารสกัดเป็นเบส) เพราะเป็นไปตามกฎของสารสกัดแบบเบสและการถ่ายเทมวลคู่ควบแบบสวนทางกัน ที่ว่าถ้าใช้สารละลายป้อนเป็นเบสนั้นฝั่งสารละลายนำกลับต้องมีความเป็นกรด (H^+) มากกว่าฝั่งสารละลายป้อนเพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลซึ่งเหตุการณ์นี้ตรงกับโมดูลที่ 2 ส่วนโมดูลแรกนั้นการที่ฝั่งสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้การถ่ายเทมวลไม่ดีเท่าจึงส่งผลให้การนำกลับในโมดูลที่ 2 ดีกว่าโมดูลแรก

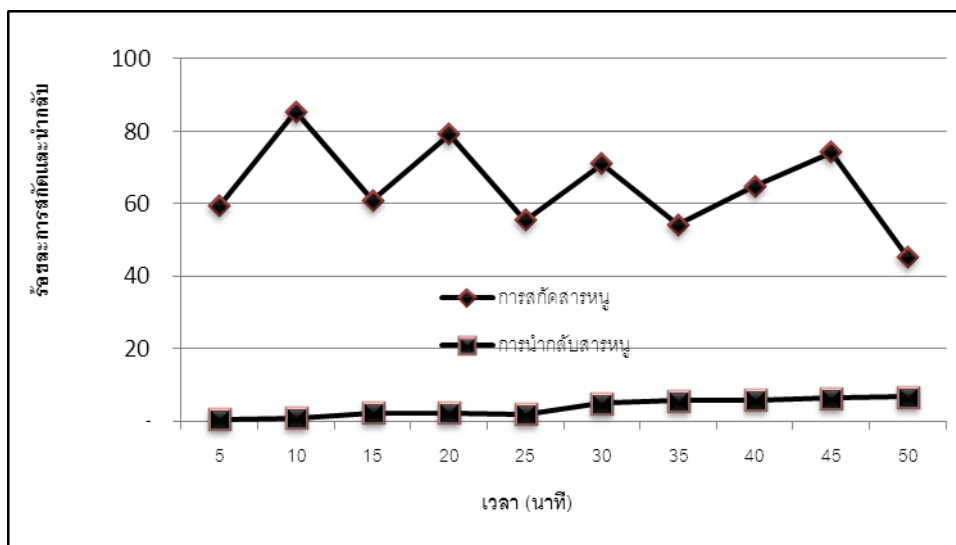
4.4.3 ผลการสกัดในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรดและสารละลายนำกลับเป็นเบส

จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรด พรอทสามารถสกัดได้เกินค่ามาตรฐานในช่วงตั้งแต่ 10-45 นาที พบว่าช่วงแรกนั้นพรอทใช้เวลาเกิน 5 นาทีจึงสกัดผ่านเกณฑ์และอยู่ได้ถึงนาทีที่ 45 ก็ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนสารละลายนำกลับที่เป็นเบสสามารถนำกลับได้บ้างและเริ่มมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ดังรูป 4.10



รูปที่ 4. 10 แสดงค่าการสกัดและนำกลับพรอทโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรดและสารละลายนำกลับเป็นเบส

การสกัดสารหนูในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรดตลอด 50 นาทีที่ทำการทดลองค่าการสกัดเกิดการแกว่งตลอดการทดลอง ส่วนการนำกลับนั้นมีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังรูป 4.11

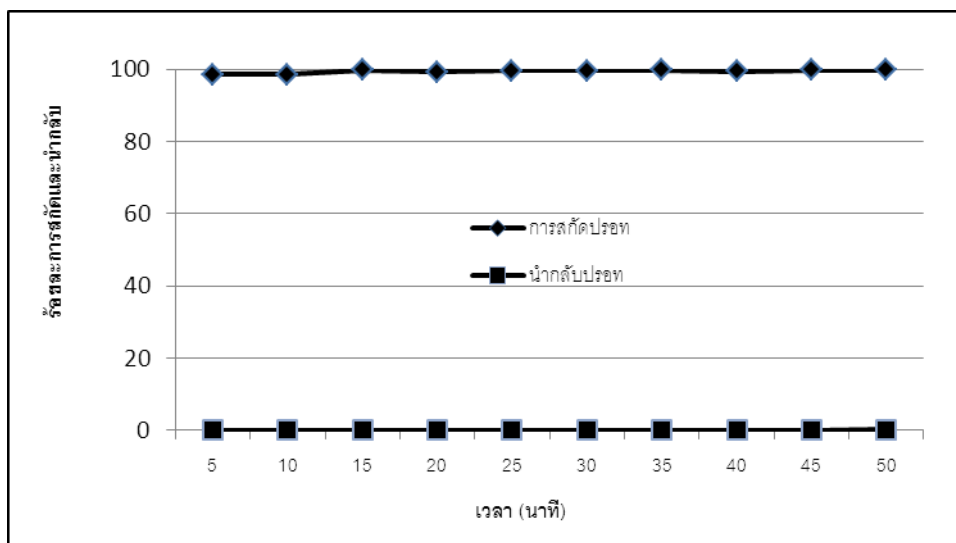


รูปที่ 4. 11 แสดงค่าการสกัดและนำกลับสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรดและสารละลายนำกลับเป็นเบส

ในโมดูลที่ 3 สภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรดนั้นปรอทอยู่ในรูปของ $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ หรือ $\text{Hg}(\text{NO}_3)_4^{2-}$ ทั้งนี้สารสกัด Aliquat 336 สามารถสกัดปรอทในรูปแบบนี้ได้จึงทำให้ค่าการสกัดคงที่ตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ส่วนการนำกลับนั้นที่ปรอทถูกนำกลับได้เป็นเพราะสารละลายทั้ง 2 ฝั่งมีความเป็นกรด เบสที่ต่างกันจึงทำให้มีแรงผลักดันที่ทำให้เกิดการนำกลับได้และอาจเป็นการยืนยันอีกนัยว่า ปรอทชอบ OH^- (ที่อยู่ในฝั่งสารละลายนำกลับ) มากกว่า NO_3^- ส่วนการสกัดสารหนูที่มีค่าแกว่งนั้นอาจเป็นเพราะ ช่วงพีเอชที่ปรับเลยค่า pKa แรกทำให้ในสารละลายป้อนมีทั้ง H_2AsO_4 และ H_2AsO_4^- ปนกันอยู่ สารสกัดที่เลือกเป็นสารสกัดชนิดเบสที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับ H_2AsO_4^- ได้ดีกว่า H_3AsO_4 แต่ในสารละลายป้อนมีทั้ง 2 ชนิดปนกันอยู่จึงทำให้ค่าการสกัดเกิดการแกว่ง ส่วนการนำกลับสารหนุนั้นสามารถนำกลับได้แต่ไม่มาก

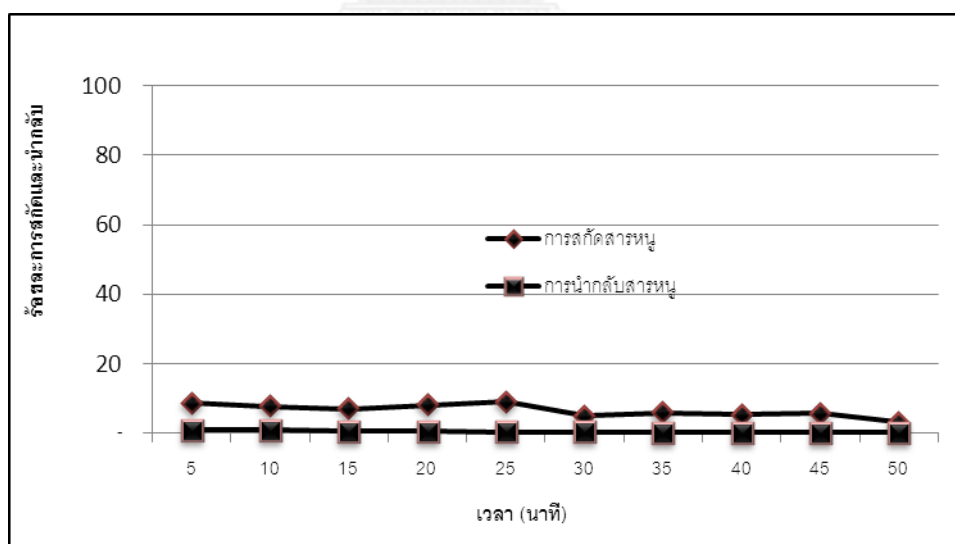
4.4.4 ผลการสกัดในสภาวะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นกรด

จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นกรด ปรอทสามารถสกัดได้เกินค่ามาตรฐานตลอด 50 นาทีแล้วค่าก็มีแนวโน้มที่คงที่มากที่สุดด้วย ในขณะที่การนำกลับนั้นไม่สามารถทำได้เลย ดังรูป 4.12



รูปที่ 4. 12 แสดงค่าการสกัดและนำกลับปรอทโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรด และสารละลายนำกลับเป็นกรด

จากการทดลองที่สารหนูในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรดตลอด 50 นาทีค่าการสกัดที่ได้ไม่เกินร้อยละ 10 และการนำกลับก็ไม่เกินร้อยละ 2 ซึ่งสภาวะที่เป็นกรดนั้นไม่เหมาะสมที่จะสกัดสารหนูเลย ดังรูป 4.13

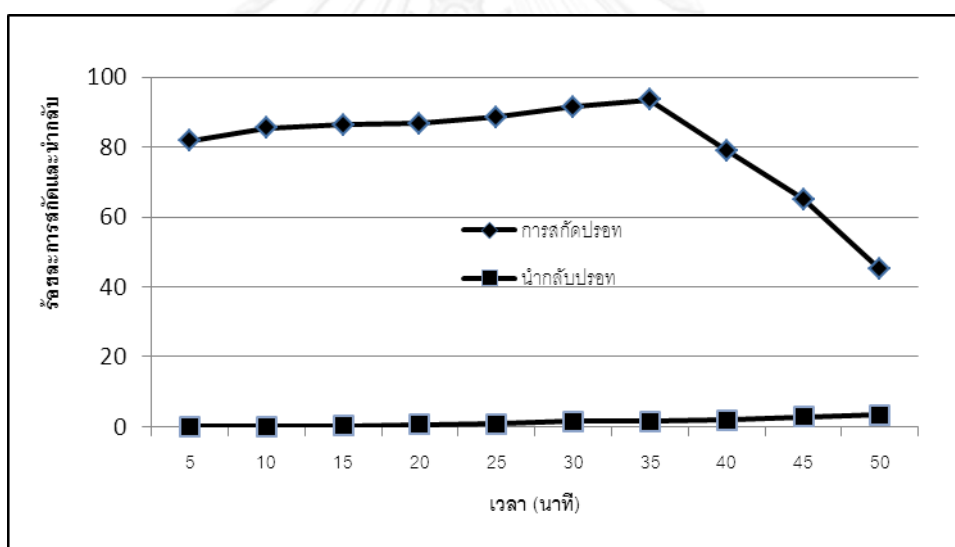


รูปที่ 4. 13 แสดงค่าการสกัดและนำกลับสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรด และสารละลายนำกลับเป็นกรด

