

การกำจัดปรอทและสารหนูในน้ำปนเปื้อนจากคอนเดนเสทโดยใช้มอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

นายดลภพ ศรีบุตตา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DISPOSE OF MERCURY AND ARSENIC IN PRODUCED WATER FROM CONDENSATE BY HO  
LLOW FIBER CONTACTOR MODULES

Mr. Dolapop Sribudda



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดปรอทและสารหนูในน้ำปนเปื้อนจากคอนเดนเสทโดยใช้มอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

โดย

นายดลภพ ศรีบุตตา

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวทอม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิตศ หนูทอง)

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

ดลภพ ศรีบุตดา : การกำจัดปรอทและสารหนูในน้ำปนเปื้อนจากคอนเดนเสทโดยใช้มอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (DISPOSE OF MERCURY AND ARSENIC IN PRODUCED WATER FROM CONDENSATE BY HOLLOW FIBER CONTACTOR MODULES) อ.ที่  
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศาสตราจารย์ ดร.อรุณี ปานเจริญ, 100 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) จากน้ำทิ้งจากกระบวนการคอนเดนเสทโดยใช้ระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส โดยมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสประกอบด้วยมอดูลเส้นใยกลวงสองมอดูล มอดูลแรกใช้สำหรับปฏิกิริยาการสกัดและมอดูลที่สองใช้สำหรับปฏิกิริยานำกลับ สารละลายป้อนคือน้ำที่ปนเปื้อนมาจากกระบวนการผลิตคอนเดนเสท สารสกัดที่ใช้เป็นสารสกัดชนิดเบสคืออะลิควอตซ์สามสามหก (Aliquat336) สารละลายนำกลับที่เลือกใช้คือสารละลายชนิดเบส ได้แก่ ไทโอยูเรีย, โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไทโอซัลเฟต นอกจากนี้ยังมีน้ำกลั่นและสารละลายกรดไนตริก ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์, ความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร สารละลายนำกลับไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยสภาวะดังกล่าวให้เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) คือ 100 เปอร์เซ็นต์และ 47.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนอาร์เซนิก(V) คือ 78.88 เปอร์เซ็นต์และ 6.66 เปอร์เซ็นต์

การสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) ด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งและการสกัดไอออนอาร์เซนิก(V) เป็นปฏิกิริยาอันดับที่สอง ในส่วนของการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือกมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมมากที่สุด สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมน้อยที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก (V) คือ  $3.34 \times 10^{-6}$  และ  $2.33 \times 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที แสดงถึงการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) โดยอะลิควอตซ์สามสามหกมากกว่าการสกัดไอออนอาร์เซนิก(V)

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5570198021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MERCURY / ARSENIC / PRODUCED WATER / HOLLOW FIBER CONTACTOR / MASS TRANSFER COEFFICIENT

DOLAPOP SRIBUDDA: DISPOSE OF MERCURY AND ARSENIC IN PRODUCED WATER FROM CONDENSATE BY HOLLOW FIBER CONTACTOR MODULES. ADVISOR: DISTINGUISHED PROF. URA PANCHAROEN, 100 pp.

The separation of Hg(II) and As(V) from produced water in condensate process by hollow fiber contactors was investigated. It consisted of two identical hollow fiber modules. The first module was used for extraction reaction and the second module was used for stripping reaction. The feed solution was produced water. The extractant used was Aliquat336. The stripping solution was thiourea, sodium hydroxide, sodium thiosulfate, DI water and nitric acid. The optimum condition achieved were 0.02 M of HCl in feed solution, 14% (v/v) of Aliquat336 dissolved in kerosene, 0.07 M of thiourea dissolved in hydrochloric acid 0.01 M and volumetric flow rate of 100 ml/min for aqueous solution. At such condition, the maximum extraction of Hg(II) and As(V) attained 100% and 47.88%, respectively. Concurrently, the maximum stripping of Hg(II) and As(V) reached 78.88% and 6.66%, respectively.

The reaction order of Hg(II) by Aliquat336 carrier was first order and As(V) was the second order. Mass transfer coefficients of the organic layer diffusion ( $k_o$ ) had the most effect on overall mass transfer coefficients. Mass transfer coefficient of the aqueous solution had a little effect to overall mass transfer coefficient. The overall mass transfer of extraction Hg(II) and As(V) were  $3.34 \times 10^{-6}$  and  $2.33 \times 10^{-6}$  m/s, respectively. This indicated that the extraction of Hg(II) by Aliquat336 carrier higher than As(V).

Department: Chemical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จาก ศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำสอนและคำแนะนำที่มีประโยชน์พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของการทำวิจัย นอกจากนี้ยังช่วยเตือนสติและอบรมสั่งสอนเพื่อนให้งานก้าวหน้าและมีคุณภาพ จนกระทั่งงานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จ อีกทั้งยังช่วยหาเงินทุนสนับสนุนการวิจัย ข้าพเจ้าซาบซึ้งในพระคุณของท่าน จึงขอกราบขอบพระคุณท่านมา ณ. โอกาสนี้

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษิติศ หนูทอง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประภกร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม ที่สนับสนุนเงินทุนจำนวน 280,000 บาท (สองแสนแปดหมื่นบาทถ้วน) เพื่อใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณบริษัทซาลาแมนเดอร์ เอ็นเนอจี (บัวหลวง) ลิมิเตด ที่ได้เอื้อเฟื้อน้ำปั่นเปื้อนที่กระบวนการชุดเจาะ และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะ

นอกจากบุคคลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ข้าพเจ้าขอขอบคุณห้องวิจัย Mass separation ที่ให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย และเพื่อนๆในห้องวิจัยที่น่ารักทุกคน ที่คอยเอื้อเฟื้อ เผื่อแผ่ให้กำลังใจ ให้ความรู้ งานวิจัยนี้สำเร็จมาได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน รวมถึงญาติพี่น้อง ที่คอยให้กำลังใจในการปฏิบัติตนเป็นคนดีของสังคมและสนับสนุนในการศึกษาตลอดมา ทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในครั้งนี้

## สารบัญ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ  |
| สารบัญ.....  | ช  |
| สารบัญตาราง.....   | ฎ  |
| สารบัญรูปภาพ.....  | ฏ  |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....   | ณ  |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1  |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....  | 1  |
| 1.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....  | 2  |
| 1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พวยงด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane).....                                   | 3  |
| 1.2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พวยงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat-Sheet<br>Supported Liquid Membrane: FSSLM)..... | 4  |
| 1.2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พวยงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Spiral-Wound<br>Supported Liquid Membrane).....     | 5  |
| 1.2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พวยงด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported<br>liquid membrane: HFSLM).....     | 6  |
| 1.3 มอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow fiber contactor module).....  | 7  |
| 1.4 สมบัติของปรอทและสารหนู.....  | 11 |
| 1.5 พิษของปรอทและสารหนู.....   | 13 |
| 1.5.1 พิษของปรอท.....  | 13 |
| 1.5.2 พิษของสารหนู.....  | 13 |
| 1.6 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....   | 14 |

|  |    |
|--|----|
| 1.7 ขอบเขตของงานวิจัย.....   | 14 |
| 1.8 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....  | 15 |
| 1.9 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....  | 15 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี.....   | 16 |
| 2.1 สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ.....   | 16 |
| 2.1.1 สารละลายป้อน.....  | 16 |
| 2.1.2 สารละลายนำกลับ.....  | 16 |
| 2.2 สารสกัด.....   | 17 |
| 2.2.1. สารสกัดชนิดกรด (Acidic type extractants).....   | 18 |
| 2.2.2. สารสกัดชนิดเบส (Basic or Anionic type extractants).....   | 19 |
| 2.2.3. สารสกัดชนิดซอลเวท (neutral or solvation type extractant).....   | 20 |
| 2.3 ตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent).....  | 21 |
| 2.4 กลไกการถ่ายเทมวล.....  | 23 |
| 2.4.1 การถ่ายเทมวลในทิศทางเดียวกัน.....  | 23 |
| 2.4.2 การถ่ายเทมวลในทิศทางสวนทางกัน.....   | 24 |
| 2.5 ทฤษฎีการคำนวณค่าคงที่การถ่ายเทมวล.....   | 27 |
| 2.5.1 สมดุลเคมีของปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับ.....   | 27 |
| 2.5.2 การคำนวณร้อยละการสกัด (percentage of extraction, % E) และร้อยละการนำกลับ (percentage of stripping, % S)..... | 28 |
| 2.5.3 การคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัด (extraction equilibrium constant, $K_{ex}$ ).....                   | 28 |
| 2.5.4 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient).....  | 29 |
| 2.5.4.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ ( $k_t$ ).....   | 29 |
| 2.5.4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น ( $k_m$ ).....   | 30 |



|  |    |
|--|----|
| 2.5.4.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก ( $k_o$ ).....                    | 31 |
| 2.5.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient).....                         | 32 |
| 2.5.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (overall mass transfer coefficient).....     | 33 |
| 2.5.7 ฟลักซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส..... | 34 |
| บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....                                   | 35 |
| 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....   | 35 |
| 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....                                  | 36 |
| 3.3 วิธีการทดลอง.....  | 39 |
| 3.3.1 ศึกษาผลของเวลาด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....                         | 39 |
| 3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน.....                | 40 |
| 3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด.....                                     | 41 |
| 3.3.4 ศึกษาผลของชนิดของสารละลายนำกลับ.....                                     | 41 |
| 3.3.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ.....                              | 42 |
| 3.3.6 ศึกษาผลของตัวทำละลาย.....  | 43 |
| 3.3.7 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ.....               | 43 |
| 3.3.8 ศึกษาผลประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส.....       | 44 |
| 3.3.8.1 การสกัดและนำกลับด้วยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส.....                  | 44 |
| 3.3.8.2 การสกัดและนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....         | 45 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....                                  | 46 |
| 4.1 ผลของเวลาดำเนินการ.....  | 47 |
| 4.2 ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน.....                       | 48 |
| 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด.....  | 49 |
| 4.4 ผลของชนิดของสารละลายนำกลับ.....  | 50 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสม.....  | 51  |
| 4.6 ผลของชนิดของตัวทำละลายที่เหมาะสม .....  | 52  |
| 4.7 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับ .....  | 53  |
| 4.8 ประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส .....                                    | 54  |
| 4.9 อันดับการเกิดปฏิกิริยา.....   | 56  |
| 4.10 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของระบบมอดูลเส้นใย<br>กลวงแบบสัมผัส..... | 58  |
| 4.10.1 ค่าคงที่สมดุล .....  | 58  |
| 4.10.2 สัมประสิทธิ์การแพร่.....   | 58  |
| 4.10.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล .....   | 58  |
| 4.10.4 พลั๊กซ์ที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลว .....                           | 60  |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....  | 61  |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง .....  | 61  |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....  | 62  |
| รายการอ้างอิง.....  | 63  |
| ภาคผนวก ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา .....   | 72  |
| ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ .....  | 76  |
| ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ .....  | 85  |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....  | 100 |

## สารบัญตาราง

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1.1 แสดงงานวิจัยที่ผ่านมาของการสกัดไอออนเมอร์คิวรีและอาร์เซนิก.....   | 10   |
| ตารางที่ 1.2 สมบัติทางกายภาพของเมอร์คิวรี.....   | 11   |
| ตารางที่ 1.3 สมบัติทางกายภาพของอาร์เซนิก.....  | 12   |
| ตารางที่ 2.1 สารสกัดแต่ละชนิด.....   | 17   |
| ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของตัวทำละลายที่นิยมใช้.....   | 22   |
| ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย.....  | 22   |
| ตารางที่ 3.1 ชนิดและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....   | 35   |
| ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะ.....   | 36   |
| ตารางที่ 3.3 ลักษณะเฉพาะของมอดูลเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง.....  | 38   |
| ตารางที่ 4.1 อันดับอัตราการเกิดปฏิกิริยา.....  | 57   |
| ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V).....  | 59   |
| ตารางที่ ข.1 ผลของเวลาดำเนินการที่มีผลต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II)และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....   | 76   |
| ตารางที่ ข.2 ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส.....                                 | 77   |
| ตารางที่ ข.3 ผลของความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สามสามหต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส.....  | 78   |
| ตารางที่ ข.4 ผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส.....  | 79   |
| ตารางที่ ข.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับไทโอยูเรียที่ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์ต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส..... | 80   |

|   |    |
|---|----|
| ตารางที่ ข.6 ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส.....                           | 81 |
| ตารางที่ ข.7 ผลของอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส..... | 82 |
| ตารางที่ ข.8 ประสิทธิภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัสและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V).....    | 83 |
| ตารางที่ ข.9 ผลของเสถียรภาพต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส.....                                   | 84 |