ในโมดูลที่ 4 พรอทนั้นถูกสกัดได้เกินมาตรฐานและมีความเสถียรมากตลอด 50 นาที เนื่องจากอยู่ในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรด แต่ก็ไม่สามารถนำกลับได้ ส่วนสารหนูสกัดได้น้อยมากทั้งนี้ เป็น เพราะสารหนูส่วนมากอยู่ในรูปของ H_3AsO_4 ซึ่งเป็นรูปแบบที่สารสกัดชนิดเบสทำการสกัดได้น้อยจึงทำให้การนำกลับน้อยตามไปด้วย

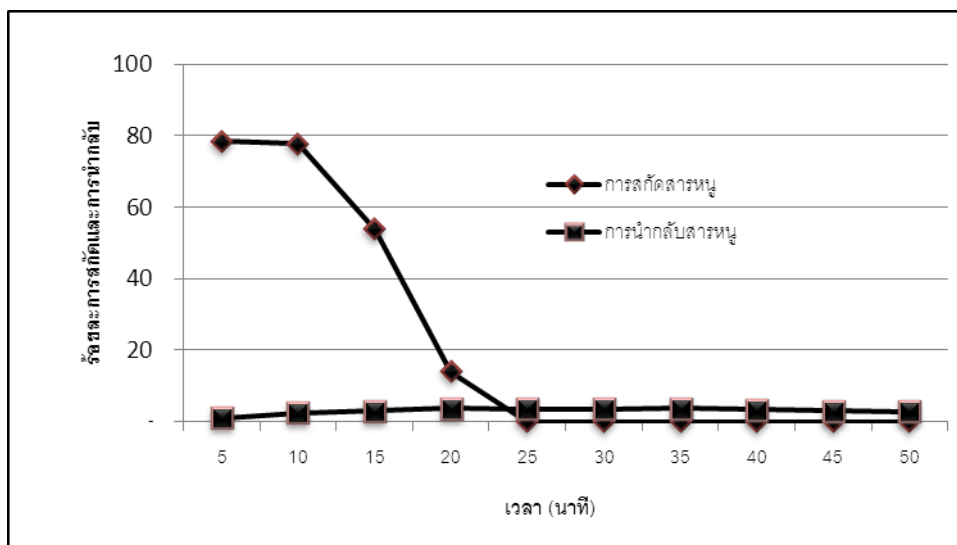
4.4.5 ผลการสกัดในสภาวะที่สารละลายป้อนมีพีเอชเท่าน้ำเสียปนเปื้อนและสารละลายนำกลับเป็นน้ำ

จากการศึกษาพบว่า เมื่อสารละลายป้อนใช้สภาวะของน้ำเสียปนเปื้อน (พีเอชประมาณ 8) และใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ พรอทสามารถสกัดได้แต่ได้ค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐานตลอด 50 นาทีแล้ว ค่าก็มีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อยๆเมื่อเวลาผ่านไปนานๆ ส่วนการนำกลับนั้นไม่สามารถทำได้ ดังรูป 4.14



รูปที่ 4. 14 แสดงค่าการสกัดและนำกลับพรอทโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยที่ไม่ปรับสภาวะของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

เมื่อปรับสภาวะสารละลายป้อนตามแบบน้ำเสียปนเปื้อนและใช้น้ำ DI เป็นสารละลายนำกลับพบว่า ค่าการสกัดทำได้เกินมาตรฐานในช่วง 10 นาทีแรกจากนั้นค่าก็เริ่มลดลงเรื่อยๆจนเมื่อผ่านไป 25 นาทีไม่สามารถสกัดสารหนูได้เลย ส่วนการนำกลับก็ไม่เกินร้อยละ 5 เนื่องจากสารหนูที่เริ่มสกัดไม่ได้ในช่วงท้าย ดังรูป 4.15



รูปที่ 4. 15 แสดงค่าการสกัดและนำกลับสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยที่ไม่ปรับสภาวะของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

จากผลการทดลองทั้ง 5 โมดูลนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่า โปรทถูกสกัดได้ดี ที่สภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรด ส่วนการนำกลับของโปรทนั้น ทำได้ต่ำมากหรือทำไม่ได้เลยถ้าหากสารละลายป้อนไม่อยู่ในสภาวะกรดและสารละลายนำกลับไม่อยู่ในสภาวะเบส ด้านสารหนูถูกสกัดได้ดีเมื่อสารละลายป้อนอยู่ในสภาวะที่เป็นเบส สารหนุนั้นไม่ว่าอยู่ในสภาวะใดหากสามารถสกัดได้ก็สามารถนำกลับได้ แต่หากจะสกัดและนำกลับได้ดีที่สุดนั้น สารละลายป้อนต้องอยู่ในสภาวะเบสและสารละลายนำกลับต้องอยู่ในสภาวะกรด ทั้งนี้เหตุผลเนื่องมาจากในสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นกรดโปรทอยู่ในรูป $\text{Hg}(\text{NO}_3)_4^{2-}$ ทำให้ถูกสกัดด้วย Aliquat 336 ได้ดี แต่สารหนูในรูป H_3AsO_4 ซึ่ง Aliquat 336 สามารถสกัดออกมาน้อยจึงทำให้สภาวะกรดนี้เสมือนกับเป็นการสกัดเฉพาะโปรทเท่านั้น แต่เมื่อปรับสภาวะที่สารละลายป้อนเป็นเบสโปรทควรอยู่ในรูป $\text{Hg}(\text{OH})_4^{2-}$ ซึ่งสามารถถูกสกัดด้วย Aliquat 336 ได้ขณะเดียวกันต้องแข่งขันกับสารหนูที่อยู่ในรูป AsO_4^{3-} ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับ Aliquat 336 ได้เช่นกัน และเมื่อพิจารณาว่าการนำกลับพบว่าโปรทแทบไม่เกิดการนำกลับเลยส่วนสารหนุนั้นถึงนำกลับได้แต่ค่าการนำกลับก็ไม่เกินร้อยละ 20 จึงทำให้เกิดการสูญเสียสารสกัดที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว โดยสารสกัดที่สูญเสียเกิดจากการที่โปรทและสารหนูบางส่วนยังทำปฏิกิริยากับสารสกัดและยังคงอยู่ในรูปสารประกอบที่ยังค้างอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวทำให้ไม่มีสารสกัดไปรับโปรทและสารหนูจากฝั่งสารละลายป้อนจึงส่งผลให้ช่วงท้ายของการสกัดโปรทและสารหนูค่าการสกัดลดลงเรื่อยๆ หากพิจารณาผลทั้ง 5 โมดูลนี้พบว่า ในสภาวะที่ละลายป้อนเป็นเบส ส่วนสารละลายนำกลับไม่ว่าเป็นกรดหรือเบสก็สามารถสกัดโปรทและสารหนูได้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งแค่

30 นาทีเท่านั้นจึงไม่คุ้มทุนที่ลงทุน ดังนั้นจึงต้องหาวิธีแก้ไขปัญหาที่ทำให้สามารถสกัดปรอทและสารหนูได้เป็นเวลานานๆ

วิธีแก้ปัญหาก็ทำให้การสกัดปรอทและสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงมีความเสถียรและเหมาะที่นำไปใช้งานที่ผู้วิจัยแนะนำ คือ

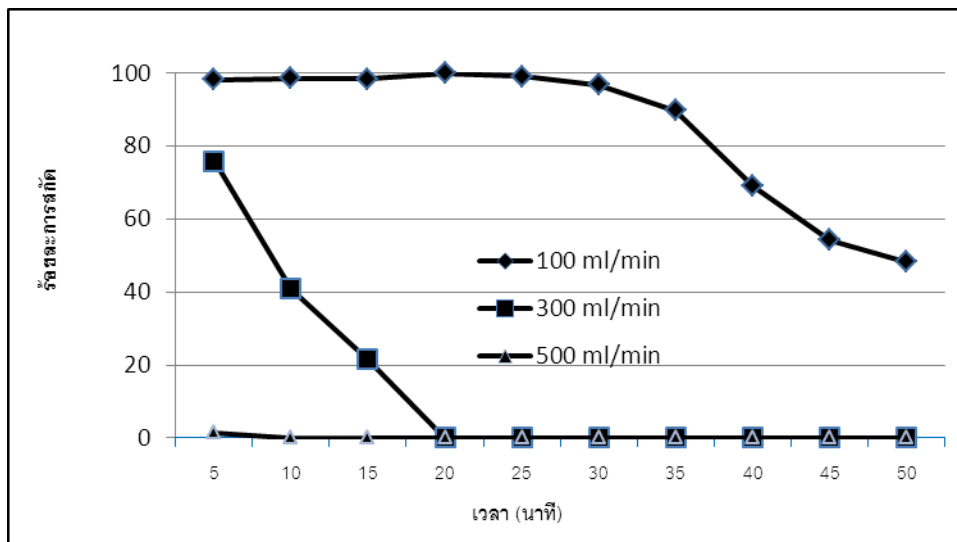
1. ผังสารละลายป้อนควรเป็นสภาวะเบสเหมือนเดิมแต่ผังสารละลายนำกลับต้องหาสารนำกลับชนิดใหม่ที่ใช้ร่วมกับ Aliquat 336 แล้วสามารถนำกลับปรอทและสารหนูได้ดีขึ้น
2. ทำให้สารละลายป้อนไหลอยู่ในโมดูลเส้นใยกลวงได้นานขึ้นเพื่อให้มีเวลาสำหรับการสกัดและนำกลับ ซึ่งทำได้หลายวิธีเช่น เปลี่ยนโมดูลของเส้นใยกลวงให้มีขนาด (ความยาว) ที่มากขึ้น หรือ ปรับอัตราการไหลในการไหลของผังสารละลายป้อนให้ต่ำลง (ข้อควรระวัง วิธีนี้หากปรับให้ช้ามากทำให้แรงดันของปั๊มไม่พอที่ทำให้สารละลายป้อนไหล)
3. ใช้การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ โดยการนำสารสกัด Cyanex 923 ที่สามารถสกัดปรอทได้ดีในทุกสภาวะมาผสมกับ Aliquat 336 ที่สกัดสารหนูได้ดีโดยต้องหาอัตราส่วนการผสมที่สกัดได้ดีที่สุด
4. เลือกใช้สารปรับสภาวะตัวอื่นเช่น เดิมใช้กรดไนตริกในการปรับเพื่อเปลี่ยนปรอทให้อัตราการไหลอยู่ในรูป $Hg(NO_3)_2$ แล้วสกัดและนำกลับไม่ดี ก็เปลี่ยนมาใช้กรดไฮโดรคลอริกปรับให้อยู่ในรูปของ $HgCl_4^{2-}$ ซึ่งในงานวิจัย [20,35] ยืนยันว่าสามารถสกัดและนำกลับปรอทได้เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์

4.5 ผลการทดลองการสกัดปรอทและสารหนูเมื่อให้เปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองนี้เลือกใช้ปรอทและสารหนูที่ความเข้มข้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ สารสกัดที่ถูกต้องอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวคือ Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยกำหนดพีเอชของสารละลายป้อนเป็นเบส (พีเอช 12) และสารละลายนำกลับเป็นกรด (พีเอช 2) การทดลองนี้ผู้วิจัยเลือกทดลองที่ความแตกต่างของอัตราการไหลในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100, 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการสกัดและนำกลับกับระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