## สารบัญรูปภาพ

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ .....   | 3    |
| รูปที่ 1.2 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....  | 4    |
| รูปที่ 1.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน.....   | 5    |
| รูปที่ 1.4 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง.....  | 7    |
| รูปที่ 1.5 ระบบปฏิบัติการแบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส .....   | 8    |
| รูปที่ 2.1 รูปแบบการถ่ายเทมวลในทิศทางเดียวกันของระบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส .....   | 24   |
| รูปที่ 2.2 รูปแบบการถ่ายเทมวลในทิศทางสวนทางกันของระบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส.....   | 25   |
| รูปที่ 2.3 กลไกการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) .....   | 26   |
| รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของสารสกัด .....  | 36   |
| รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ Liqui-Cel <sup>®</sup> Laboratory ของมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส (hollow fiber contactor) 1) ถังสารละลายป้อน 2) ถังสารละลายนำกลับ 3) เกียร์บีบ 4) เครื่องวัดความดันเกจขาเข้าและขาออก 5) เครื่องวัดอัตราการไหล 6) ถังตัวทำละลายอินทรีย์ 7) มอดูลเส้นใยกลางที่หนึ่ง 8) มอดูลเส้นใยกลางที่สอง..... | 37   |
| รูปที่ 3.3 มอดูลเส้นใยกลาง Celgard <sup>®</sup> X-30 240 microporous polypropylene hollow fiber .....  | 37   |
| รูปที่ 3.4 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทและสารหนู (ICP-OES).....  | 39   |
| รูปที่ 4.1 ผลของเวลาต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับคือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์ .....  | 47   |

- รูปที่ 4.2** ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับคือไทโอยูเรีย ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์)..... 48
- รูปที่ 4.3** ผลของความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีนต่อสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์และสารละลายนำกลับคือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์) ..... 50
- รูปที่ 4.4** ผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์และความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)..... 51
- รูปที่ 4.5** ผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อการแยกไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์และความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ..... 52
- รูปที่ 4.6** ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์, ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์) ..... 53
- รูปที่ 4.7** ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์, ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์) ..... 54
- รูปที่ 4.8** ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) โดยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสและระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ..... 55

**รูปที่ 4.9** ผลของเสถียรภาพต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์, ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, สารละลายนำกลับไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์)..... 56

**รูปที่ 4.10** อันดับอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหก ก.) ไอออนเมอร์คิวรี(II) ข.) ไอออนอาร์เซนิก(V)..... 57



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

### สัญลักษณ์

|            |   |
|------------|---|
| A          | : พื้นที่ของเยื่อแผ่น (ตารางเซนติเมตร)  |
| D          | : สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)                                 |
| $d_a$      | : เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชั้นท่อทั้งหมด (เมตร)                               |
| $d_H$      | : เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของเส้นใยกลวง (เมตร)                                 |
| $d_i$      | : เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง (เมตร)                                    |
| $D_m$      | : สัมประสิทธิ์การแพร่เชิงมวล (ตารางเมตรต่อวินาที)                               |
| $d_o$      | : เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง (เมตร)                                   |
| $d_s$      | : เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นเปลือกของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)                       |
| $h_m$      | : ความหนาของชั้นฟิล์มหรือเส้นใยกลวง   |
| $k_t$      | : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ (เมตรต่อวินาที)                             |
| $k_m$      | : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น (เมตรต่อวินาที)                           |
| $k_o$      | : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก (เมตรต่อวินาที)                          |
| $K_{ex}$   | : ค่าคงที่สมดุลง  |
| $K_E$      | : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของมอดูลที่หนึ่ง (เมตรต่อวินาที)                   |
| $K_S$      | : สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของมอดูลที่สอง (เมตรต่อวินาที)                     |
| $k_f$      | : ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดของไอออนเมอร์คิวรี (นาที่ <sup>-1</sup> ) |
| $k_{f1}$   | : ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดของไอออนอาร์เซนิก (ลิตรต่อโมลต่อนาที่)    |
| L          | : ความยาวของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)  |
| M          | : น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)   |
| N          | : จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล  |
| Q          | : อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)  |
| $r_i$      | : รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เมตร)  |
| $r_o$      | : รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เมตร)   |
| $r_H$      | : รัศมีไฮดรอลิกของเส้นใยกลวง (เมตร)   |
| T          | : อุณหภูมิ (เคลวิน)   |
| $u_{tube}$ | : ความเร็วการไหลของสารละลายในชั้นท่อ (เมตรต่อวินาที)                            |



$u_{shell}$  : ความเร็วการไหลของสารละลายในชั้นเปลือก (เมตรต่อวินาที)  
 $V_a$  : ปริมาตรเชิงโมลาร์ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)

### อักษรกรีก

$\varepsilon$  : ความเป็นรูปทรงของเส้นใยกลวง  
 $\tau$  : ค่าความคดเคี้ยวของเส้นใยกลวง  
 $\eta$  : ความหนืด (เซนติพ้อยท์)  
 $\nu$  : ความหนืดไคเนมาติก (ตารางเมตรต่อวินาที)

### ตัวห้อย

ex : การสกัด (extraction)  
f : วัฏภาคสารละลายป้อน (feed phase)  
fi : รอยต่อระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่น (feed interface)  
aq : วัฏภาคที่เป็นน้ำ (aqueous phase)  
m : เยื่อแผ่น (membrane)  
s : การนำกลับ (stripping)  
si : รอยต่อระหว่างสารละลายนำกลับและเยื่อแผ่น (stripping interface)

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

คอนเดนเสท (natural gas condensate) คือสารผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความหนาแน่นต่ำ มีสภาพเป็นแก๊สเมื่ออยู่ในหลุมขุดเจาะ (ในชั้นหินที่ขุดเจาะลงไปประกอบด้วยน้ำมันปิโตรเลียม, แก๊สธรรมชาติและน้ำปนเปื้อนในชั้นหิน) แต่เมื่อแก๊สขึ้นมาที่ปากหลุมขุดเจาะแล้วจะกลายเป็นสภาพเป็นของเหลวเนื่องจากมีความดันและอุณหภูมิที่ต่ำลง อุณหภูมิของบรรยากาศปกติจะต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ทำให้แก๊สบางส่วนควบแน่นเป็นของเหลว จึงเรียกว่าแก๊สคอนเดนเสท (gas condensate) หรือแก๊สโซลีนธรรมชาติ (natural gasoline) องค์ประกอบของคอนเดนเสทจะประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง (alkane) ที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 3-6 อะตอม ประกอบด้วยโพรเพน, บิวเทน, เพนเทนและเฮกเซน โดยในบางแหล่งอาจจะมีอีเทนอยู่ด้วย นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติก (เบนซีน, โทลูอิน, ไซลีน, อีทิลเบนซีน), ไฮโคลเฮกเซน, แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [1] ในกระบวนการผลิตน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาตินั้นจะเกิดน้ำปนเปื้อนจากการผลิตน้ำมันปิโตรเลียม (produced water) จำนวนมาก ซึ่งน้ำปนเปื้อนนี้จะประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์, โลหะหนัก, สารกัมมันตภาพรังสี และสารประกอบอินทรีย์ [2] เมื่อความต้องการน้ำมันและแก๊สธรรมชาติเพิ่มขึ้นจะทำให้มีจำนวนน้ำปนเปื้อนที่ได้จากการผลิตน้ำมันเพิ่มขึ้นมาด้วย เนื่องจากความเป็นพิษโลหะหนัก (ไอออนเมอร์คิวรีและอาร์เซนิก) ในน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะ มีความเป็นพิษอย่างมาก กระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องมีความเข้มข้นของปรอทไม่เกิน 5 ส่วนในพันล้านส่วน (part per billion) และความเข้มข้นของสารหนู 250 ส่วนในพันล้านส่วน (part per billion) [3] โดยส่วนมากแล้ว ไอออนโลหะหนักในน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะนั้นจะบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และการดูดซับโดยใช้แท่งคาร์บอน (carbon adsorption) อย่างไรก็ตาม ระบบดังกล่าวนี้จะบำบัดไอออนโลหะหนักได้ไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม และวิธีดังกล่าวไม่สามารถบำบัดไอออนโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน (part per million) ได้ [4]

นักวิจัยจำนวนมากได้ใช้วิธีการสกัดไอออนโลหะหนักเช่น ปรอทและสารหนูโดยวิธีการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) [5-8] สามารถสกัดแยกปรอทและสารหนูในปริมาณมาก ค่าความเข้มข้นของสารละลายป้อนขาออกที่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง แต่กระบวนการนี้ต้องทำ

ปฏิกิริยาหลายขั้นตอน มีค่าการเลือกเกิดต่ำ (selectivity) มีค่าดำเนินการสูง (operating cost) ใช้สารสกัดในปริมาณที่มากและเกิดเฟสที่สาม [9-11]

ต่อมานักวิจัยหลายท่านได้เลือกใช้วิธีเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane) ในการแยกไอออนโลหะหนัก เนื่องจากวิธีนี้เป็นการรวมทั้งการสกัดและนำกลับไว้ในขั้นตอนเดียว ซึ่งวิธีเยื่อแผ่นเหลวสามารถที่จะขยายขนาดได้ง่าย (scale up) มีค่าการเลือกเกิดที่สูง ใช้สารสกัดในปริมาณน้อย [12, 13] โดยรายละเอียดของวิธีการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแสดงในหัวข้อถัดไป

## 1.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

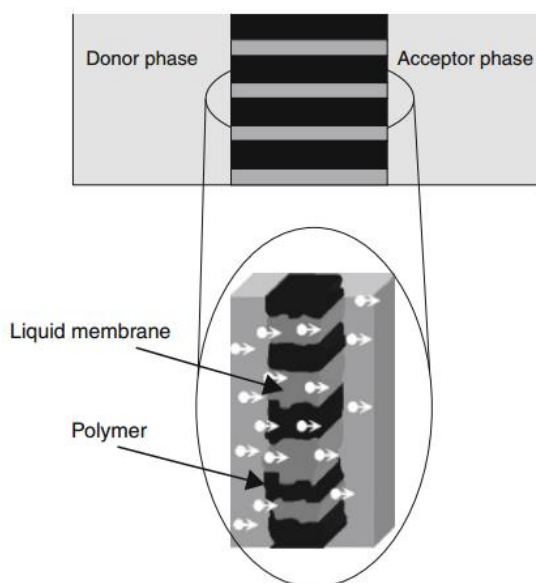
การสกัดด้วยวิธีเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane) เป็นวิธีการสกัดที่น่าสนใจของการสกัดไอออนโลหะเพื่อทำการแยกไอออนโลหะมีค่า (precious metal ion) หรือโลหะหายาก (rare earth metal ion) จากสารละลายที่เป็นน้ำ (aqueous solution) ซึ่งกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสามส่วนใหญ่คือ สารละลายป้อน (มีไอออนที่ต้องการจะแยก) สารละลายอินทรีย์ (ประกอบด้วยสารสกัดละลายในตัวทำละลายอินทรีย์) และสารละลายนำกลับ (ทำหน้าที่นำกลับไอออนที่ต้องการจะแยก) กลไกสำหรับการถ่ายเทมวลคือสารละลายกับการแพร่ (solution-diffusion) โดยไอออนที่ต้องการแยกจะละลายในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) สารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและเกิดปฏิกิริยาที่ผันกลับได้กับไอออนที่ต้องการจะแยกเพื่อฟอร์มตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (metal complex species) กระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการถ่ายเทแบบควบคู่ (facilitate) หรือการแยกแบบ carrier-mediated liquid membrane โดยการถ่ายเทแบบควบคู่จะรวมถึงการถ่ายเทในทิศทางเดียวกัน (co-transport) และการถ่ายเทในทิศทางที่ตรงข้ามกัน (counter-transport) ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย [12-14]

1. ขยายขนาด (scale-up) ได้ง่าย
2. มีค่าการเลือก (selectivity) เกิดที่สูง ทำให้มีประสิทธิภาพในการสกัดสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำมากๆ ได้ ซึ่งแตกต่างจากวิธีการอื่นๆที่ไม่สามารถทำงานได้ดีในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำได้
3. ต้องการปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) ในปริมาณน้อยเนื่องจากการเติมสารประกอบเชิงซ้อนอย่างต่อเนื่องจากปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ทำให้ลดค่าดำเนินการลง (operating cost)

4. สามารถเกิดปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับได้ในขั้นตอนเดียว ซึ่งลดลงราคาของอุปกรณ์ลง
5. ผลของการผสมแบบย้อนกลับ (back mixing effect) และการหลุดของสารประกอบเชิงซ้อนมีน้อยเมื่อใช้เมมเบรน (membrane) ที่เหมาะสม

### 1.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

วิธีเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับ (supported liquid membrane) นั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสีย [15-17] เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับเป็นหนึ่งในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่มีสามวัฏภาค ซึ่งสารละลายอินทรีย์ (organic solvent) จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (immobilized) อยู่ในรูพรุนของพอลิเมอร์หรือวัสดุรองรับที่เป็นสารอินทรีย์โดยแรงคะปิลลารี (capillary force) ซึ่งจะแบ่งสารที่เป็นน้ำ (aqueous solution) ออกเป็นสองชนิดคือสารละลายป้อน (feed หรือ donor) และสารละลายนำกลับ (receiving, acceptor) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยสารละลายป้อนจะถูกสกัดเข้าไปอยู่ในสารละลายอินทรีย์ที่เคลื่อนที่ไม่ได้ในรูพรุน จากนั้นจึงแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และเกิดปฏิกิริยาการนำกลับ ต่อเนื่องที่อีกด้านของเยื่อแผ่นเข้าไปอยู่ในวัฏภาคสารละลายนำกลับ [18, 19] เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับเป็นวิธีการแยกที่สำคัญที่ถูกพิจารณาเลือกใช้ เนื่องจากมีการสูญเสียสารละลายอินทรีย์ที่น้อย เกิดของเสีย (waste) จากกระบวนการน้อย สามารถสกัดและนำกลับได้ในขั้นตอนเดียว ไม่มีปัญหาการเกิดเฟสที่สาม และสามารถประยุกต์ใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมได้ [20] โดยตัวรองรับ (support) มีหลายชนิด ได้แก่ ชนิดแผ่นบาง (Flat Sheet) ชนิดแผ่นม้วน (Spiral Wound) และชนิดเส้นใยกลวง (Hollow Fiber)

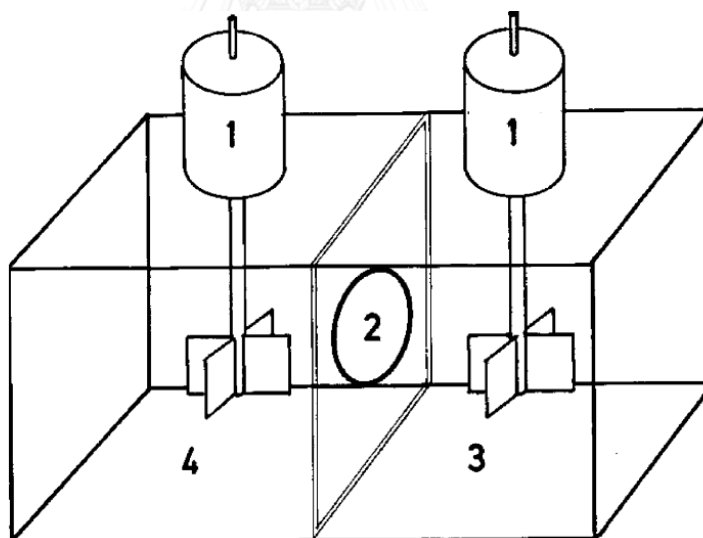


รูปที่ 1.1 องค์ประกอบของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ

### 1.2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat-Sheet Supported Liquid Membrane: FSSLM)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (FSSLM) ประกอบด้วยสององค์ประกอบซึ่งแยกออกจากกันโดยเยื่อแผ่นชนิดแผ่นบาง (flat membrane) โดยมีการติดตั้งและใช้พื้นที่น้อย ถ้าระบบชนิดนี้ไม่เสถียรและของเหลวอินทรีย์ (organic liquid) ไม่สามารถอยู่ในรูปฟองได้ สามารถใช้การแบ่งเป็นสามช่องได้โดยใช้ตัวรองรับชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน เพื่อทำการแยกสารละลายอินทรีย์ (organic) และวัฏภาคที่เป็นน้ำ (aqueous phase) โดยตัวรองรับ (support) ส่วนมากจะเป็นชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และเติมเต็มด้วยสารละลายที่เป็นน้ำ (aqueous) สารละลายอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วยสารสกัดจะถูกกวนอยู่ในช่องตรงกลางเพื่อลดการต้านทานการถ่ายเทมวล (mass transfer resistance) โดยปกติแล้วระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบางจะใช้สารละลายอินทรีย์เพื่อแยกสารละลายที่เป็นน้ำสองชนิดออกจากกัน [21]

ข้อจำกัดของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดบางคือมีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลได้น้อยทำให้อัตราการถ่ายเทมวลต่ำ รูปที่ 1.2 แสดงระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง [22]



หมายเลข 1 มอเตอร์ปั่นกวน      หมายเลข 2 เยื่อแผ่นเหลวแบบแผ่นบาง

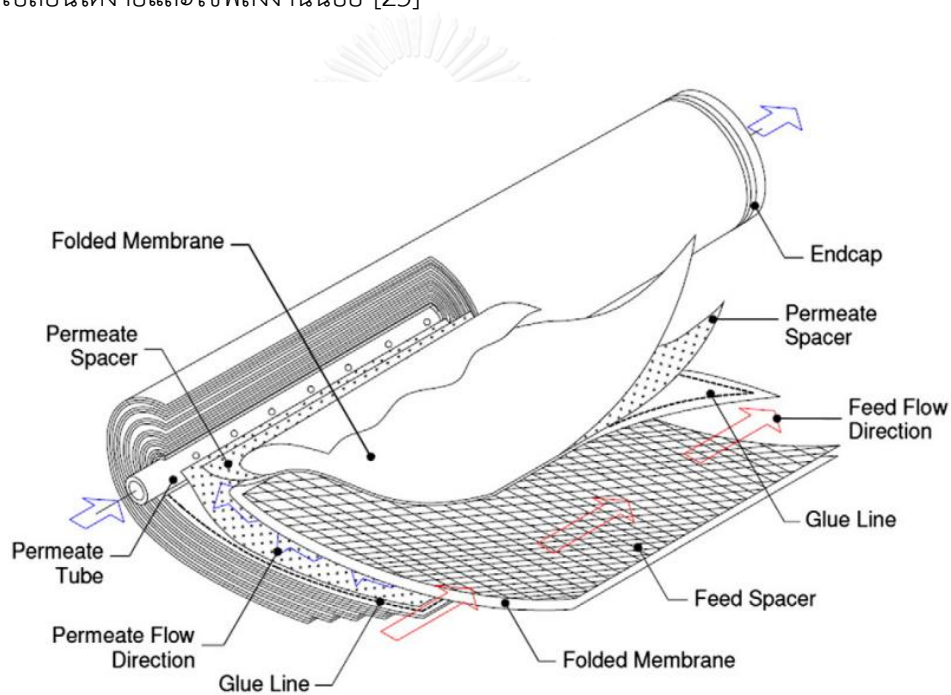
หมายเลข 3 สารละลายน้ำกลับ      หมายเลข 4 สารละลายป้อน

รูปที่ 1.2 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง

### 1.2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Spiral-Wound Supported Liquid Membrane)

ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วนแสดงในรูปที่ 1.3 [23] โดยเยื่อหุ้ม (envelope) ทำจากแผ่นสองแผ่น ติดกาวขอบทั้งสาม และหุ้มด้วยตาข่าย (fabric) ในช่องที่ใช้สำหรับการแพร่ ด้านที่เกิดการแพร่ของเยื่อหุ้มจะถูกจำกัด (fix) ให้อยู่กับที่ในชั้นท่อด้านใน เยื่อหุ้มหลายๆตัวสามารถแยกออกจากกันโดยตาข่ายชนิดบางจะห่อหุ้มรอบๆท่อด้านในอย่างหนาแน่น [24]

ข้อดีของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วนคือมีความหนาแน่นจากการจัดเรียงตัวสูง (high packing density) ราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ใช้จัดวางอุปกรณ์ สามารถเปลี่ยนได้ง่ายและใช้พลังงานน้อย [25]



รูปที่ 1.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน

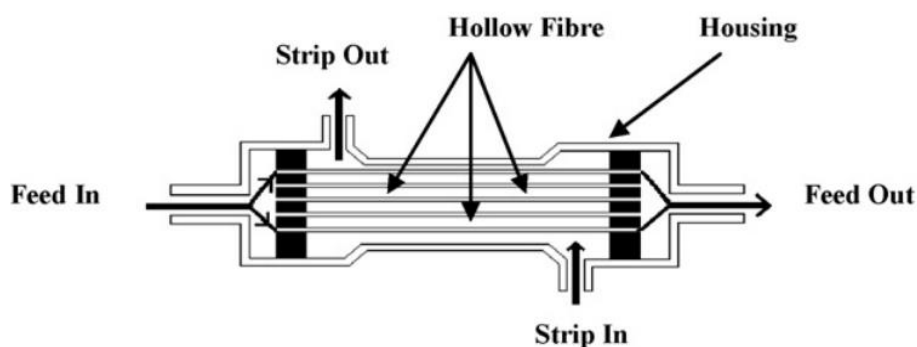
### 1.2.1.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane: HFSLM)

ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (HFSLM) ประกอบด้วยมอดูลเส้นใยกลวง (hollow fiber module) ซึ่งห่อหุ้มเส้นใยกลวง (hollow fiber) จำนวนสามหมื่นห้าพันเส้นอยู่ภายใน โดยที่แต่ละเส้นมีความเป็นรูพรุน (porosity) 25 เปอร์เซ็นต์ และมีพื้นที่ทั้งหมด  $1.4 \times 10^4$  ตารางเซนติเมตร ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะประกอบด้วยสารละลายสามส่วนใหญ่ด้วยกัน คือ

1. สารละลายป้อน (feed solution) เป็นสารละลายที่มีไอออนที่เราต้องการจะแยกอยู่
2. สารละลายอินทรีย์ (liquid membrane) ประกอบด้วยสารสกัดละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ทำหน้าที่สกัดเอาไอออนที่ต้องการจะแยก โดยเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับไอออนโลหะ และเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (metal complex species)
3. สารละลายนำกลับ (stripping solution) เป็นสารละลายที่ทำหน้าที่นำกลับไอออนที่เราต้องการจะแยก โดยทำปฏิกิริยานำกลับกับสารประกอบเชิงซ้อนและดึงไอออนโลหะที่ต้องการไว้กับตัวมันเอง ส่วนสารสกัดจะเคลื่อนที่กลับไปยังสารละลายอินทรีย์เพื่อสกัดไอออนโลหะต่อไป

โดยลักษณะการไหลของสารละลายต่างๆ ของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงคือสารละลายอินทรีย์จะถูกเติมเข้าไปในรูพรุนของเส้นใยกลวง (hollow fiber) สารละลายป้อนจะถูกปั๊มเข้าไปในชั้นท่อแบบไหลวนในเส้นใยกลวง ในขณะที่เดียวกันสารละลายนำกลับจะถูกป้อนเข้าไปในชั้นเปลือกแบบไหลวน เพื่อให้เกิดการสกัดได้อย่างต่อเนื่อง ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแสดงในรูปที่ 1.4 [26]

ข้อดีของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงคือมีค่าการเลือกเกิดที่สูง (high selectivity) มีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรและอัตราการถ่ายเทมวลสูง ใช้พลังงานน้อยและสามารถขยายขนาด (scale up) ได้ง่าย [27, 28] แต่ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีข้อจำกัดคือสารละลายอินทรีย์ (ประกอบด้วยสารสกัดที่ละลายในตัวทำละลาย) เกิดความไม่เสถียรภายในรูพรุนของเส้นใยกลวง และการเปื่อยผิวยภายในรูพรุนที่เกิดจากแรงดึงผิวและความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นระหว่างสองชั้น (side) ของเมมเบรนที่เกิดจากการปั๊มของเหลว ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียสารละลายอินทรีย์ออกจากรูพรุนของเส้นใยกลวง ส่งผลให้เสถียรภาพของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงลดน้อยลง [29-31] โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี (II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1.1 [32-37]