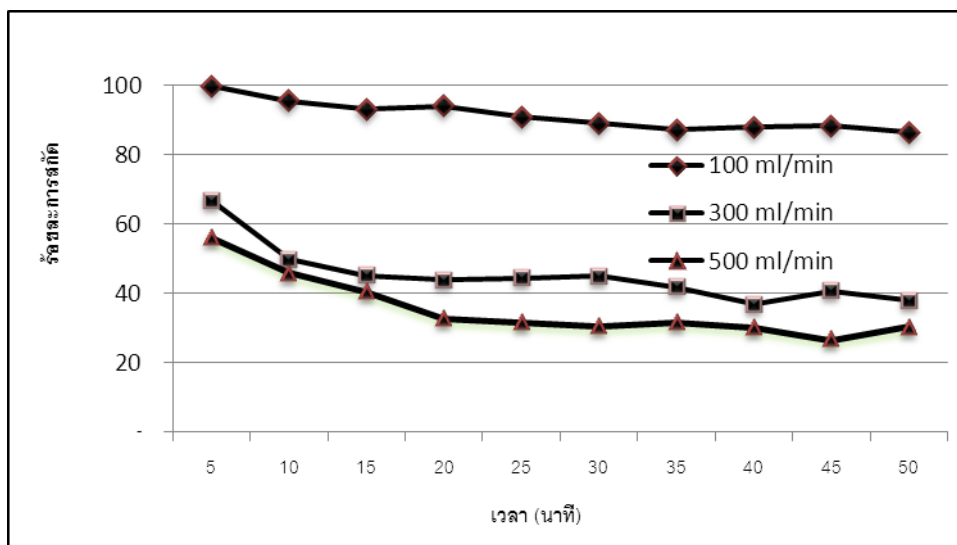
ผลการสกัดปรอทที่อัตราการไหลต่างๆพบว่า อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที ปรอทสามารถสกัดได้เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ในช่วงแรกและค่าเริ่มตกลงเรื่อยๆจนเวลาผ่านไป 30 นาทีค่าการสกัดที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐาน อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที ใน 5 นาทีแรกสกัดได้เกือบร้อยละ 80 และค่าเริ่มตกลงเรื่อยๆและเมื่อผ่านไป 20 นาทีก็ไม่สามารถสกัดได้อีกเลย ส่วนอัตราการไหล 500

มิลลิลิตรต่อนาที แทบไม่สามารถสกัดปรอทได้เลย ในขณะที่การนำกลับปรอทไม่ว่าอัตราการไหลใดก็ไม่สามารถนำกลับปรอทได้เลย ดังรูป 4.16



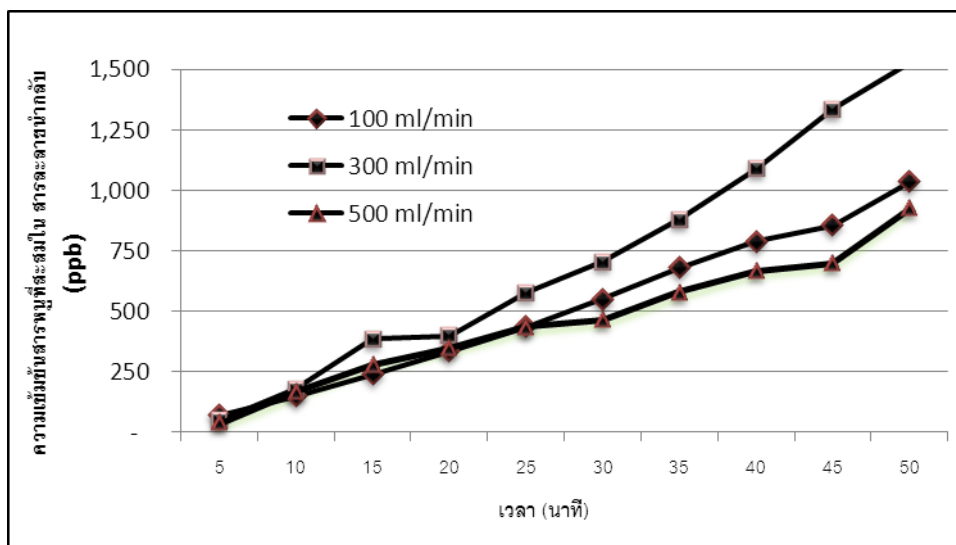
รูปที่ 4. 16 แสดงค่าการสกัดปรอทโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่อัตราการไหลสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่างๆ

ผลการสกัดสารหนูที่อัตราการไหลต่างๆ โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงพบว่า ที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที สารหนูสามารถสกัดได้ดีที่สุดและค่าที่สกัดได้ตลอด 50 นาทีสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนที่อัตราการไหล 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาทีสามารถสกัดสารหนูได้แต่สกัดได้น้อยกว่าที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและค่าที่ 2 อัตราการไหลนี้สกัดได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานซึ่งไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ดังรูป 4.17



รูปที่ 4. 17 แสดงค่าการสกัดสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่อัตราการไหลสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่างๆ

ผลการนำกลับสารหนูแสดงในรูปของความเข้มข้นที่พบในถังของสารละลายนำกลับพบว่า ที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถนำกลับได้สูงกว่า 1,500 ppb ที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาทีนำกลับได้มากกว่า 1,000 ppb นอกจากนี้แนวโน้มค่าความเข้มข้นการนำกลับของทั้ง 3 อัตราการไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นได้อีก ดังรูป 4.18



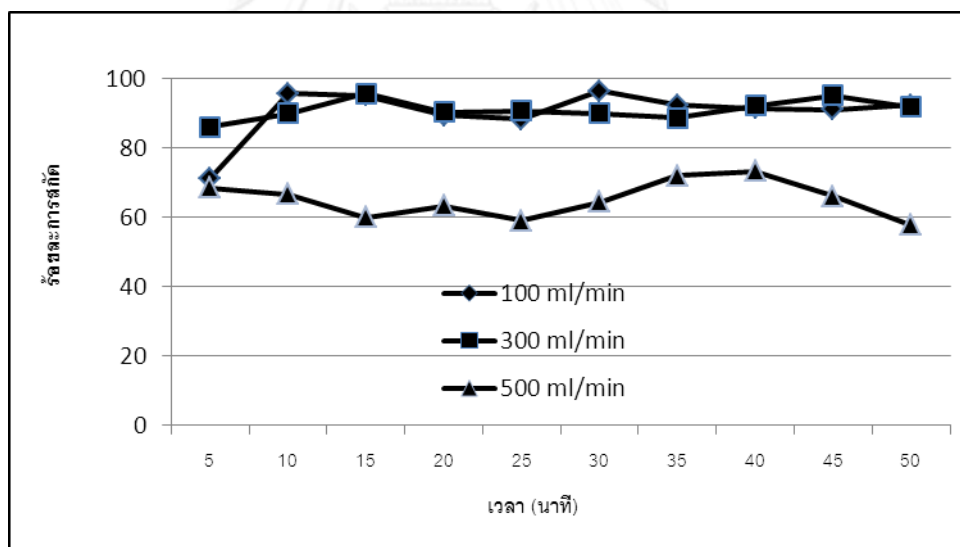
รูปที่ 4. 18 แสดงค่าการนำกลับสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่อัตราการไหลสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่างๆ

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลในการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในสถานะที่สารสกัดเป็น Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายป้อนปรับพีเอชเป็นเบสโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แล้วสารละลายนำกลับที่ปรับด้วยกรดไนตริก (HNO_3) พบว่าปรอทและสารหนูถูกสกัดได้ดีที่สุด ที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและการสกัดลดลงเรื่อยๆเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงตรงสารให้อยู่ในรูพรุน ทันทีที่มีการไหลสารสกัดสัมผัสกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับทั้ง 2 ฟัง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการสัมผัสระหว่างสารป้อนและสารละลายนำกลับกับสารสกัดยิ่งลดลงแล้วส่งผลให้ค่าการสกัดลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้ในส่วนการนำกลับพบว่าสารหนูนำกลับได้ดี แต่ปรอทไม่สามารถนำกลับได้ เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของการนำกลับที่เกินกว่าค่าความเข้มข้นที่พบในสารละลายป้อน (1,000 ส่วนในพันล้านส่วน) ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้เป็นจุดเด่นของรูปแบบปฏิบัติการแบบที่สารละลายนำกลับไหลวนและสารละลายป้อนไหลผ่าน (Semi-Batch Strip Operation Mode) วิธีนี้ทำให้ค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับสูงกว่าสารละลายป้อนได้ ตามทฤษฎีค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงจุดอิ่มตัวของสารนั้น (จุดที่สารละลายนำกลับไม่สามารถรับปรอทหรือสารหนูเพิ่มขึ้นได้อีก) ซึ่งความคุ้มค่าของรูปแบบปฏิบัติการนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายป้อนถูกกำจัดไปได้มากน้อยแค่ไหนเมื่อเทียบกับปริมาณสารละลายนำกลับที่รองรับปรอทและสารหนูได้ ถ้าอัตราส่วนของปริมาณสารละลายป้อนที่ถูกกำจัดเทียบกับปริมาณสารละลายนำกลับรองรับได้ยิ่งค่านี้มากเท่าใดความคุ้มค่าในการใช้ระบบปฏิบัติการนี้ก็ยิ่งมากเท่านั้น

4.6 ผลการทดลองการสกัดปรอทและสารหนูเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

การทดลองนี้เลือกใช้ปรอทและสารหนูที่ความเข้มข้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ สารสกัดที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นเหลวคือ Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยกำหนดพีเอชของสารละลายป้อนเป็นเบส (พีเอช 12) และสารละลายนำกลับเป็นกรด (พีเอช 2) การทดลองนี้ผู้วิจัยเลือกทดลองที่ความแตกต่างของอัตราการไหลในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100, 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการสกัดและนำกลับกับระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

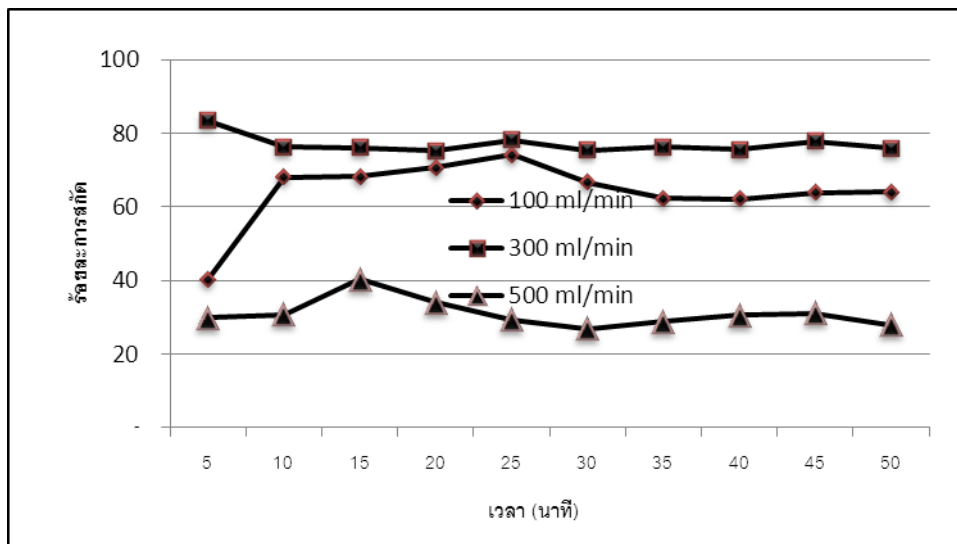
จากการโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสที่อัตราการไหลต่างกันพบว่า ผลการสกัดปรอทที่อัตราการไหล 100 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าที่ใกล้เคียงกันที่ค่าการสกัดร้อยละ 90 ส่วนที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ค่าการสกัดอยู่ที่ร้อยละ 60 ถึง 70 ค่าการสกัดปรอทโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสนี้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ทั้ง 3 อัตราการไหล ส่วนการนำกลับของปรอทนั้นไม่สามารถนำกลับได้เลย ดังรูป 4.19