รูปที่ 1.4 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

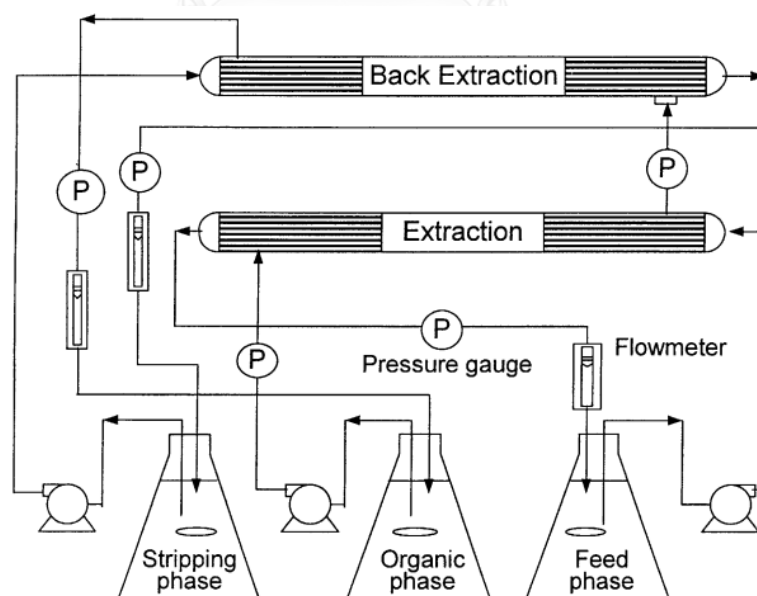
เนื่องจากความไม่เสถียรภาพของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเมื่อใช้ปฏิบัติงานเป็นเวลานานๆ การปรับปรุงความเสถียรภาพของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงคือการต่อมอดูลเส้นใยกลวงสองมอดูลเข้าด้วยกัน โดยระบบนี้คือมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

### 1.3 มอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow fiber contactor module)

วิธีที่สามารถปรับปรุงความเสถียรภาพของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงคือระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (Hollow fiber contactor) [38-40] ระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสประกอบวิธีที่รวมข้อดีของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งระบบนี้จะประกอบด้วยสองมอดูลต่อกัน มอดูลแรกใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการสกัดและมอดูลที่สองใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับ ภายในมอดูลแรก สารละลายป้อนจะถูกปั๊มเข้าไปในชั้นท่อ (tube side) และมอดูลที่สองสารละลายนำกลับที่ถูกปั๊มเข้าไปในชั้นท่อ (tube side) โดยมีลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับในทิศทางเดียวกัน สารละลายอินทรีย์จะถูกปั๊มเข้าไปในชั้นเปลือก (shell side) ของมอดูลที่หนึ่งและถูกปั๊มต่อเนื่องไปยังชั้นเปลือก (shell side) ของมอดูลที่สอง โดยลักษณะการไหลของสารละลายอินทรีย์จะไหลสวนทาง (counter current flow) กับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ สารสกัดที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ (organic liquid) ที่ไหลในเปลือกของทั้งสองมอดูลจะเข้าไปยึดตรึงในรูพรุนของเส้นใยกลวงได้ เพราะคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยกลวงภายในมอดูล ส่วนวัฏภาคที่เป็นน้ำ (aqueous phase) จะไม่สามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนของเส้นใยกลวงได้ ระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นเทคโนโลยีที่สะอาด และก่อให้เกิดของเสียที่น้อยที่สุด [41] ลักษณะการไหลของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสจะทำให้เพิ่มการสกัดและการนำกลับและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง [42] โดยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสสามารถกำจัดข้อจำกัดทางด้านสมดุลและปฏิกิริยาและมีประสิทธิภาพสูง



นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับเพิ่มมากขึ้น 20 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ต่อปริมาตรระหว่างการสัมผัสกันทั้งสองวัฏภาค (วัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคของเหลวอินทรีย์ และวัฏภาคสารละลายนำกลับกับวัฏภาคของเหลวอินทรีย์) ที่มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา [43] เนื่องจากระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสพื้นที่ที่มากกว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทำให้มีการถ่ายเทมวลที่เร็วกว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง [44] นอกจากนี้แล้วการแยกเป็นสองมอดูล (hollow fiber) โดยมอดูลแรกใช้สำหรับปฏิกิริยาการสกัดและมอดูลที่สองใช้สำหรับปฏิกิริยาการนำกลับจะทำให้การถ่ายเทมวลมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้ระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสมีประสิทธิภาพในการแยกไอออนโลหะได้มากกว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง [42] ระบบนี้ไม่ได้คำนึงถึงความแตกต่างของความหนาแน่นและการกระจายตัวระหว่างสองเฟสที่เกิดขึ้น [45, 46] นอกจากนี้ระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสเสถียรภาพ (long-term stability) ในด้านของการสกัดและนำกลับไอออนโลหะซึ่งทำให้เกิดการดำเนินระบบอย่างต่อเนื่องหรือเริ่มดำเนินการระบบใหม่น้อยลง ดังนั้นระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในทางเศรษฐศาสตร์ (economic feasibility) เนื่องจากสามารถดำเนินการระบบได้นานกว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง [38-40] ระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสแสดงในรูปที่ 1.5 [47]



รูปที่ 1.5 ระบบปฏิบัติการแบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

ระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสจะประกอบด้วยสองภูมิภาคเท่านั้น โดยมอดูลตัวที่หนึ่งจะประกอบด้วยภูมิภาคของสารละลายป้อนและภูมิภาคของสารสกัดในตัวทำละลายอินทรีย์ (ของเหลวอินทรีย์) ซึ่งแตกต่างจากระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่จะประกอบด้วยสามภูมิภาค ไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) จะเกิดปฏิกิริยาการสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์ที่ชั้นท่อด้านในของมอดูลตัวที่หนึ่งและเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะ (metal complex species) หลังจากนั้นไอออนของสารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ผ่านรูพรุนเข้าสู่ภูมิภาคของสารละลายอินทรีย์ที่อยู่ชั้นเปลือกของมอดูลตัวที่หนึ่งด้วยผลต่างของความเข้มข้นของไอออนสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับ (driving force) ไอออนสารประกอบเชิงซ้อนจะไหลไปพร้อมกับสารละลายอินทรีย์ไปเข้าสู่เปลือกของมอดูลตัวที่สองและเกิดปฏิกิริยานำกลับของไอออนโลหะโดยไอออนสารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสด้านในท่อของมอดูลตัวที่สอง ไอออนโลหะจะถูกดึงเข้าไปอยู่ในสารละลายนำกลับส่วนสารสกัดจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในมอดูลตัวที่หนึ่งโดยเป็นการไหลวนแบบต่อเนื่อง โดยลักษณะการไหลของสารในลักษณะนี้ทำให้ระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสมีประสิทธิภาพในการสกัดและนำกลับไอออนโลหะได้นานถึง 700 ชั่วโมงหรือประมาณ 29 วัน [38]

ข้อดีของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส [13, 48]

- ไม่มีข้อจำกัดในด้านสมดุลของการสกัด
- มีประสิทธิภาพในการสกัดสูง มีอัตราการถ่ายเทมวลที่สูง
- สกัดและนำกลับในขั้นตอนเดียว
- มีเสถียรภาพสูงเนื่องจากสารสกัดหลุดออกจากรูพรุนของเส้นใยกลวงได้ช้าลง
- มีพื้นที่หน้าตัดต่อหน่วยปริมาตรที่สูงเมื่อปฏิบัติการโดยใช้ความเร็วการป้อนต่ำหรือสูง
- ไม่เกิดอิมัลชัน (emulsion formation)
- ขยายขนาดของมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสได้โดยการต่ออนุกรมหรือต่อขนานกันหลายๆมอดูล
- เพิ่มค่าคอนเวอร์ชันของไอออนโลหะที่ต้องการกับข้อจำกัดสมดุลทางปฏิกิริยาได้
- ปฏิบัติการที่สามารถปลอดภัยไร้โรคได้

ข้อเสียของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

- ใช้สารสกัดในปริมาณมาก
- ใช้มอดูลเส้นใยกลวงสองมอดูล ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

จากระบบการสกัดที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น นักวิจัยหลายท่านได้ทดลองสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรีและไอออนอาร์เซนิกด้วยวิธีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1

**ตารางที่ 1.1** แสดงงานวิจัยที่ผ่านมาของการสกัดไอออนเมอร์คิวรีและอาร์เซนิก

| Authors                          | Feed solution        | Ion<br>removal | Extractant                                  | Methods |
|----------------------------------|----------------------|----------------|---|---------|
| Francis et al.,<br>2000 [5]      | Synthesis<br>water   | Hg(II)         | Cyanex 471x                                 | LL      |
| Meera et al.,<br>2001 [6]        | Synthesis<br>water   | Hg(II)         | Cyanex 923                                  | LL      |
| Gupta et al.,<br>2008 [7]        | Synthesis<br>water   | As(III),As(V)  | Cyanex 301                                  | LL      |
| Fábrega et al.,<br>2007 [8]      | Synthesis<br>water   | Hg(II)         | Aliquat 336                                 | LL      |
| Perez et al.,<br>2007 [15]       | Synthesis            | As(V)          | Cyanex 921                                  | SLM     |
| Güell et al.,<br>2010 [16]       | Synthesis<br>water   | As(III),As(V)  | Aliquat 336                                 | SLM     |
| Chakrabarty et<br>al., 2010 [17] | Synthesis<br>water   | Hg(II)         | TOA   | SLM     |
| Prapasawat et<br>al., 2007 [32]  | Synthesis<br>water   | As(III),As(V)  | Cyanex 923                                  | HFSLM   |
| Pancharoen et<br>al., 2010 [33]  | Co-produced<br>water | As(III),As(V)  | Aliquat 336                                 | HFSLM   |
| Pancharoen et<br>al., 2009 [34]  | Co-produced<br>water | Hg(II)         | TOA   | HFSLM   |
| Lotongkum et<br>al., 2011 [35]   | Co-produced<br>water | Hg(II),As(V)   | Mixture of Aliquat<br>336 and cyanex<br>471 | HFSLM   |

|                               |                          |                 |                           |   |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------|---------------------------|---|
| Said Bey et al.,<br>2010 [36] | Synthesis<br>water       | As(V)           | Aliquat 336               | Polyvinyl-<br>dine<br>fluoride<br>HFSLM |
| Mafu et al.,<br>2012 [37]     | Industrial<br>wastewater | As(III)         | undecane:dodeca<br>ne 3:1 | HFSLM                                   |
| งานวิจัยนี้                   | น้ำปนเปื้อนคอน<br>เดนเสท | Hg(II)<br>As(V) | Aliquat 336               | HFC                                     |

#### 1.4 สมบัติของปรอทและสารหนู

ปรอทคือโลหะที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศเพราะมีความดันไอที่ต่ำ เกลือของปรอทจะมีสองอย่างคือ เมอร์คิวรี(I) เรียกว่าเมอร์คิวรัส และเมอร์คิวรี(II) เรียกว่าเมอร์คิวริก โดยธรรมชาติจะพบเกลือในรูปแบบที่เป็นเมอร์คิวริกมากกว่าเมอร์คิวรัส เมื่อเกลือละลายน้ำจะมีความเป็นพิษ ปรอทจะอยู่ในรูปของโลหะ (metallic form) สารประกอบอินทรีย์ (inorganic mercury compound) และสารประกอบอินทรีย์ (organic mercury compound) โดยสมบัติของปรอทแสดงในตารางที่ 1.2 [49] และสมบัติของสารหนูแสดงในตารางที่ 1.3 [50]