รูปที่ 4. 19 แสดงค่าการสกัดปรอทโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสโดยใช้อัตราการไหลสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ต่างกัน

การสกัดสารหนูที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าการสกัดค่อยๆเพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นค่าการสกัดก็ตกลงเล็กน้อย ส่วนที่อัตราการไหล 300 และ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าการสกัด

ค่อนข้างคงที่ที่ร้อยละ 80 และ 30 ตามลำดับ จากผลการทดลองเมื่อนำไปเทียบกับค่ามาตรฐานพบว่า มีเพียงอัตราการไหลที่ 300 มิลลิลิตรต่อนาทีเท่านั้นที่เกินค่ามาตรฐาน ดังรูป 4.20



รูปที่ 4. 20 แสดงค่าการสกัดสารหนูโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ร้อยละ 10 ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสที่อัตราการไหลสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่างๆ

ผลการสกัดสารหนูและปรอทโดยใช้ เยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสที่อัตราการไหลต่างๆ พบว่าปรอทที่อัตราการไหล 100 และ 300 มิลลิลิตรต่อนาที มีค่าการสกัดได้สูงใกล้เคียงกันแต่ที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าการสกัดตกลงมาอย่างชัดเจน สารหนูที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถสกัดได้ดีที่สุด รองลงมาคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที สกัดได้ต่ำที่สุด จากการทดลองชุดนี้แสดงให้เห็นว่าในระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสนั้นมีข้อดีในเรื่องของการใช้อัตราการไหลในฝั่งสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่สูงขึ้นได้กว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่สกัดได้ดีที่อัตราการไหลต่ำ (100 มิลลิลิตรต่อนาที) แต่ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสใช้อัตราการไหลได้สูงมากกว่าแค่ระดับหนึ่งคือการทดลองสกัดสารหนูที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ค่าการสกัดที่สูงกว่าที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที อย่างชัดเจน ส่วนการสกัดปรอทที่ 2 อัตราการไหลนี้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการนำกลับในระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสนั้นไม่สามารถนำกลับได้เลย

ฉะนั้นเมื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) กับระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (HFCLM) หากนำมาใช้ในการกำจัด

ปรอทและสารหนูจากน้ำเสียปนเปื้อน ผู้วิจัยขอเลือกที่ใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) ด้วยเหตุผลคือ

1. จำนวนของโมดูลที่ใช้ เมื่อต้องการสกัดและนำกลับปรอทและสารหนูด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) ใช้โมดูลเพียง 1 โมดูล แต่หากใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (HFCLM) ใช้โมดูลถึง 2 โมดูลและจากผลการทดลองพบว่า มีเพียงอัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาทีเท่านั้นที่สามารถสกัดสารหนูได้เกินกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนปรอททุกอัตราการไหลสกัดได้ต่ำกว่าเกณฑ์ในทุกอัตราการไหล ดังนั้นถ้าหากจะใช้โมดูลเส้นใยกลวง 2 โมดูลแนะนำให้ต่อโมดูลเป็นระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) ที่ต่อกันแบบอนุกรมโดยให้โมดูลหนึ่งทำหน้าที่สกัดและนำกลับปรอท (ปรับสารละลายป้อนเป็นกรด) ส่วนอีกโมดูลทำหน้าที่สกัดและนำกลับสารหนู (ปรับสารละลายป้อนเป็นเบส) ซึ่งมีความเสถียรในการสกัดมากกว่าที่ใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (HFCLM) ที่ใช้ 2 โมดูลโดยให้โมดูลแรกทำหน้าที่สกัดและโมดูลที่ 2 ทำหน้าที่นำกลับ

2. ปริมาณสารสกัดที่ใช้ เนื่องจากสารสกัดที่ใช้ในการทดลองนี้มีราคาแพงมาก ในการสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (HFCLM) ต้องใช้ปริมาณสารสกัดถึง 1.5 ลิตรในการสกัด 1 รอบการทดลอง (ขนาดของโมดูล 7.74 x 25.6 cm.) แต่ในการสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) ด้วยโมดูลขนาดเท่ากันหากเตรียมสารสกัดปริมาณ 1 ลิตรใช้ได้ประมาณ 2 – 3 รอบการทดลอง

4.7 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทำนายผลสกัดปรอทและสารหนูในระบบเยื่อแผ่นเหลว

4.7.1 การหาอันดับ (Order) และค่าคงที่ (rate constant) ของการเกิดปฏิกิริยา

การคำนวณหาอันดับและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้วิธีการทำอินทิเกรต (เขียนกราฟ) ที่อาศัยความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของการสกัด (แต่ละอันดับปฏิกิริยามีเทอมที่ต่างกัน) นำมาเขียนกราฟคู่กับเวลาในแกนแนวนอน ส่วนค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยานั้นดูจากค่าความชันของกราฟที่ทำนายผลได้ใกล้เคียงที่สุด การคำนวณของปรอทเลือกใช้ข้อมูลผลของปรอทในโมดูลที่ 4 (สภาวะที่สารละลายป้อนและสารนำกลับเป็นกรด) ที่สกัดได้ดีที่สุด ส่วนสารหนูใช้ข้อมูลผลของโมดูลที่ 2 (สารละลายป้อนเป็นเบสและสารนำกลับเป็นกรด) พบว่า ปรอทเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา คือ 0.911 ต่อนาที ส่วนสารหนูเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 และมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา คือ 0.2152 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4. 1 แสดงการหาค่าอันดับและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

อันดับของการเกิดปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์ของกราฟ	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา		R ²	
		Hg (II)	As (V)	Hg (II)	As (V)
n = 0	Ca / t	33.46	143	0.6814	0.4331
n = 1	ln(Ca ₀ /Ca)/ t	0.911	2.5986	0.9814	0.7507
n = 2	1/Ca / t	0.055	0.2152	0.8031	0.9526

เมื่อทราบว่าการเกิดปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และสารหนูมีค่าอันดับการเกิดปฏิกิริยาอันดับ 2 ดังนั้นจึงต้องหาค่าตัวแปร (พารามิเตอร์) เพื่อมาแทนค่าในแบบจำลองซึ่งค่าตัวแปรที่ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4. 2 แสดงค่าตัวแปรที่นำมาใช้ในแบบจำลองของการสกัดปรอทและสารหนู

ตัวแปร	ค่า	
	ปรอท	สารหนู
n	1	2
Ac (dm ²)	4.5×10^{-6}	4.5×10^{-6}
L (dm)	1.5	1.5
k _f	0.9110 min ⁻¹	0.2152 L/mg min
τ ₀ (min)	6.75×10^{-5}	6.75×10^{-5}
α	6.15×10^{-5}	-
β	-	2.92×10^{-2}
λ (L/mg)	-	0.001
γ (dm ² /mg)	-	-9.68×10^{-6}

4.7.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนูในสารละลายป้อนกับอัตราการไหลของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงกับเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

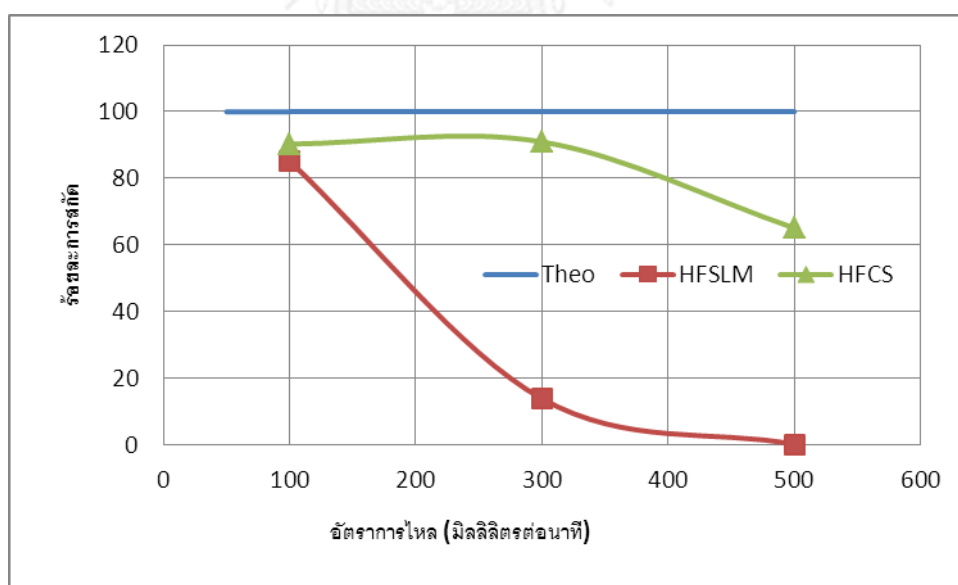
เมื่อนำผลการทดลองที่อัตราการไหลต่างๆของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงกับระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสมาเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลดังนี้

เมื่อทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปรอทผลปรากฏว่าที่ทุกๆอัตราการไหลการสกัดเกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์ทั้งหมด ในขณะที่การสกัดปรอทด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่

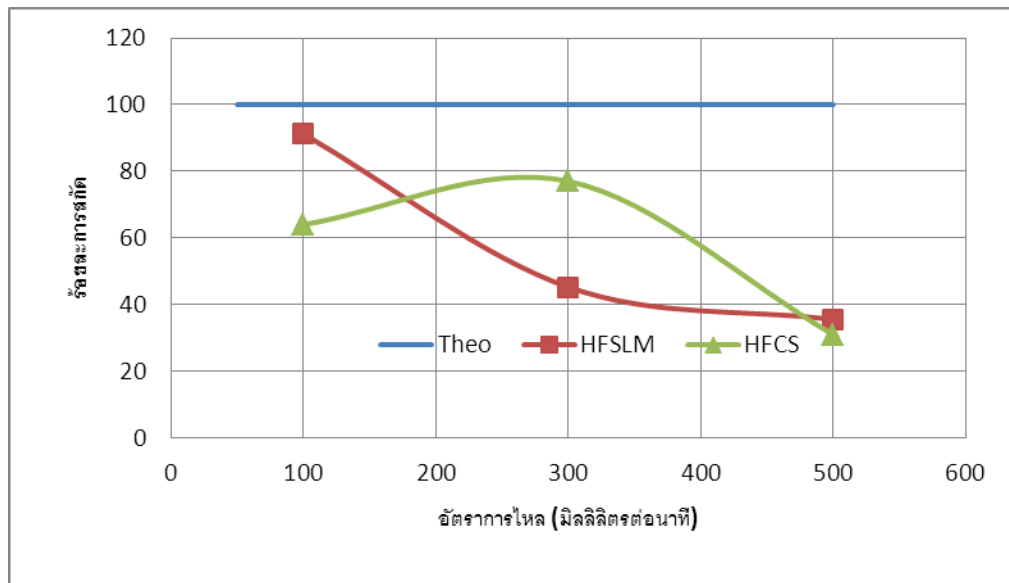
อัตราการไหลสูงขึ้นการสกัดก็ยิ่งลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสพบว่าที่อัตราการไหล 100 – 300 มิลลิลิตรต่อนาทีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแต่ถ้าอัตราการไหลที่ 500 มิลลิลิตรต่อนาที การสกัดเริ่มตกลงดังรูปที่ 4.21