#### ตารางที่ 1.2 สมบัติของปรอท

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

### ตารางที่ 1.3 สมบัติของสารหนู

| สมบัติทางกายภาพ                  | ค่าที่วัดได้                                    |
|----------------------------------|---|
| หมู่, คาบ                        | 5A คาบที่ 4                                     |
| ลักษณะ                           | ธาตุกึ่งโลหะแข็งเปราะที่มีความเป็นผลึกสีเทาเงิน |
| เลขออกซิเดชัน(oxidation number)  | -3, 0, +3, +5                                   |
| เลขอะตอม(atomic number)          | 33  |
| เลขมวล(mass number)              | 79.4  |
| ความถ่วงจำเพาะ(specific gravity) | 5.73  |
| จุดหลอมเหลว(melting point)       | 817 °C ที่ 28 atm                               |
| จุดเดือด(boiling point)          | 613 °C  |
| ความดันไอ(vapor pressure)        | 1 mm Hg ที่ 372 °C,                             |

สารหนูจะประกอบด้วยเลขออกซิเดชัน 4 ค่าคือ -3, 0, +3 และ +5 โดยที่พบในธรรมชาติจะพบเฉพาะเลขออกซิเดชัน +3 และ +5 โดยอาร์เซนิก(III) เป็นชนิดที่เป็นกรดแก่ ส่วนอาร์เซนิก(V) จะเป็นชนิดกรดอ่อน โดยปกติแล้วสารหนูที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ อาร์เซไนต์ (arsenite)  $\text{AsO}_3^{3-}$  และ อาร์ซีเนต (arsenate)  $\text{AsO}_4^{3-}$  ซึ่งเป็นอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ตามลำดับ อาร์เซนิก(V) จะเสถียรในสภาวะที่มีอากาศหรือมีออกซิเจนในปริมาณมาก (สภาวะออกซิเดชัน) ส่วนอาร์เซนิก(III) จะเสถียรในสภาวะที่ไม่มีอากาศ (สภาวะรีดักชัน) จึงพบอาร์เซนิก(V) มากกว่าอาร์เซนิก(III) ในบรรยากาศปกติ รูปแบบการฟอร์มตัวของอาร์เซนิก(V) ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดเบสของสภาวะนั้นๆ โดยที่สภาวะความเป็นกรดเบสน้อยกว่าค่า 2 อาร์เซนิก (V) จะฟอร์มตัวอยู่ในรูปของอาร์เซนิกที่เป็นกลาง ไม่มีประจุคือ  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  ในช่วงค่าความเป็นกรดเบสระหว่าง 3-6 อาร์เซนิก(V) จะอยู่ในรูปของแอนไอออน (anion) คือ  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  และรูปฟอร์ม  $\text{H}_2\text{AsO}_4^{2-}$  ในช่วงค่าความเป็นกรดเบส 8-11 ส่วนในช่วงที่ค่าความเป็นเบสสูง (ค่าความเป็นกรดเบสมากกว่า 12) อาร์เซนิก(V) จะฟอร์มตัวในรูปของ  $\text{AsO}_4^{3-}$  [36]

## 1.5 พิษของปรอทและสารหนู

### 1.5.1 พิษของปรอท

ปรอทเป็นธาตุที่มีพิษมากที่สุด เป็นสารก่อมะเร็งและไม่ย่อยสลายตามธรรมชาติ ปรอทที่อยู่ในรูปโลหะ ( $Hg^0$ ) และปรอทในรูปสารประกอบอินทรีย์จะมีความเป็นพิษน้อยกว่าปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์ เมื่อปรอทระเหยเป็นไอจะมีความเป็นพิษที่รุนแรง เมื่อสูดดมเข้าไปในร่างกาย จะเข้าไปในกระแสเลือดไปที่ปอดและกระจายทั่วร่างกาย ในเซลล์ร่างกาย ปรอทจะถูกออกซิไดซ์เป็น  $Hg^{2+}$  ซึ่งมีความว่องไวและเป็นพิษสูง รูปแบบฟอร์มที่มีความเป็นพิษสูงสุดคือสารประกอบอนินทรีย์  $Hg^{2+}$  เมอร์คิวรี(II) กลายเป็นเมทิลเลต (methylated) ได้โดยรีดิวซ์ด้วยแบคทีเรียและเปลี่ยนรูปเป็นเมทิลเมอร์คิวรี (methylmercury) ประกอบด้วยโมโนเมทิลเมอร์คิวรี  $MeHg^+$  หรือไดเมทิลเมอร์คิวรี  $Me_2Hg$  ซึ่งในรูปแบบนี้จะเป็นพิษสูงสุด เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะจับกรดอะมิโนและทำให้เอนไซม์และกรดนิวคลีอิกเสื่อมสภาพ ซึมเข้าไปในเมมเบรนและขัดขวางเลือดไปเลี้ยงที่สมอง ทำลายระบบประสาท และเป็นโรคมินามาตะ [51-54]

### 1.5.2 พิษของสารหนู

มาตรฐานกำหนดให้น้ำดื่มที่ปนเปื้อนสารหนูต้องมีความเข้มข้นต่ำกว่า 50 ส่วนในล้านส่วน เมื่อดื่มน้ำที่มีส่วนประกอบของสารหนูเกินกว่าค่ามาตรฐานเข้าไป จะทำให้เกิดอาการแบบเฉียบพลัน คือ อาเจียน ปวดท้องรุนแรง และเมื่อสะสมในร่างกายเป็นเวลานานจะทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับผิวหนัง เม็ดสีผิวหนังที่มากหรือน้อยเกินไป โรคผื่นผิวหนัง ทำให้ผิวหนังเป็นกระ มีจุดดำและรอยสีน้ำตาลเกิดขึ้น การสูดอากาศที่ปนเปื้อนสารหนูเข้าไปส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจทำให้ไอเรื้อรังและเกิดโรคหลอดลมปอด เมื่ออาร์เซนิกสะสมในร่างกายเป็นระยะเวลานาน จะทำลายระบบสมองส่วนกลาง เกิดโรคปลายประสาทอักเสบ ส่งผลให้พฤติกรรมเปลี่ยน สับสนและความจำเสื่อม นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโรคหลอดเลือดแดงส่วนปลาย โรคหัวใจ และทำให้เกิดมะเร็งผิวหนัง, ตับ โดยจะเกิดเป็นมะเร็งที่ตับเป็นส่วนใหญ่ [55]

## 1.6 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนปรอทและสารหนูในน้ำปนเปื้อนจากคอนเดนเสทด้วยระบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส
2. เพื่อสกัดไอออนปรอทและสารหนูในน้ำปนเปื้อนจากคอนเดนเสทให้ได้ไม่น้อยกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

## 1.7 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 และ 0.06 โมลาร์
2. การแปรค่าความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้คือ Aliquat 336 เช่น 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
3. ชนิดของสารละลายนำกลับที่เหมาะสม เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมไทโอซัลเฟต, ไทโอยูเรีย, น้ำกลั่นและสารละลายกรดไนตริก
4. ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมคือ 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.11, 0.13 โมลาร์
5. ชนิดของตัวทำละลาย เช่น เคโรซีน, โซโคลเฮกเซน, ไดคลอโรอีเทน และออกทานอล
6. การปรับอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับระหว่าง 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350 มิลลิลิตรต่อนาที
7. ศึกษาประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส

### 1.8 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. รวบรวมข้อมูล ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนปรอทและสารหนูโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบสัมผัส
2. ศึกษาวิธีการทดลอง เตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. ทดลองสกัดและนำกลับไอออนปรอทและสารหนูโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม ศึกษาความเข้มข้นของกรดในสารละลายป้อน
4. ศึกษาตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด, ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ, อัตราการไหลของสารละลายป้อนเข้า, ชนิดของตัวทำละลายที่เหมาะสมและเสถียรภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง เขียนบทความเชิงวิชาการและเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.9 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ความรู้ในการสกัดไอออนปรอทและสารหนูจากน้ำปนเปื้อนคอนเดนเสทด้วยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส
2. ความรู้เกี่ยวกับตัวแปรและสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดไอออนปรอทและสารหนูจากน้ำปนเปื้อนคอนเดนเสท
3. นำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ในภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมที่มีการนำทิ้งปนเปื้อนไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V)



## บทที่ 2

### ทฤษฎี

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบของระบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัสที่ประกอบด้วยสารละลายป้อนและนำกลับ, สารละลายอินทรีย์และตัวทำละลายอินทรีย์ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยกลไกการถ่ายเทมวลและการคำนวณค่าคงที่ถ่ายเทมวล

#### 2.1 สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

##### 2.1.1 สารละลายป้อน

สารละลายป้อนที่ใช้คือน้ำปนเปื้อนที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติ โดยกระบวนการผลิตนั้น เมื่อขุดเจาะเข้าไปในชั้นหินที่มีปิโตรเลียมแล้วและดูดน้ำมันปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติมาใช้ พบว่ายังมีน้ำที่ปนเปื้อนขึ้นมาจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมด้วย เรียกว่า produced water ซึ่งน้ำปนเปื้อนนี้จะประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ขึ้นกับแหล่งที่มาของน้ำปนเปื้อน บางแหล่งอาจพบปรอทและสารหนูในจำนวนมาก บางแหล่งอาจพบเกลือคลอไรด์ในปริมาณมาก น้ำปนเปื้อนนี้ประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์ โลหะหนัก สารรังสี และสารประกอบอินทรีย์ [2] โดยจะพบไอออนเมอร์คิวรีที่ความเข้มข้นประมาณ 1000 ส่วนในพันล้านส่วน โลหะหนักที่พบในน้ำปนเปื้อนโดยส่วนมากจะเป็นไอออนเมอร์คิวรีและอาร์เซนิก นอกจากนี้ยังพบเกลือของโซเดียม, แมกนีเซียมและแคลเซียมด้วย ลักษณะทางกายภาพของน้ำปนเปื้อนจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมจะมีเป็นสีเหลืองเข้มหรือสีน้ำตาลอ่อน มีคราบน้ำมันลอยอยู่ที่ผิวหน้า และยังมีฝุ่นและตะกอนอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อนำมาใช้ทดลองต้องทำการกรองตะกอนและฝุ่นออกให้หมด

##### 2.1.2 สารละลายนำกลับ

สารละลายนำกลับเป็นสารละลายที่ทำหน้าที่นำกลับไอออนที่เราต้องการจะแยก โดยทำปฏิกิริยานำกลับกับสารประกอบเชิงซ้อนและดึงไอออนโลหะที่ต้องการจะแยกไว้กับตัวมันเอง ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนเหลือเพียงส่วนของสารสกัด สารสกัดจะเคลื่อนที่กลับไปยังวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพื่อเกิดปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะอย่างต่อเนื่อง โดยสารละลายนำกลับจะมีสามจำพวกคือสารละลายนำกลับชนิดเบส ชนิดกลาง และชนิดกรด ซึ่งสารละลายชนิดเบสมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการเกิดปฏิกิริยานำกลับกับสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากสารสกัดชนิดที่เป็นเบส เช่น สารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหก เพราะสามารถที่จะดึงไอออนประจุลบที่ต้องการจะแยกมาไว้ที่ตัวมันได้

## 2.2 สารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในระบบเยื่อแผ่นเหลวมีหลายชนิดที่มีลักษณะเฉพาะตัวหรือมีราคาแพงเพื่อใช้ในการแยกไอออนโลหะในระบบเยื่อแผ่นเหลว สารสารสกัดแต่ละชนิดประกอบด้วยสารสกัดชนิดกรด, ชนิดเบส และชนิดที่เป็นกลางแสดงในตารางที่ 2.1 [56]

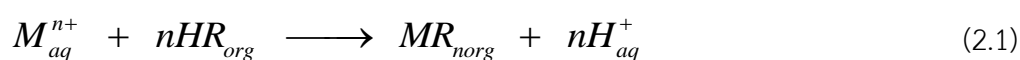
ตารางที่ 2.1 สารสกัดแต่ละชนิด

| Type                      | Active Substance                                    | Tradename  |
|---------------------------|---|--|
| Acidic extractants        |   |  |
| Phosphoric acid           | Mono-2-ethylhexylphosphoric acid                    | M2EHPA   |
|                           | di-2-ethylhexyl phosphoric acid                     | D2EHPA, DP-8R, TOPS-99                                   |
| Phosphonic acid           | 2-ethylhexylphosphonic acid-mono-2-ethylhexyl ester | PC-88A   |
| Phosphinic acid           | di-2,4,4-trimethylpentyl phosphinic acid            | Cyanex 272   |
|                           | di-2,4,4-trimethylpentyl dithiophosphinic acid      | Cyanex 301   |
| Hydroxybenzophenone oxime | 5-dodecylsalicylaldoxime                            | LIX 860 series, Lix 622                                  |
|                           | 5-nonilsalicylaldoxime                              | Acorga P50 and P5000 series, Acorga PT5050, Acorga M5640 |
|                           | 2-hydroxy-5-nonylacetophenone oxime                 | LIX 84   |
|                           | mixtures of ketoximes and salicylaldoximes          | LIX 984  |
| $\beta$ -diketones        | -   | LIX 54   |

| Basic extractants     |  |                                |
|-----------------------|--|--------------------------------|
| Primary amines        | terc-alkylamine (isomers mixture in the C12 - C14 range)     | Primene 81r                    |
|                       | terc-alkylamine (isomers mixture in the C16 - C22 range)     | Primene JMT                    |
| Secondary amines      | N-dodecyl-1,1,3,3,5,5-hexamethylhexylamine<br>tri-octylamine | Amberlite IA2                  |
| Tertiary amines       | tri-isooctylamine  | Alamine 336                    |
|                       | 50 % mixture of tri-octylamine and tri-decylamine            | hostarex A324<br>hostarex A327 |
|                       | tridodecylamine  | Alamine 304                    |
|                       | tri-octylmethylammonium chloride                             | Aliquat 336                    |
| Solvation extractants |  |                                |
| Phosphoric esters     | tri-n-butylphosphate   | TBP                            |
| Phosphonic esters     | dibutylbutylphosphonate                                      | DBBP                           |
| Phosphine oxides      | tri-n-octylphosphine   | Cyanex 921                     |
|                       | mixture of phosphine oxides                                  | Cyanex 923                     |
| Phosphine sulphides   | tri-isobutylphosphine sulphide                               | Cyanex 471X                    |

### 2.2.1. สารสกัดชนิดกรด (Acidic type extractants)

สารสกัดชนิดนี้จะเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับโลหะโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cationic exchange reaction) ดังแสดงในสมการที่ (2.1) โดยสารสกัดสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มคือสารสกัดที่ไม่ใช่คีเลท (non-chelating) และสารสกัดชนิดคีเลท (chelating) [56]



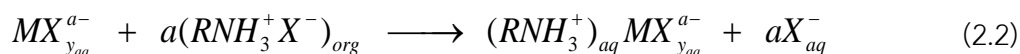
|       |          |  |
|-------|----------|--|
| เมื่อ | $M^{n+}$ | คือ ไอออนโลหะที่เป็นประจุบวก                         |
|       | HR       | คือ สารสกัดชนิดกรด                                   |
|       | $H^+$    | คือ ไฮโดรเจนไอออน                                    |
|       | $MR_n$   | คือ สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ (metal complex species) |

สารสกัดที่ไม่ใช่คีเลทจะแบ่งออกเป็นสองชนิดด้วยกันคือ สารอินทรีย์ของกรดฟอสฟอรัส (organic derivative of phosphorous acid) และสารอินทรีย์ของกรดคาร์บอกซิลิก (organic derivative of carboxylic acid) การฟอร์มตัวประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ (ester) ของกรดฟอสฟอริก, ฟอสฟอนิก, ฟอสฟินิก และสารประกอบอื่นที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกัน โดยส่วนมากจะเป็นหมู่ไดเอทิลเฮกซิลฟอสฟอริกแอซิด (di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid) หรือรู้จักในชื่อ DEHPA ส่วนชนิดที่สองประกอบด้วย สารสังเคราะห์ประเภทกรดเวซาติก (versatic acid) และกรดเนฟเทนิค (naphthenic) ซึ่งได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

สารสกัดชนิดคีเลทประกอบด้วยหมู่ที่สามารถแตกตัวให้โปรตอนได้ง่ายและสามารถฟอร์มตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนโลหะได้ โดยสารสกัดชนิดนี้ที่ใช้อยู่คือ เคโทซาม (ketoximes), ซาลิซิลาลดอกซาม (salicylaldoximes) หรือ ไดเคโทน (diketones)

### 2.2.2. สารสกัดชนิดเบส (Basic or Anionic type extractants)

สารสกัดชนิดนี้เหมาะสำหรับสกัดหรือถ่ายเมมวอลของไอออนโลหะที่เป็นประจุลบโดยเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุลบ สารเอมีน (amine) ต้องเปลี่ยนเป็นเกลือของเอมีนก่อน (amine salt) เพื่อเตรียมไอออนประจุลบไว้แลกเปลี่ยนกับไอออนของโลหะ ปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดชนิดเบสแสดงในสมการที่ (2.2) [56]



|       |                         |  |
|-------|-------------------------|--|
| เมื่อ | $M_y^{n+}$              | คือ ไอออนโลหะที่เป็นประจุบวก                         |
|       | $RNH_3^+X^-$            | คือ สารสกัดชนิดกรด                                   |
|       | $X^-$                   | คือ แอนไอออนของโลหะ (anion of metal)                 |
|       | $(RNH_3^+X^-)MX_y^{a-}$ | คือ สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ (metal complex species) |

ปฏิกิริยาอีกแบบหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้จากขั้นตอนการสกัดโลหะด้วยตัวมันเอง ถ้ามีความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสมที่ทำให้เกลือของเอมีนสามารถอยู่ในสารละลายน้ำ (aqueous solution) ได้ สารสกัดชนิดเบสขึ้นกับความสามารถในการเปลี่ยนรูปฟอร์ม (transformation) จากเอมีนไปเป็นเกลือของเอมีนและความสามารถของไอออนโลหะในรูปแบบที่เป็นประจุลบ โดยส่วนมากสารสกัดชนิดเบสจะเป็นสารเอมีนหรือเกลือของเอมีนที่มีสี่แชน (quaternary ammonium salts) สารสกัดที่นิยมใช้สำหรับการถ่ายเทมวลของไอออนซิลเวอร์ (Ag(I)) ไอออนทองคำ (Au(I)) จากสารละลายกรดไฮยาไนต์คือ LIX 79

### 2.2.3. สารสกัดชนิดซอลเวท (neutral or solvation type extractant)

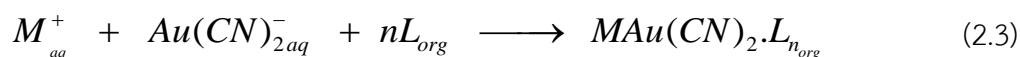
สารสกัดชนิดนี้เป็นสารสกัดอนินทรีย์ที่มีโมเลกุลที่เป็นกลางหรือเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโดยประกอบด้วยตัวที่ให้อิเล็กตรอน (electron donor) ในโมเลกุลของสารสกัด สารสกัดชนิดกลาง (solvation) คือการละลายของสารละลายอนินทรีย์ในสารละลายอินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้น [56]

สารสกัดชนิดเป็นกลางแบ่งได้ออกเป็นสองประเภทคือ

1. สารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยพันธะของออกซิเจนและคาร์บอน
2. สารสกัดที่ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนหรือซัลเฟอร์ที่ต่อพันธะกับอะตอมของ

ฟอสฟอรัส

สารสกัดชนิดกลางจะมีพันธะของออกซิเจนต่อกับอะตอมของฟอสฟอรัส โดยฟอสฟอรัสแบ่งออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ๆคือ ฟอสเฟสเอสเทอร์ (phosphate ester) ฟอสฟอนิกเอสเทอร์ (phosphonic esters) และฟอสฟิโนออกไซด์ (phosphine oxide) ในกรณีของสารสกัดชนิดซอลเวทที่มีอะตอมของซัลเฟอร์ต่อกับอะตอมของฟอสฟอรัส มีเพียงชนิดเดียวคือ Cyanex471X ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบของไตรอัลคิลฟอสฟิโนซัลไฟด์ (trialkylphosphine sulphide:  $R_3PS$ ) สารสกัดชนิดที่เป็นกลางที่ประกอบด้วยพันธะของคาร์บอนและออกซิเจนจะเป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันจำพวก อีเทอร์ คีโตน เอสเทอร์ และแอลกอฮอล์ โดยปฏิกิริยาการสกัดไอออนทองคำด้วยสารสกัดที่เป็นกลางแสดงในสมการที่ (2.3)



เมื่อ L คือ สารสกัดชนิดที่เป็นกลาง

M<sup>+</sup> คือ ไอออนโลหะ

## 2.3 ตัวทำละลายอินทรีย์ (organic solvent)

ตัวทำละลายอินทรีย์ทำหน้าที่ในการละลายสารสกัดเพื่อลดความหนืดของสารสกัดและใช้สารสกัดในปริมาณน้อยลง โดยปัจจัยในการเลือกตัวทำละลายอินทรีย์มีอยู่หลายปัจจัยด้วยกันคือ [14]

1. ตัวทำละลายอินทรีย์ต้องมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ที่สูงพอเพื่อให้มั่นใจได้ว่าจะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคที่เป็นน้ำ (aqueous phase)

2. ตัวทำละลายอินทรีย์จะต้องมีความหนืดที่ต่ำ (low viscosity) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลที่สูงผ่านชั้นของเยื่อแผ่นเหลว ในบางกรณีพบว่าการใช้สารละลายอินทรีย์ที่มีความหนืดที่ต่ำจะทำให้เสถียรภาพของระบบเยื่อแผ่นเหลวลดลง แรงตึงผิว (surface tension) ระหว่างวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ (organic phase) และวัสดุรองรับชนิดพอลิฟอสฟีนจึงมีความสำคัญเนื่องจากจะทำให้รักษาสารละลายอินทรีย์ไว้ในรูพรุนด้วยแรงคะปิลลารีได้ (capillary force)

3. การระเหยของตัวทำละลายอินทรีย์ (โดยส่วนมากจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวทำละลายอินทรีย์) ต้องมีการระเหยที่ต่ำเพื่อรักษาให้สารละลายอินทรีย์อยู่ในรูพรุนได้ดี

4. แรงตึงผิว (interfacial tension) ของตัวทำละลายอินทรีย์ แรงตึงผิวที่น้อยจะทำให้เยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane) สลายตัวได้เร็วขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามจะเป็นการเพิ่มการถ่ายเทมวลโดยแรงควบคู่ (facilitate) ระหว่างวัฏภาคที่สัมผัสกัน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (carrier-mediated transport) คือตัวทำละลายอินทรีย์สามารถละลายได้ง่ายในสารสกัด

5. การละลาย (solubility) ตัวทำละลายที่มีค่าการละลายที่สูงจะทำให้ละลายในสารสกัดได้ดี และทำให้เกิดการถ่ายเทมวลที่สูงขึ้น ดังนั้น ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ส่วนมากจะประกอบด้วยสารที่เป็นอะลิฟาติกและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีไฮโดรโฟบิกอีเทอร์ (hydrophobic ether) และไฮโดรโฟบิกเอสเทอร์, แอลกอฮอล์ ยกตัวอย่างเช่น เคโรซีน โดยรายละเอียดของตัวทำละลายอินทรีย์แสดงในตารางที่ 2.2 [14]

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของตัวทำละลายที่นิยมใช้

| Organic solvent         | Density x<br>$10^3$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Viscosity<br>x $10^3$<br>(Pa.s) | Surface<br>tension<br>x $10^3$<br>(N/m) | Solubility in<br>water x $10^{-3}$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|--|---------------------------------|---|--|
| Di-n-butyl phthalate    | 1.04                                     | 15.4                            | 36.4                                    | 8.91   |
| n-Amyl benzoate         | 0.95                                     | 3.42                            | 32.7                                    | 8.06   |
| Dodecane                | 0.75                                     | 1.50                            | 24.9                                    | 0.07   |
| Heptane                 | 0.68                                     | 0.38                            | 19.6                                    | -  |
| Toluene                 | 0.87                                     | 0.54                            | 27.9                                    | -  |
| Kerosene                | 0.79                                     | 1.24                            | 25.3                                    | -  |
| o-Nitrophenyloctylether | 1.04                                     | 12.5                            | 33.9                                    | 0.16   |
| Diphenyl methane        | 1.00                                     | 2.96                            | 38.4                                    | 6.51   |
| Dihexyl ether           | 0.79                                     | 1.87                            | -                                       | -  |
| 1-Octanol               | 0.83                                     | 7.47                            | 27.1                                    | -  |