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสารหนูผลที่ได้เหมือนกับของปรอทคือที่ทุกๆอัตราการไหลการสกัดเกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์ทั้งหมด ในขณะที่การสกัดสารหนูด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่อัตราการไหลสูงขึ้นการสกัดก็ยิ่งลดลงแต่การลดลงไม่มากเท่ากับปรอทเมื่อนำมาเทียบกับระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสพบว่า ที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาทีค่าการสกัดสูงขึ้นไปกว่าที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาทีก่อนที่ตกลงที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาทีดังรูปที่ 4.22

เมื่อพิจารณาการสกัดของทั้ง 2 ระบบพบว่า ผลการทดลองที่ได้ทั้งปรอทและสารหนูมีผลที่คล้ายกันคือ ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงอัตราการไหลในสารละลายป้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการสกัดลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสค่าการสกัดสูงสุดที่อัตราการไหลค่าหนึ่งก่อนแต่ถ้าอัตราการไหลสูงขึ้นมากๆค่าการสกัดก็ลดลงเช่นกัน ทั้งนี้เหตุผลมาจากการที่สารละลายป้อนไหลด้วยอัตราเร็วยิ่งมากเท่าไรทำให้เวลาที่สารละลายป้อนอยู่ภายในท่อก็ยิ่งน้อยเท่านั้น ทำให้โอกาสที่เกิดปฏิกิริยาลดลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4. 21 แสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละการสกัดปรอทที่อัตราการไหลต่างๆของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4. 22 แสดงผลการเปรียบเทียบร้อยละการสกัดสารหนูที่อัตราการไหลต่างๆของระบบเยื่อแผ่น
 เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลางแบบสัมผัสกับแบบจำลองทาง
 คณิตศาสตร์

บทที่ 5

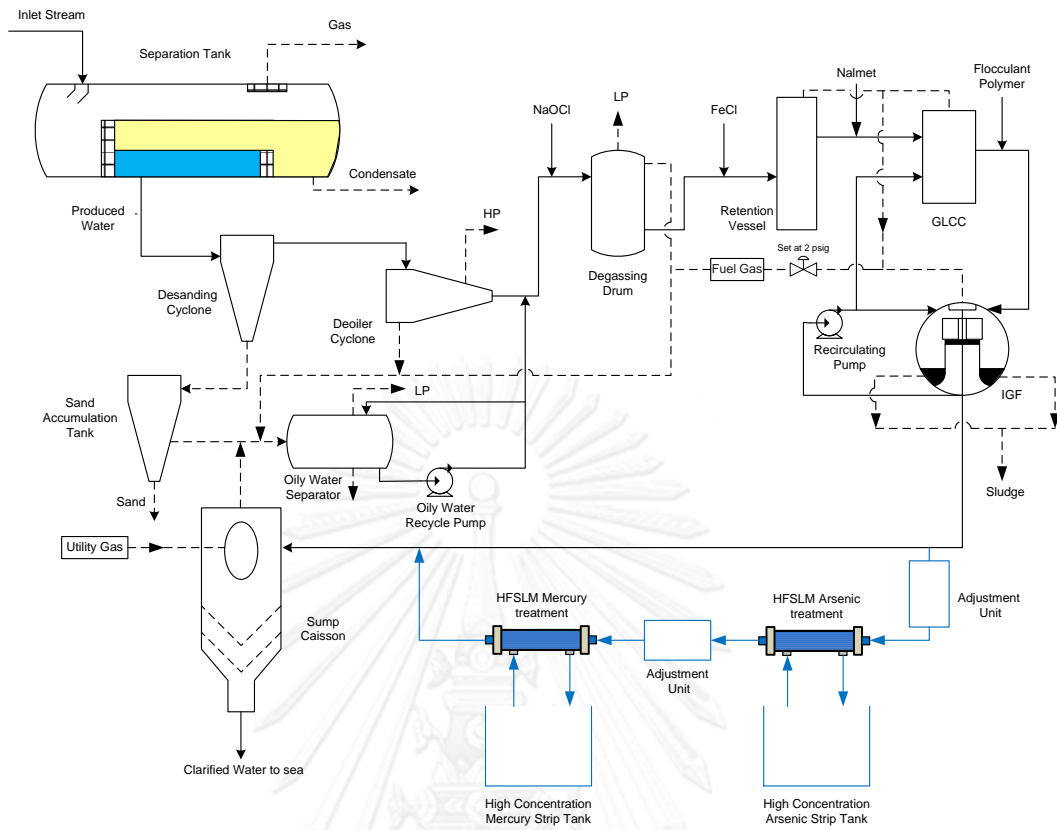
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ในการศึกษาเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมพบว่า โครซีนเป็นสารสกัดที่สามารถสกัดปรอทได้มากที่สุด
2. ในการศึกษาเลือกสารสกัดพบว่า Aliquat 336 และ Cyanex 923 ตั้งแต่ 4% ขึ้นไปสามารถสกัดปรอทได้ทั้งคู่แต่ Cyanex 923 สกัดได้ดีกว่าเล็กน้อย
3. ในการศึกษาผลของพีเอชในสารละลายป้อนที่มีผลต่อการสกัด พบว่า ในการสกัดปรอทสารสกัด Cyanex 923 สามารถสกัดได้ดีกว่า Aliquat 336 ทุกค่าพีเอชแต่กลับสารหนู Aliquat 336 สามารถสกัดสารหนูได้ดีเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น (ความเป็นเบสเพิ่มมากขึ้น)
4. ในการศึกษาการสกัดและนำกลับของปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงพบว่า ปรอทสามารถถูกสกัดได้และได้ดีมากที่สุดเมื่อถูกสกัดในช่วงที่สารละลายป้อนเป็นกรด ส่วนการนำกลับนั้นปรอทสามารถนำกลับได้เมื่อสารละลายป้อนเป็นกรดและสารละลายนำกลับเป็นเบสเท่านั้น สารหนูถูกสกัดได้ดีในสถานะที่เป็นเบส เมื่อความเป็นเบสลดลงความสามารถในการสกัดก็ลดลงตาม ส่วนการนำกลับนั้นสารหนูถูกนำกลับได้ดีที่สุดเมื่อสารละลายป้อนเป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นกรด
5. ในการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลในการสกัดและนำกลับของปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงพบว่า ทั้งปรอทและสารหนูสามารถถูกสกัดได้ดีที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและการสกัดจะลดลงเรื่อยๆเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น
6. ในการศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลในการสกัดและนำกลับของปรอทและสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวเส้นใยกลวงแบบสัมผัสพบว่า ปรอทและสารหนูสามารถถูกสกัดได้ดีที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที รองลงมาคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีและ 500 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
7. ในการหาอันดับและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา พบว่า ปรอทเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา คือ 0.911 min^{-1} ส่วนสารหนูเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา คือ 0.2152 L/mg min

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้มีการปรับสภาวะกรด-เบสของปรอทและสารหนูเพื่อให้สามารถเกิดประสิทธิภาพการสกัดได้สูงสุดกับสารสกัด Aliquat 336 ถ้าผู้วิจัยไม่ชอบปรับสภาวะกรด-เบสของปรอทและสารหนูควรเปลี่ยนสกัดเป็นชนิดอื่นเพื่อที่หาการสกัดที่เหมาะสมใหม่
2. ควรลองเปลี่ยนชนิดของปรอทเพราะ ปรอทไนตริกที่สกัดไม่ค่อยออกและมักไม่ค่อยพบตามธรรมชาติ มีข้อเสนอแนะควรเลือกปรอทคลอไรด์ที่พบในธรรมชาติมากกว่ามาทำการทดลอง แต่ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถนำปรอทคลอไรด์มาใช้ได้ เนื่องจากมีผลกระทบต่อเครื่องมือวิเคราะห์ปรอท (FIMS)
3. ควรลองสารนำกลับใหม่เพื่อที่สามารถนำกลับปรอทได้เป็นอย่างดี
4. ในการทดลอง hollow fiber contractor อัตราการไหลของทั้ง 3 เฟสที่ไหล (สารละลายป้อน สารอินทรีย์ และสารละลายนำกลับ) อัตราการไหลที่ใช้ต้องปรับให้ต่างกัน คือ ในฝั่งของการสกัด (สารละลายป้อน) ควรปรับอัตราการไหลให้ได้มากที่สุดที่จะถูกสกัดได้สูงสุด (ในงานนี้คืออัตราการไหล 300 มิลลิลิตรต่อนาที) แต่สารอินทรีย์ควรปรับอัตราการไหลให้ต่ำที่สุด เนื่องจากต้องเป็นส่วนที่มารับปรอทและสารหนูจากโมดูลแรกไปโมดูลที่ 2 ถ้าใช้อัตราการไหลที่สูงจะมีการสัมผัสกันระหว่างสารอินทรีย์ที่มีปรอทและสารหนูปนอยู่กับผนังชั้นนอกของเส้นใยกลวงน้อยซึ่งส่งผลให้เกิดการนำกลับได้น้อยและมีปรอทและสารหนูตกค้างอยู่ในสารอินทรีย์จำนวนมาก (งานนี้ต้องการให้เกิดการนำกลับได้สูงเพื่อนำน้ำส่วนที่ได้จากการนำกลับที่มีความเข้มข้นปรอทและสารหนูสูงนี้ไปกำจัดต่อซึ่งทำได้ง่ายและถูกกว่าการกำจัดปรอทและสารหนูที่ปะปนอยู่ในสารอินทรีย์)
5. การนำโมดูลเส้นใยกลวงไปใช้ในงาน จากหัวข้อที่ 2.4 กระบวนการกำจัดปรอทและสารหนูที่ใช้ในอุตสาหกรรม เราสามารถนำโมดูลเส้นใยกลวงไปใช้งานร่วมกับกระบวนการที่นำเสนอได้และควรเลือกใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) โดยใช้แบบ 2 โมดูลทำการต่ออนุกรมกันโดยให้โมดูลแรกสกัดสารหนูก่อน ส่วนโมดูลหลังใช้สกัดปรอท เพราะ น้ำทิ้ง (Produced Water) มีค่าพีเอชที่เป็นเบสจึงใช้สารที่ปรับสภาวะน้อยกว่าการที่ปรับเป็นกรด และตำแหน่งที่เหมาะสมคือต่อจาก IGF จึงเหมาะสมที่สุด ดังรูปที่ 5.1 เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) ใช้ได้ดีที่สุดเมื่อสารละลายป้อนที่เข้ามามีความเข้มข้นต่ำมากๆและไม่มีตะกอนเจือปน นอกจากนี้การนำเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงไปใช้งานนั้นควรนำไปต่อกลับกระบวนการอื่นๆที่สามารถสกัดปรอทและสารหนูออกได้ปริมาณหนึ่งก่อนที่จะใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเป็นตัวที่เก็บตกปรอทและสารหนูที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆที่วิธีอื่นๆไม่สามารถนำมาใช้งานได้



รูปที่ 5.1 แสดงการนำเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงต่อเข้ากับระบบกระบวนการกำจัดปรอทและสารหนูออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากระบวนการผลิต

รายการอ้างอิง

- [1] United States Environmental Protection Agency EPA-600/8-83-021F Health Assessment Document for Inorganic Arsenic, vol 2 1984 : 10–28.
- [2] สารหนู National Food Institute Thailand (พฤษภาคม 2547) : 46-48.
- [3] วีรศักดิ์ รักชาติ ปรอทพบที่เรียนราคาแพงที่มนุษย์ไม่เคยจำ.
- [4] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พศ2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกนอกโรงงาน พศ 2535.
- [5] Darrell L Gallup and James B Strong, Removal of Mercury and Arsenic from Produced Water, Chevron Corporation
- [6] Treatment Technologies for Mercury in Soil, Waste, and Water US Environmental Protection Agency Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Washington, DC 20460
- [7] Lothongkum, A W, Ramakul, P, Sasomsub, W, Laoharochanapan, S, and Pancharoen, U, Enhancement of uranium ion flux by consecutive extraction via hollow fiber supported liquid membrane J Taiwan Institute of Chemical Engineers 2009, 40 (5) : 518-523
- [8] Wannachod, P, Chaturabul, S, Pancharoen, U, Lothongkum, A W, and Patthaveekongka, W, The effective recovery of praseodymium from mixed rare earths via a hollow fiber supported liquid membrane and its mass transfer related J Alloys and Compounds 2011, 509 (2) :354-361.
- [9] Pancharoen, U, Poonkum, W, and Lothongkum, A W, Treatment of arsenic ions from produced water through hollow fiber supported liquid membrane J Alloys and Compounds 2009, 482 (1-2) : 328-334
- [10] Marr RJ and Draxler J, Applications In: HoWS, SirkarKK, eds Membrane Handbook NewYork: Van Nostrand Reinhold 1992 : 701–717.
- [11] Pancharoen U, Somboonpanya S, Chaturabul S, and Lothongkum A W, Selective removal of mercury as HgCl₂- from natural gas well produced water by TOA via HFSLM, J Alloys and Compounds 2010, 489 (1) : 72-79
- [12] Bird, MR and Bartlett, M, Measuring and modeling flux recovery during the chemical cleaning of MF membranes for the processing of whey protein concentrate J Food Eng 2002, 53 : 143
- [13] Tarazaga, CC, Campderrós, ME, and Padilla, AP, Physical cleaning by means of electric field in the ultrafiltration of a biological solution J Membr Sci 2006, 278 : 219.
- [14] Marshall, SC, Applying membrane processes: The first steps, Aust Dairy J, 1997, 52 : 50

- [15] Kentish SE and Stevens GW, Innovations in separations technology for the recycling and re-use of liquid waste streams *Chem Eng J* 2001, 84 : 149–159
- [16] Cahn RP and Li NN, Commercial applications of emulsion liquid membranes In: Li NN, Calo JM, eds *Separation and Purification Technology*, New York: Marcel Dekker, 1992 : 195–212
- [17] Huang H, Yang ST, Ramey DE A Hollow-Fiber Membrane Extraction Process for Recovery and Separation of Lactic Acid from Aqueous Solution *Biochemistry and Biotechnology* 2004 : 113–116.
- [18] Lothongkum AW, Suren S, Chaturabul S, Thamphiphit N, Pancharoen U, Simultaneous Removal of Arsenic and Mercury from Natural-Gas-Co-Produced water from the Gulf of Thailand using Synergistic Extractant via HFSLM *J Membr Sci* 2011, 369 : 350-358
- [19] Pancharoen U, Wongsawa T, Lothongkum AW A Reaction Flux Model for Extraction of Cu(II) with LIX84I in HFSLM *Separation Science and Technology* 46 (2011) : 2183–2190.
- [20] Ramakul P, Songkun E, Pattaweekongka W, Hronec M, Pancharoen U Permeation study on the hollow fiber supported liquid membrane for the extraction of Cobalt(II) *Korean J Chem Eng* 23 (2006) : 117-123.
- [21] Ramakul P, Pattaweekongka W, Pancharoen U Mass transfer modeling of membrane carrier system for extraction of Ce(IV) from sulfate media using hollow fiber supported liquid membrane *Korean J Chem Eng* 23 (2006) : 85-92.
- [22] Kittisupakorn P, Weerachaipichaskul W, Thitiyasook P Modeling and simulation of copper-ion extraction with hollow fiber supported liquid membrane *J Ind Eng Chem* 13 (2007) : 903–910.
- [23] Suren S, Pancharoen U, Thamphiphit N, Leepipatpiboon N A Generating Function applied on a reaction model for the selective separation of Pb(II) and Hg(II) via HFSLM *Journal of Membrane Science* 448 (2013) : 23-33.
- [24] Wannachod T, Leepipatpiboon N, Pancharoen U, Nootong K Separation and mass transport of Nd(III) from mixed rare earths via hollow fiber supported liquid membrane: Experiment and modeling *Chemical Engineering Journal* 248 (2014) : 158–167.
- [25] Wisniewski, M Extraction of arsenic from sulphuric acid solutions by Cyanex 923 *Hydrometallurgy* 1997, 46(1-2) : 235-241.
- [26] Li, Q, Liu, Q, and Wei, X Separation study of mercury through an emulsion liquid membrane *Talanta* 1996, 43(11) : 1837-1842

- [27] Iberhan, L, and Wisniewski, M Extraction of arsenic (III) and arsenic (V) with Cyanex 925, Cyanex 301 and their mixtures Hydrometallurgy 2002, 63(1) : 23-30.
- [28] Sangtumrong S, Ramakul P, Satayaprasert C, Pancharoen U and Lothongkum AW Purely separation of mixture of mercury and arsenic via hollow fiber supported liquid membrane, J Industrial and Engineering Chemistry 2007, 13(5) : 751-756
- [29] Fábrega, F d M, and Mansur, M B Liquid-liquid extraction of mercury (II) from hydrochloric acid solutions by Aliquat 336 Hydrometallurgy 2007, 87(3-4) : 83-90.
- [30] Prapasawat, T, Ramakul, P, Satayaprasert, C, Pancharoen, U, and Lothongkum, A W Separation of As (III) and As (V) by hollow fiber supported liquid membrane based on the mass transfer theory Korean Journal of Chemical Engineering 2008, 25(1) :158-163.
- [31] Uedee E, Ramakula P, Pancharoena U, Lothongkum AW, Performance of hollow fiber supported liquid membrane on the extraction of mercury (II) ions Korean J Chem Eng 2008, 25 (6) : 11–30.
- [32] ยศินทร์ ยางทอง การสกัดแยกไอออนปรอทในรูปของ (HgCl₄)²⁻ ออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและ การทำนายผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปีการศึกษา 2554
- [33] David R Lide Basic Laboratory and Industrial Chemical : A CRC Quick Reference Handbook London : CRC Press Boca Raton Ann Arbor London Tokyo, 2002.
- [34] World Health Organization [WHO] Review of Potentially harmful substance – Arsenic, Mercury and Selenium World Health Organization, Geneva 1996.
- [35] Sadiq, M Toxic metal chemistry in marine environment, New York; Marsel Dekker 1992
- [36] กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม 2541, เอกสารชุดสารเคมีเฉพาะเรื่อง ปรอท
- [37] มารยาท วีรวิกรม ปรอทในก๊าซธรรมชาติ วารสารสิ่งแวดล้อม 2541, 2(11) : 21-25.
- [38] Gilmour, C C, & Henry, EA (1991)Mercury methylation in aquatic systems affected by acid desorption Environ Poll 1991, 71 : 131-169.
- [39] Janelov, A Factors in the transformation of mercury to methylmercury In Hartung R and Dinmann, B(Eds) Environmental Mercury Contamination Third Printing Ann Arbor Science Publishers 1974.
- [40] Wood, J M Metabolic cycles for toxic elements in the environment (A study of kinetics and mechanism) In PA Krenkel(Eds), Heavy Metals in the Aquatic Environment New York: Pergamon Press 1975 : 105-112.

- [41] การทำงานกับสารปรอทอย่างปลอดภัย แผนกสุขภาพ สิ่งแวดล้อม และความปลอดภัย ยูโนแคลไทยแลนด์, มกราคม 2545.
- [42] กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ สารหนู พิมพ์ครั้งที่ 2 บริษัท อินทิเกรตเต็ดโปรโมชันเทคโนโลยี จำกัด, กรุงเทพฯ 2541.
- [43] Ferguson, JF and Gavis, J A Review of the Arsenic Cycle in Natural Water Water Research 1972, (6) : 1259-1274.
- [44] Norman, NC Chemistry of Arsenic, Antimony and Bismuth First Edition Thomson Science, London 1998.
- [45] สมศักดิ์ อินทรการณเวช การลดสารหนูในน้ำด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันสำหรับชนบท วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532.
- [46] Irikayama, K Discussion-Relation between Black-foot Disease and the Pollution of Drinking Water by Arsenic in Taiwan in Proc 2nd International Conference Water Pollution Research 1971 : 173-190.
- [47] Dikshit, AK Arsenic in Groundwater and Its Sorption by Kimberlite Tailing Journal of Environmental Science and Health part A – toxic/hazardous substance and Environmental Engineering 2000 : 65-85.
- [48] อูรา ปานเจริญ กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [49] รัตนา จิระรัตนานนท์ กระบวนการแยกเยื่อแผ่นสังเคราะห์ พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรงพิมพ์ไทยเส็ง, 2543.
- [50] <http://www.liquicel.com/product-information/gas-transfercfm> 18/04/2012.
- [51] เตือนเพ็ญ บัวช่วง การแยกไอออนผสมของแทนทาลัมและไนโอเบียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปีการศึกษา 2554.
- [52] Fogler HS Elements of Chemical Reaction Engineering Third Edition New Jersey : Prentice Hall PTR Prentice-Hall Inc, 1999



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก-1. ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

สมการที่ใช้คำนวณ

$$\% \text{ Extraction} = \frac{[C]_{f,in} - [C]_{f,out}}{[C]_{f,in}} \times 100$$

$$\% \text{ Stripping} = \frac{\frac{d[C]_{s,out}}{dt} \times V_s}{[C]_{f,in} \times v} \times 100$$

โดยที่

$[C]_{f, in}$ = ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายป้อนขาเข้า (ppb.)

$[C]_{f, out}$ = ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายป้อนขาออก (ppb.)

$[C]_{s, out}$ = ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกในสารละลายนำกลับขาออก (ppb.)

V_s = ปริมาตรของสารละลายนำกลับ (ลิตร)

v = ความเร็วในการไหลของสารละลายป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)

$d[C]_{s,out}$ = ค่าความต่างของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับขาออก (ppb.)

dt = ค่าความต่างของเวลา (นาที)

การคำนวณร้อยละการสกัด

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-4.1 ค่าสารละลายป้อนขาออกของปรอทที่เวลา 5 นาที

ความเข้มข้นของไอออนที่ปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า = 200 ส่วนในพันล้านส่วน

ความเข้มข้นของไอออนที่ปรอทในสารละลายป้อนขาออก = 3.14 ส่วนในพันล้านส่วน

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{200 - 3.14}{200} \times 100$$

$$= 98.43 \text{ (ดังตารางที่ ข-4.1)}$$

การคำนวณร้อยละการนำกลับ

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-4.1 ค่าสารละลายนำกลับของสารหนูที่เวลา 5 นาที

ความเข้มข้นของไอออนที่สารหนูในสารละลายนำกลับที่เวลา 5 นาที

$$= 10 \text{ ส่วนในพันล้านส่วน}$$

ผลต่างความเข้มข้นของไอออนที่สารหนูในสารละลายนำกลับที่เวลา 5 นาที $d[C]_{s,out}$ ($\mu\text{g/L}$)

$$= 10 - 0 = 10$$

ผลต่างของเวลา 5 นาที dt (min)

$$= 5 - 0 = 5$$

ปริมาตรของสารละลายนำกลับ V (ลิตร)

$$= 4$$

$$\frac{d[C]_{s,out}}{dt} \times V \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right) \times \frac{1}{\text{min}} \times L = \frac{10}{5} \times 4 = 8$$

$\mu\text{g/min}$

ความเข้มข้นของไอออนที่สารหนูเริ่มต้น ($\mu\text{g/L}$)

$$= 1,000$$

อัตราการไหล v_s (L/min)

$$= 0.1$$

ไหลเป็นเวลา 5 นาที v_s (L/min)

$$= 0.1 \times 5 = 0.5$$

$$[C]_{f,in} \times v \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right) \times \left(\frac{\text{L}}{\text{min}} \right) = 1,000 \times 0.5 = 500$$

$$\% \text{ Stripping} = \frac{\frac{d[C]_{s,out}}{dt} \times V_s}{[C]_{f,in} \times v} \times 100 = \frac{8}{500} \times 100$$

$$= 1.60 \text{ (ดังตารางที่ ข-4.1)}$$

ก-2. การคำนวณหาอันดับ (Order) และค่าคงที่ (Rate Constant) การเกิดปฏิกิริยา

หาอันดับและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากวิธีการอินทิเกรต โดยเลือกของการสกัดปรอทและสารหนูที่ดีที่สุดเพื่อนำมาทำนายผลการทดลอง โดยค่าที่เลือกนำมาจากผลการทดลองในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ปรอทเลือกผลการทดลองจากโมดูลที่ 4 (สารละลายป้อนอยู่ในสภาวะกรด) ส่วนสารหนูเลือกผลการทดลองจากโมดูลที่ 2 (สารละลายป้อนอยู่ในสภาวะเบส) จากตาราง ก-1

ตารางที่ ก - 1 แสดงค่าการสกัดและนำกลับของปรอทจากโมดูลที่ 4 และสารหนูจากโมดูลที่ 2 โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่ช่วงเวลา 5 นาทีแรก

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขาออก	
	การสกัดปรอท	การสกัดสารหนู
0	200	1000
1	60	9.7
2	30	2.2
3	12	1.5
4	4.2	2.4
5	2.88	3

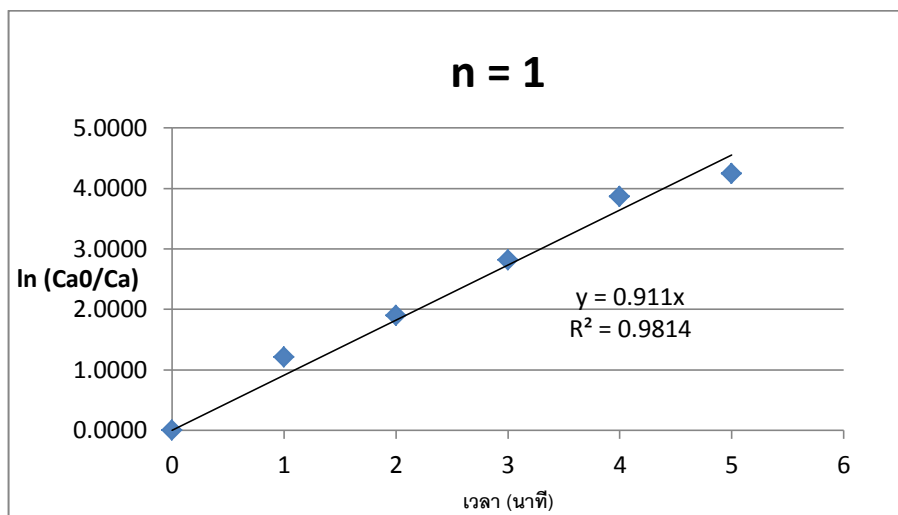
สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้าน ส่วนตามลำดับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จากผลการทดลองที่มีนำมาคำนวณหาอันดับของการเกิดปฏิกิริยาโดยการพลอตกราฟแกน X เป็นเวลา ส่วนแกน Y พลอตเพื่อหาว่าผลที่มีใกล้เคียงกับอันดับปฏิกิริยาใด ในที่นี้เลือกพลอต 3 แบบ ดังตาราง ก-2

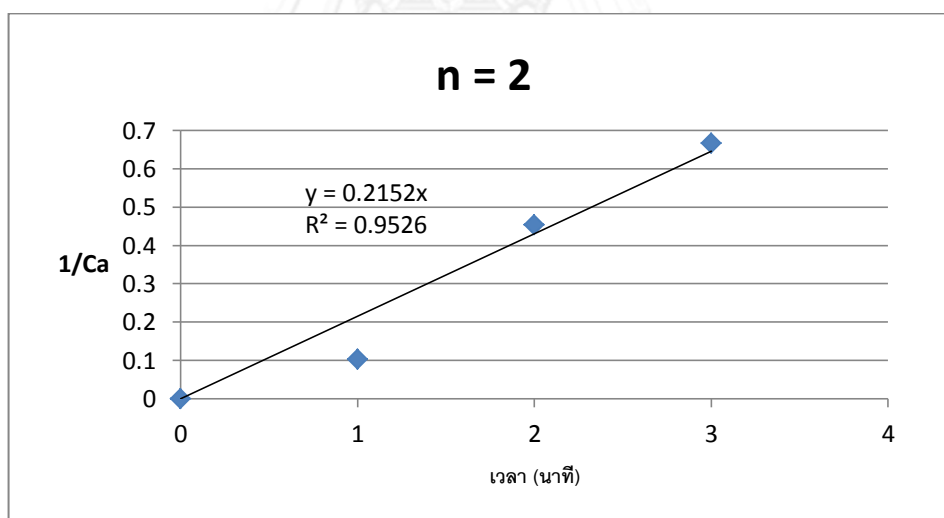
ตารางที่ ก- 2 แสดงการเขียนกราฟหาค่าอันดับและค่าคงที่ของปฏิกิริยา

อันดับของปฏิกิริยา (n)	แกน X	แกน Y	ค่าความชัน	หน่วยของค่าคงที่ ของการเกิดปฏิกิริยา
n = 0	เวลา (นาที)	C_a	-k	mg/L · min
n = 1	เวลา (นาที)	$\ln(C_{a0}/C_a)$	k	min ⁻¹
n = 2	เวลา (นาที)	$1/C_a$	k	L/mg · min

จากข้อมูลปรอทและสารหนูเมื่อนำมาพิจารณาเทียบสามารถหาอันดับและค่าคงที่ของปฏิกิริยาของปรอทและสารหนูดังรูปที่ ก-1 ถึง ก-2 และตารางที่ ก



รูปที่ ก- 1 แสดงค่าของการพลอตกราฟอันดับที่หนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาของปรอท



รูปที่ ก- 2 แสดงค่าของการพลอตกราฟอันดับที่สองของการเกิดปฏิกิริยาของสารหนู

ตารางที่ ก- 3 แสดงผลสรุปของกราฟเพื่อหาค่าอันดับและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

Reaction Order (n)	Plot	Reaction rate Constant (k_r)		R^2	
		Hg (II)	As (V)	Hg (II)	As (V)
0	Ca and t	33.46 mg/L min	143 mg/L min	0.6814	0.4331
1	$\ln(Ca_0/Ca)$ and t	0.911 min ⁻¹	2.598 min ⁻¹	0.9814	0.7507
2	1/Ca and t	0.055 L/mg min	0.215 L/mg min	0.8031	0.9526

สรุป พรอทเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา คือ 0.911 ต่อนาที ส่วนสารหนูเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา คือ 0.215 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที



ภาคผนวก ข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข
ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ

ตารางที่ ข- 1 ความเข้มข้นของปรอทและสารหนูจากการเปรียบเทียบชนิดของตัวทำละลายด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณร้อยละการสกัด

ชนิดตัวทำละลาย	ความเข้มข้นสารละลายป้อนหลังการสกัด (ส่วนในพันล้านส่วน)		ร้อยละการสกัด	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
เคโรซีน	24.34	1,000	87.83	0
โทลูอิน	144.58	1,000	27.71	0
น้ำมันถั่วเหลือง	82.74	920	58.63	8
น้ำมันดอกทานตะวัน	88.08	1,000	55.96	0

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ

ตารางที่ ข-2. 1 ความเข้มข้นของปรอทจากการเปรียบเทียบความเข้มข้นของชนิดของสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีนด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณร้อยละการสกัด

ชนิดสารสกัด	ความเข้มข้นสารละลายป้อนหลังการสกัด (ส่วนในพันล้านส่วน)					ร้อยละการสกัด				
	2%	4%	6%	8%	10%	2%	4%	6%	8%	10%
Aliquat 336	30.9	3.72	5.2	2.8	4.2	84.25	98.14	97.40	98.60	97.90
Cyanex 923	4.84	5.7	2.1	1.2	1.14	97.58	97.15	98.95	99.40	99.43
LIX 84I	33.08	33.18	25.16	23.46	23.98	83.46	83.41	87.42	88.27	88.01

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ

ตารางที่ ข-2. 2 ความเข้มข้นของสารหนูจากการเปรียบเทียบความเข้มข้นของชนิดของสารสกัดในตัวทำละลายชนิดต่างๆด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณร้อยละการสกัด

ชนิดตัวทำละลาย	10% Aliquat 336		10% Cyanex 923		10% LIX 84I	
	ความเข้มข้น	ร้อยละการสกัด	ความเข้มข้น	ร้อยละการสกัด	ความเข้มข้น	ร้อยละการสกัด
เคโรซีน	1,000	0	940	6	1,000	0
โทลูอิน	1,000	0	1,000	0	1,000	0
น้ำมันถั่วเหลือง	967	3.3	900	10	1,000	0
น้ำมันดอกทานตะวัน	1,000	0	1,000	0	1,000	0

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้าน ส่วนตามลำดับ

ตารางที่ ข-3. 1 ค่าการสกัดของปรอทจากการเปลี่ยนพีเอชของสารละลายป้อนด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณร้อยละการสกัด

pH	10% Aliquat 336 ในเคโรซีน		10% Cyanex 923 ในเคโรซีน	
	ความเข้มข้น	ร้อยละการสกัด	ความเข้มข้น	ร้อยละการสกัด
2	4.02	97.99	2.94	98.53
4	9.1	95.45	1.96	99.02
7	7.14	96.43	1.76	99.12
10	6.18	96.91	1.46	99.27

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้น 200 ส่วนในพันล้านส่วน

ตารางที่ ข-3. 2 ค่าการสกัดของสารหนูจากการเปลี่ยนพีเอชของสารละลายป้อนด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ใช้คำนวณร้อยละการสกัด

pH	10% Aliquat 336 ในเคโรซีน		10% Cyanex 923 ในเคโรซีน	
	ความเข้มข้น	ร้อยละการสกัด	ความเข้มข้น	ร้อยละการสกัด
2	788	21.22	791	20.88
4	449	55.12	831	16.90
7	423	57.71	850	14.99
12	25	97.47	1,000	0

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 1,000 ส่วนในพันล้านส่วน

ตารางที่ ข-4. 1 การสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูจากการปรับพีเอชของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นเบส ใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาท)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลาย นำกลับ(ส่วนใน พันล้านส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	3.14	35	0.30	10	98.43	96.52	0.24	1.60
10	1.17	79	0.53	25	99.41	92.06	0.21	1.16
15	1.75	116	1.03	52	99.13	88.40	0.15	2.78
20	1.43	111	0.62	89	99.28	88.90	0.12	3.54
25	3.10	112	0.81	135	98.45	88.76	0.13	4.32
30	7.41	113	1.26	215	96.29	88.74	0.13	5.73
35	6.68	150	2.99	306	96.66	85.03	0.12	6.98
40	12.44	72	0.95	392	93.78	92.77	0.13	7.85
45	13.60	117	1.30	504	93.20	88.33	0.12	8.96
50	67.00	96	0.55	612	66.50	90.45	0.24	9.80

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-4. 2 การสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูจากการปรับพีเอชของสารละลายป้อนเป็นเบสและสารละลายนำกลับเป็นกรด ใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	3.94	3	0.00	69	98.03	99.71	0.00	11.04
10	3.09	44	0.27	148	98.45	95.55	0.11	11.83
15	3.41	68	0.00	239	98.29	93.16	0.13	12.77
20	0.24	60	1.60	336	99.88	94.01	0.32	13.42
25	2.10	92	0.00	435	98.95	90.82	0.32	13.91
30	6.52	110	1.21	549	96.74	88.99	0.33	14.63
35	20.71	128	3.56	681	89.64	87.23	0.41	15.57
40	61.99	120	0.64	789	69.00	87.99	0.36	15.77
45	91.73	118	2.21	855	54.14	88.20	0.37	15.20
50	103.64	137	0.84	1035	48.18	86.35	0.47	16.56

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-4. 3 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูจากการปรับพีเอชของสารละลายป้อนเป็นกรดและสารละลายนำกลับเป็นเบส ใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	9.49	405.84	2.14	3	95.26	59.42	1.71	0.45
10	2.95	146.08	3.82	11	98.52	85.39	1.05	0.86
15	2.59	390.50	3.68	42	98.70	60.95	0.98	2.22
20	1.59	207.71	5.14	60	99.21	79.23	0.76	2.20
25	1.59	445.99	2.63	55	99.21	55.40	0.82	1.92
30	1.35	290.20	10.57	186	99.33	70.98	1.34	4.97
35	6.82	457.40	10.08	246	96.59	54.26	1.18	5.63
40	1.65	352.57	10.04	293	99.17	64.74	1.06	5.85
45	0.98	258.90	23.20	361	99.51	74.11	2.06	6.42
50	16.64	547.02	37.97	417	91.68	45.30	3.04	6.67

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-4. 4 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูจากการปรับพีเอชของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็นกรด ใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	2.88	913	0.62	6	98.56	8.69	0.04	0.98
10	3.06	922	0.34	19	98.47	7.78	0.13	0.95
15	0.59	929	0.05	15	99.70	7.09	0.09	0.68
20	1.49	919	0.46	16	99.26	8.12	0.09	0.58
25	0.73	910	0.35	19	99.63	9.04	0.10	0.47
30	0.70	950	0.76	15	99.65	4.97	0.10	0.40
35	0.33	940	1.07	13	99.84	6.01	0.11	0.35
40	0.99	946	0.97	15	99.51	5.41	0.11	0.31
45	0.50	943	2.27	12	99.75	5.71	0.11	0.34
50	0.49	967	1.27	15	99.75	3.25	0.18	0.31

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที

ตารางที่ ข-4. 5 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูจากสารละลายป้อนที่ไม่ปรับสภาวะและสารละลายนำกลับเป็นน้ำ ใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	36.31	217	0.00	6	81.85	78.34	0.00	0.93
10	29.20	224	0.00	32	85.40	77.63	0.00	2.53
15	27.19	461	1.18	57	86.40	53.86	0.32	3.05
20	26.34	860	3.47	92	86.83	14.00	0.69	3.69
25	22.77	1,000	5.38	111	88.61	0	0.86	3.55
30	16.83	1,000	11.77	134	91.58	0	1.57	3.58
35	13.03	1,000	13.56	159	93.48	0	1.55	3.64
40	41.98	1,000	19.54	167	79.01	0	1.95	3.35
45	69.77	1,000	32.18	173	65.11	0	2.86	3.08
50	109.97	1,000	41.12	179	45.02	0	3.29	2.87

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-5. 1 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 100 มิลลิเมตรต่อนาที และผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	3.94	3	0.00	69	98.03	99.71	0.00	11.04
10	3.09	44	0.27	148	98.45	95.55	0.11	7.42
15	3.41	68	0.00	239	98.29	93.16	0.00	12.77
20	0.24	60	1.60	336	99.88	94.01	0.32	13.42
25	2.10	92	0.00	435	98.95	90.82	0.00	13.91
30	6.52	110	1.21	549	96.74	88.99	0.16	14.63
35	20.71	128	3.56	681	89.64	87.23	0.41	15.57
40	61.99	120	0.64	789	69.00	87.99	0.06	15.77
45	91.73	118	2.21	855	54.14	88.20	0.20	15.20
50	103.64	137	0.84	1035	48.18	86.35	0.07	16.56

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ พีเอชของของสารละลายป้อนเป็นเบสและพีเอชของสารละลายนำกลับเป็นกรด

ตารางที่ ข-5. 2 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย
กลวงเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 300 มิลลิลิตรต่อนาที
และผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	49	331	0.48	48	75.73	66.90	0.39	7.71
10	118	501	0.88	177	40.82	49.86	0.35	11.07
15	157	549	1.29	386	21.58	45.07	0.34	20.58
20	200	562	1.33	399	0.00	43.77	0.27	15.98
25	200	556	1.71	577	0.00	44.44	0.27	18.45
30	200	550	2.87	703	0.00	44.99	0.38	18.75
35	200	581	3.03	880	0.00	41.87	0.35	20.12
40	200	632	3.67	1088	0.00	36.83	0.37	21.77
45	200	593	5.59	1334	0.00	40.67	0.50	23.72
50	200	621	5.30	1529	0.00	37.92	0.42	24.46

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้าน
ส่วนตามลำดับ พีเอชของของสารละลายป้อนเป็นเบสและพีเอชของสารละลายนำกลับเป็นกรด

ตารางที่ ข-5. 3 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย
 กลวงเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 500 มิลลิลิตรต่อนาที
 และผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	197	439	1.04	38	1.41	56.08	0.83	6.05
10	200	542	0.57	165	0.00	45.77	0.23	10.74
15	200	596	0.43	279	0.00	40.37	0.12	14.86
20	200	673	1.50	346	0.00	32.68	0.30	13.84
25	200	685	0.71	434	0.00	31.47	0.11	13.89
30	200	695	0.52	462	0.00	30.46	0.07	12.33
35	200	684	1.83	577	0.00	31.58	0.21	13.19
40	200	699	2.08	665	0.00	30.09	0.21	13.31
45	200	734	2.98	698	0.00	26.59	0.27	12.41
50	200	698	3.12	927	0.00	30.21	0.25	14.82

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้าน
 ส่วนตามลำดับ พีเอชของของสารละลายป้อนเป็นเบสและพีเอชของสารละลายนำกลับเป็นกรด

ตารางที่ ข-6. 1 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่เส้นใยกลางแบบสัมผัสเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	58	597	-	-	71.21	40.26	-	-
10	9	319	-	-	95.54	68.10	-	-
15	10	317	-	-	94.98	68.29	-	-
20	21	293	-	-	89.31	70.67	-	-
25	24	259	-	-	88.13	74.10	-	-
30	7	334	-	-	96.31	66.63	-	-
35	15	377	-	-	92.32	62.33	-	-
40	17	380	-	-	91.45	62.03	-	-
45	18	362	-	-	91.07	63.80	-	-
50	15	360	-	-	92.29	63.96	-	-

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ พีเอชของของสารละลายป้อนเป็นเบสและพีเอชของสารละลายนำกลับเป็นกรด

ตารางที่ ข-6. 2 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่เส้นใยกลวงแบบสัมผัสเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 300 มิลลิลิตรต่อนาที และผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	28	166	-	-	85.98	83.43	-	-
10	20	237	-	-	89.80	76.30	-	-
15	9	239	-	-	95.62	76.14	-	-
20	20	248	-	-	90.18	75.20	-	-
25	19	219	-	-	90.56	78.12	-	-
30	20	246	-	-	89.96	75.44	-	-
35	23	238	-	-	88.64	76.19	-	-
40	16	245	-	-	92.07	75.45	-	-
45	10	221	-	-	95.09	77.87	-	-
50	17	241	-	-	91.67	75.88	-	-

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ พีเอชของของสารละลายป้อนเป็นเบสและพีเอชของสารละลายนำกลับเป็นกรด

ตารางที่ ข-6. 3 ค่าการสกัดและนำกลับของปรอทสารหนูโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่เส้นใยกลางแบบสัมผัสเมื่ออัตราเร็วในการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับคือ 500 มิลลิลิตรต่อนาที และผลของการคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

เวลา (นาที)	สารละลายป้อนขา ออก (ส่วนใน พันล้านส่วน)		สารละลายนำกลับ (ส่วนในพันล้าน ส่วน)		ร้อยละการสกัด		ร้อยละการนำกลับ	
	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู	ปรอท	สารหนู
5	63	702	-	-	68.43	29.82	-	-
10	67	692	-	-	66.62	30.76	-	-
15	80	598	-	-	59.97	40.22	-	-
20	74	661	-	-	63.16	33.93	-	-
25	82	706	-	-	58.91	29.38	-	-
30	71	731	-	-	64.41	26.94	-	-
35	56	713	-	-	72.01	28.73	-	-
40	54	694	-	-	73.20	30.60	-	-
45	68	690	-	-	66.00	30.97	-	-
50	84	721	-	-	57.77	27.92	-	-

สภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นปรอทและสารหนูเริ่มต้น 200 และ 1,000 ส่วนในพันล้านส่วนตามลำดับ พีเอชของของสารละลายป้อนเป็นเบสและพีเอชของสารละลายนำกลับเป็นกรด

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายอัศรพล สุดประเสริฐ

เกิด วันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดนครสวรรค์

การศึกษา

พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาสมุทรศาสตร์ฟิสิกส์และเคมี ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2551 บริษัท PS Engineering จำกัด

พ.ศ. 2553 ฝ่ายวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงทางเลือก สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

พ.ศ. 2555 ฝ่ายวิจัยและบริหารจัดการสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

ทุนสนับสนุนการวิจัย

พ.ศ. 2555 ได้รับทุนโครงการ “การใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในการกำจัดไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการขุดเจาะน้ำมันดิบ” จากฝ่ายวิจัยและบริหารจัดการสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

เกียรติประวัติและรางวัลที่ได้รับ

พ.ศ. 2556 ได้รับรางวัลที่ 2 ในการนำเสนอผลงาน (Oral Presentration) จากงาน “The first Nong Khai Campus International Conference 2013”