ตัวทำละลายที่ใช้งานวิจัยนี้ประกอบด้วยตัวทำละลายทั้งสี่ชนิดคือเคโรซีน, ไฮโคลเฮกเซน, ไดคลอโรอีเทนและออกทานอล ซึ่งคุณสมบัติทางด้านความมีขี้และความหนืดของตัวทำละลายแสดงในตารางที่ 2.3 [57, 58]

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางเคมีของตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้งานวิจัย

| Diluents           | Dielectric constant ( $\epsilon$ ) | Dipole moment | Viscosity (cP) |
|--------------------|------------------------------------|---------------|----------------|
| Kerosene           | 2.00                               | 0             | 1.95           |
| Cyclohexane        | 2.02                               | 0             | 1.02           |
| 1,2-dichloroethane | 10.42                              | 1.8           | 0.84           |
| 1-octanol          | 10.3                               | 2.0           | 7.47           |

## 2.4 กลไกการถ่ายเทมวล

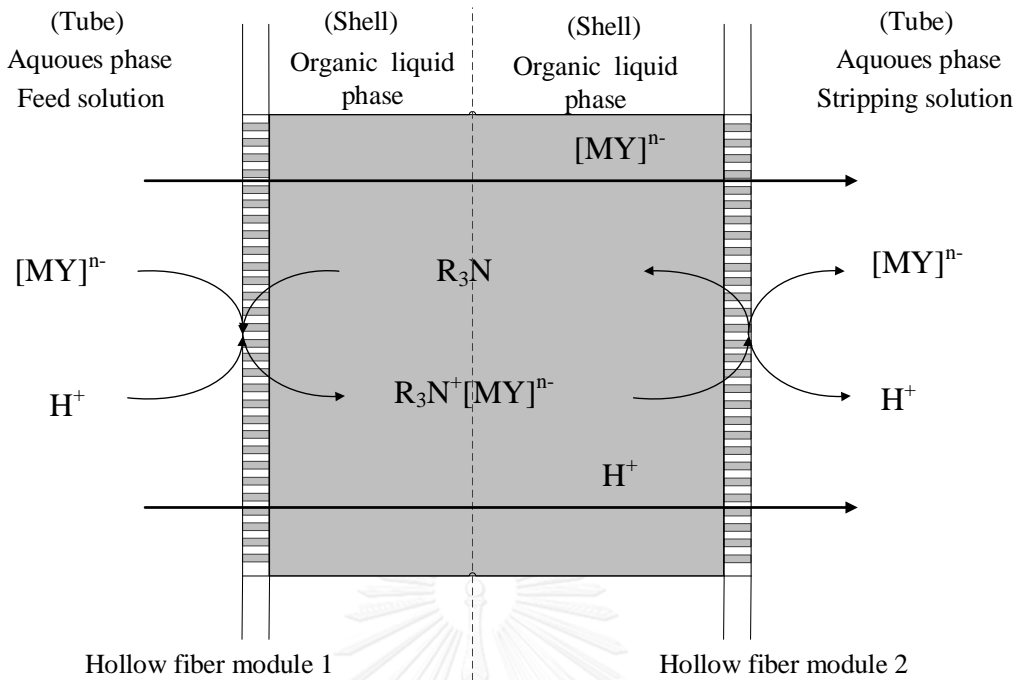
การถ่ายเทมวลหรือการถ่ายโอนมวลในระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสเป็นการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (facilitate transport) ซึ่งการถ่ายเทมวลแบบควบคู่จะเป็นการถ่ายเทมวลทั้งสองชนิดพร้อมๆกันจากฝั่งสารละลายป้อนไปยังสารละลายนำกลับ โดยแรงขับเคลื่อนคือความแตกต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างผิวสัมผัสระหว่างสารละลายที่เป็นน้ำ (ประกอบด้วยสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ) และของเหลวอินทรีย์

ในการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complex species) ระหว่างสารสกัดและไอออนที่ต้องการแยกโดยเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายของเหลวอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังชั้นของสารละลายของเหลวอินทรีย์และเคลื่อนที่จากชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งไปที่มอดูลที่สองไปยังชั้นเปลือกของมอดูลที่สอง นอกจากนี้ ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเช่นกัน โดยเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสารประกอบเชิงซ้อนหรือทิศทางสวนทางกับสารประกอบเชิงซ้อน หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับซึ่งเป็นการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายของเหลวอินทรีย์และสารละลายนำกลับกลายเป็นไอออนที่ต้องการแยกและสารสกัด เมื่อสารทั้งสองชนิด (สารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออนหรือคลอไรด์ไอออน) เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน จะทำให้การเคลื่อนที่เป็นแบบการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน (cotransport) ถ้าฟลักซ์การถ่ายโอนมวลอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกัน จะทำให้การเคลื่อนที่เป็นแบบสวนทางกัน (countertransport)

### 2.4.1 การถ่ายเทมวลในทิศทางเดียวกัน

การถ่ายเทมวลลักษณะนี้ ไอออนโลหะจะทำปฏิกิริยากับอิลีกตรอนคู่โดดเดี่ยว (neutral ion pair) ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนและแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว โดยแรงขับเคลื่อนคือความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) ของการถ่ายเทมวลในทิศทางเดียวกันไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) การถ่ายเทมวลในลักษณะนี้คือไอออนโลหะชนิดประจุลบ (anion) ( $MY^n^-$ ) จะทำปฏิกิริยาการสกัดกับสารสกัด ( $R_3N^+$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

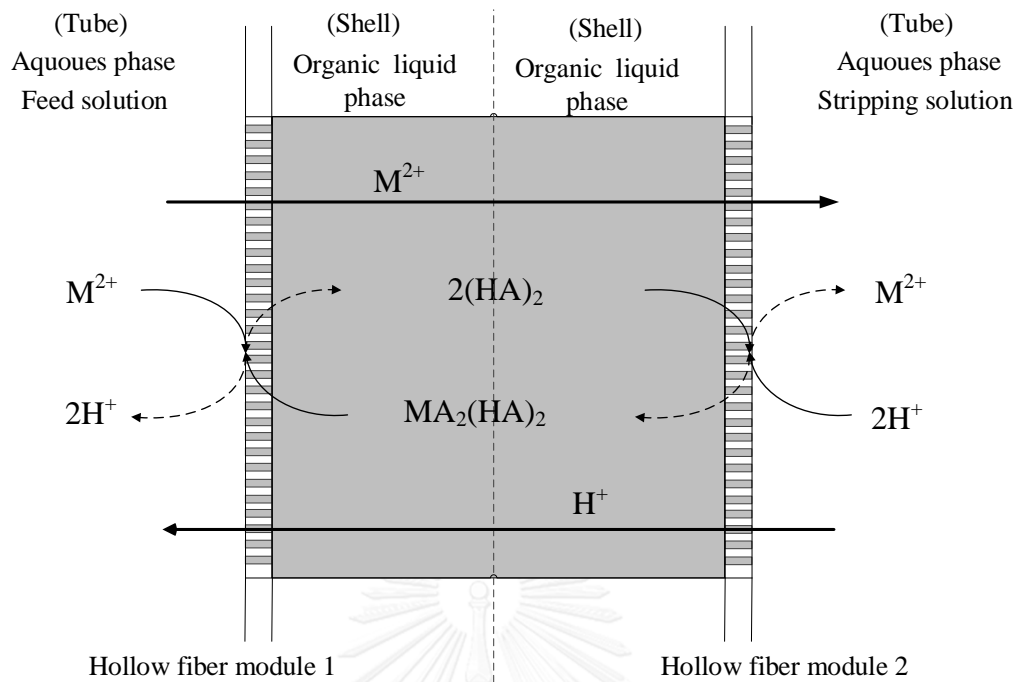




รูปที่ 2.1 รูปแบบการถ่ายเทมวลในทิศทางเดียวกันของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

#### 2.4.2 การถ่ายเทมวลในทิศทางสวนทางกัน

แรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลในลักษณะนี้คือความแตกต่างของสารประกอบ (compound) จากฝั่งสารละลายนำกลับของมอดูลที่สองไปยังฝั่งสารละลายป้อนของมอดูลที่หนึ่ง ดังนั้นการถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากฝั่งสารละลายป้อนไปสู่สารละลายนำกลับ ทำให้สารประกอบและสารประกอบเชิงซ้อนมีการถ่ายเทมวลในทิศทางตรงกันข้าม การถ่ายเทมวลในลักษณะนี้คือไอออนโลหะชนิดที่เป็นประจุบวก (cation) ( $M^{2+}$ ) เกิดปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรด (HA) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแบบการถ่ายเทมวลในทิศทางสวนทางกันของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสในมอดูลที่หนึ่ง (เกิดปฏิกิริยาการสกัด) [48]

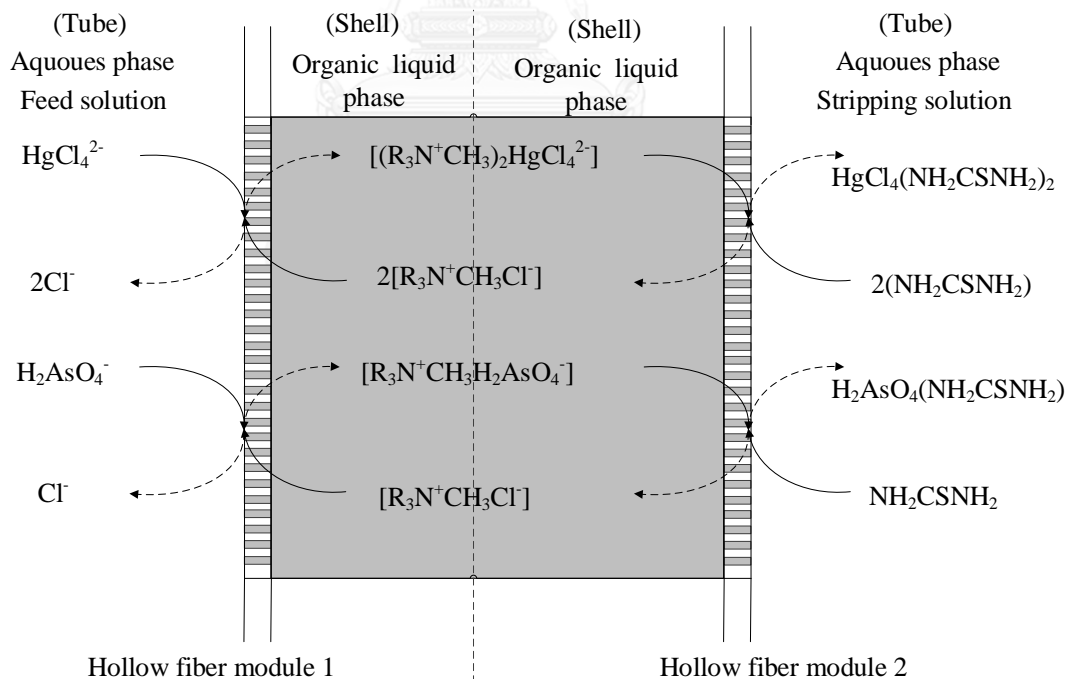
1. การแพร่ของไอออนโลหะไปยังชั้นผิวของวัสดุสารละลายป้อนที่ไม่เคลื่อนที่ (feed-phase stagnant-layer)
2. เกิดปฏิกิริยาการสกัดของไอออนโลหะกับสารสกัดเพื่อฟอร์มตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนและเยื่อแผ่น (feed-membrane interface)
3. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลว
4. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวไปยังชั้นของสารละลายอินทรีย์ที่ไม่เคลื่อนที่ (organic-phase stagnant-layer)

หลังจากเกิดปฏิกิริยาการสกัดในมอดูลที่หนึ่งแล้ว สารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งจะถูกปั๊มไปยังชั้นเปลือกของมอดูลที่สองเพื่อเกิดปฏิกิริยาการนำกลับไอออนโลหะ

ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลผ่านระบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัสในมอดูลที่สอง (เกิดปฏิกิริยาการนำกลับ) [48]

1. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากมอดูลที่หนึ่งผ่านชั้นวิฏภาคของสารละลายอินทรีย์ที่ไม่เคลื่อนที่ (organic-phase stagnant layer)
2. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ (stripping-membrane interface)
3. การเกิดปฏิกิริยานำกลับโดยการแตกตัวของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ (stripping-membrane interface)
4. การแพร่ของไอออนโลหะไปชั้นของวิฏภาคสารละลายนำกลับที่ไม่เคลื่อนที่ (stripping-phase stagnant-layer)

วงจรของกลไกการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และไอออนอาร์เซนิก(V) ด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในระบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัสในรูปที่ 2.3

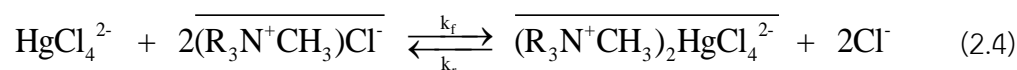


รูปที่ 2.3 กลไกการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V)

## 2.5 ทฤษฎีการคำนวณค่าคงที่การถ่ายเทมวล

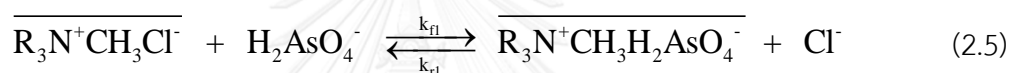
### 2.5.1 สมดุลเคมีของปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับ

ปฏิกิริยาการสกัดเมอร์คิวรี(II) โดยใช้สารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนและของเหลวอินทรีย์ดังแสดงในสมการที่ (2.4)

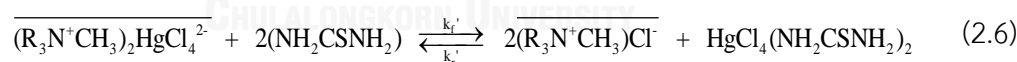


โดยสัญลักษณ์ขีดด้านบน (overbar) แสดงถึงสารที่อยู่ในวัฏภาคของของเหลวอินทรีย์

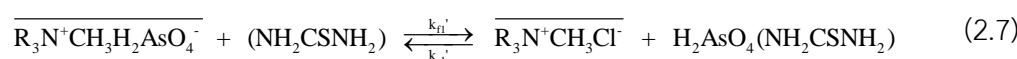
ปฏิกิริยาการสกัดอาร์เซนิก(V) โดยใช้สารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนและของเหลวอินทรีย์ดังแสดงในสมการที่ (2.5)



ปฏิกิริยาการนำกลับเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ (Metal complex species) ทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับคือไทโอยูเรีย ( $\text{NH}_2\text{CSNH}_2$ ) ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวอินทรีย์และสารละลายนำกลับ หลังจากนั้น เมอร์คิวรี(II) จะถูกทำปฏิกิริยาและถ่ายเทไปที่วัฏภาคสารละลายนำกลับ ดังแสดงในสมการที่ (2.6)



ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคของเหลวอินทรีย์และสารละลายนำกลับ สารประกอบเชิงซ้อนของอาร์เซนิก(V) ทำปฏิกิริยากับไทโอยูเรีย และดึงอาร์เซนิก(V) เข้ามาวัฏภาคสารละลายนำกลับ ดังแสดงในสมการ (2.7)



## 2.5.2 การคำนวณร้อยละการสกัด (percentage of extraction, % E) และร้อยละการนำกลับ (percentage of stripping, % S)

$$\% \text{ Hg(II) extraction} = \frac{[\text{Hg}^{2+}]_{f,in} - [\text{Hg}^{2+}]_{f,out}}{[\text{Hg}^{2+}]_{f,in}} \times 100 \quad (2.8)$$

$$\% \text{ Hg(II) stripping} = \frac{[\text{Hg}^{2+}]_{s,out}}{[\text{Hg}^{2+}]_{f,in}} \times 100 \quad (2.9)$$

$$\% \text{ As(V) extraction} = \frac{[\text{As}^{5+}]_{f,in} - [\text{As}^{5+}]_{f,out}}{[\text{As}^{5+}]_{f,in}} \times 100 \quad (2.10)$$

$$\% \text{ As(V) stripping} = \frac{[\text{As}^{5+}]_{s,out}}{[\text{As}^{5+}]_{f,in}} \times 100 \quad (2.11)$$

เมื่อ

$[\text{Hg}^{2+}]_{f,in}$  = ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$[\text{Hg}^{2+}]_{f,out}$  = ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$[\text{Hg}^{2+}]_{s,out}$  = ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$[\text{As}^{5+}]_{f,in}$  = ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$[\text{As}^{5+}]_{f,out}$  = ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$[\text{As}^{5+}]_{s,out}$  = ความเข้มข้นของไอออนสารหนูในสารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

## 2.5.3 การคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัด (extraction equilibrium constant, $K_{ex}$ )

ค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant) คือสภาวะที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงอีกแม้เวลาผ่านไป จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ในสมการที่ (2.4) – (2.5) ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกแสดงในสมการที่ (2.12) – (2.13)

$$K_{ex, \text{Hg(II)}} = \frac{[(\text{R}_3\text{N}^+\text{CH}_3)_2\text{HgCl}_4^{2-}][\text{Cl}^-]^2}{[\text{HgCl}_4^{2-}][(\text{R}_3\text{N}^+\text{CH}_3)\text{Cl}^-]^2} \quad (2.12)$$

$$K_{ex,As(V)} = \frac{[R_3N^+CH_3H_2AsO_4^-][Cl^-]}{[H_2AsO_4^-][R_3N^+CH_3Cl^-]} \quad (2.13)$$

#### 2.5.4 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient)

มอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (hollow fiber contactor module) ประกอบด้วยสองมอดูลเส้นใยกลวง (hollow fiber) โดยในมอดูลที่หนึ่งจะประกอบด้วยสารละลายป้อนที่ถูกปั๊มเข้าไปในชั้นท่อ (tube side) และของเหลวอินทรีย์ถูกปั๊มเข้าไปในชั้นเปลือก (shell side) การไหลของสารละลายป้อนในชั้นท่อของสารละลายป้อนถูกคำนวณโดยใช้สมการไรน์โลดน์นัมเบอร์ (Reynold number) ดังแสดงในสมการที่ (2.14)

$$Re = \frac{4Q_f}{\mu d_i \pi} \quad (2.14)$$

เมื่อ

- $Q_f$  = อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)
- $\mu$  = ความหนืดของสารละลายป้อน (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)
- $d_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

##### 2.5.4.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ ( $k_t$ )

จากการคำนวณค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามสมการที่ (2.14) พบว่าค่า  $Re$  มีค่าเท่ากับ 19.21 ซึ่งค่า  $Re$  มีค่าน้อยกว่า 2400 ดังนั้น การไหลของสารละลายป้อนในชั้นท่อของทั้งสองมอดูลจึงเป็นการไหลแบบลามินา (laminar flow) โดยลักษณะการไหลแบบลามินาร์จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ ( $k_t$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.15) [48]

$$k_t = 1.62 \frac{D}{2r_i} \left( \frac{4r_i^2 u_{tube}}{DL} \right)^{1/3} \quad (2.15)$$

เมื่อ

- $k_t$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายน้ำในชั้นท่อของทั้งสองมอดูล (เมตรต่อวินาที)

$D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคที่เป็นน้ำ (ตารางเมตรต่อวินาที)

$r_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

$U_{\text{tube}}$  = ความเร็วการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับในชั้นท่อของทั้งสองมอดูล (เมตรต่อวินาที)

$L$  = ความยาวของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ ( $k_r$ ) จะประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อของมอดูลที่หนึ่งและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อของมอดูลที่สอง โดยมอดูลที่หนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการสกัดและมอดูลที่สองจะเกิดปฏิกิริยาการนำกลับ ดังนั้นในมอดูลที่หนึ่งจึงเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเมอร์คิวรี(II) ( $k_{\text{Hg},f}$ ) และไอออนอาร์เซนิก(V) ( $k_{\text{As},f}$ ) ในสารละลายป้อน ส่วนมอดูลที่สองจึงเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเมอร์คิวรี(II) ( $k_{\text{Hg},s}$ ) และไอออนอาร์เซนิก(V) ( $k_{\text{As},s}$ ) ในสารละลายป้อน

#### 2.5.4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น ( $k_m$ )

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.16). [59]

$$k_m = \frac{\varepsilon D_m}{\tau r_i \ln(r_o / r_i)} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$k_m$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกภายในเยื่อแผ่น (เมตรต่อวินาที)

$D_m$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ (organic liquid phase) (ตารางเมตรต่อวินาที)

$r_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

$r_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

$\varepsilon$  = ปริมาณรพูนในมอดูลเส้นใยกลวง (%)

$\tau$  = ค่าความคดเคี้ยวของมอดูลเส้นใยกลวง

### 2.5.4.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก ( $k_o$ )

ในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งและสองจะประกอบด้วยสารละลายอินทรีย์ที่ไหลวนอยู่ การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก ( $k_o$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.17). [48]

$$k_o = \frac{0.245D}{4r_H} \left( \frac{4r_H u_{shell}}{\nu} \right)^{2/3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \quad (2.17)$$

เมื่อ

- $K_o$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกภายในสารละลายอินทรีย์ในชั้นเปลือกของทั้งสองมอดูล (เมตรต่อวินาที)
- $D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคที่เป็นน้ำ (ตารางเมตรต่อวินาที)
- $U_{shell}$  = ความเร็วการไหลของสารละลายอินทรีย์ในชั้นเปลือกของทั้งสองมอดูล (เมตรต่อวินาที)
- $\nu$  = ความหนืดไคเนมาติก (kinematic viscosity) (ตารางเมตรต่อวินาที)
- $r_H$  = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic radius) ของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

โดยการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางแบบไฮดรอลิก (hydraulic diameter) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.18) [60]

$$d_h = \frac{d_a^2 - d_i^2 - nd_o^2}{nd_o} \quad (2.18)$$

เมื่อ

- $D_a$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชั้นท่อ (เมตร)
- $D_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)
- $D_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)
- $N$  = จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล



### 2.5.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient)

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่จะใช้สมการการคำนวณของ Wilke-Chang แสดงดังสมการที่ (2.19) - (2.21) [61]

$$D^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta V_A^{0.6}} \quad (2.19)$$

โดยสมการที่ (2.19) จะแบ่งออกเป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคสารละลายที่เป็นน้ำ (aqueous solution) และสัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์หรือเยื่อแผ่นเหลว

1. สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อน

$$D_{aq}^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta V_A^{0.6}} \quad (2.20)$$

2. สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์

$$D_m^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta V_A^{0.6}} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$D_{aq}^*$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคสารละลายป้อน (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

$D_m^*$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

$M$  = น้ำหนักโมเลกุลของตัวทำละลาย (กรัมต่อโมล)

$\eta$  = ความหนืดของตัวทำละลาย (เซนติพ้อย, cP)

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (เคลวิน)

$V_A$  = ปริมาตรเชิงโมลาร์ของตัวถูกละลาย (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)

### 2.5.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (overall mass transfer coefficient)

ความต้านทานการถ่ายเทมวล (overall mass transfer resistance) เป็นส่วนผกผันกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) โดยการคำนวณความต้านทานการถ่ายเทมวลรวมในมอดูลที่หนึ่ง (มอดูลการสกัด) และมอดูลที่สอง (มอดูลการนำกลับ) ของไอออนเมอร์คิวรี(II) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.22) – (2.23) [48]

$$\frac{1}{K_E} = \frac{1}{k_{Hg,f}} + \frac{[Cl^-]_f}{k_f [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{oi}} + \frac{[Cl^-]_f^2}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^2-,m} K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} + \frac{[Cl^-]_f^2}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^2-,o} K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{K_S} = \frac{1}{k_{Hg,s}} + \frac{1}{k_f [NH_2CSNH_2]_s} + \frac{1}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^2-,m}} + \frac{K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{si}^2}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^2-,o} [NH_2CSNH_2]_s^2} \quad (2.23)$$

การคำนวณความต้านทานการถ่ายเทมวลรวมในมอดูลที่หนึ่ง (มอดูลการสกัด) และมอดูลที่สอง (มอดูลการนำกลับ) ของไอออนสารหนูสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.24) – (2.25) [48]

$$\frac{1}{K_E} = \frac{1}{k_{As,f}} + \frac{[Cl^-]_f}{k_{f1} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{oi}} + \frac{[Cl^-]_f}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-,m} K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} + \frac{[Cl^-]_f}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-,o} K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} \quad (2.24)$$

$$\frac{1}{K_S} = \frac{1}{k_{As,s}} + \frac{1}{k_{f1} [NH_2CSNH_2]_s} + \frac{1}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-,m}} + \frac{K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{si}^2}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-,o} [NH_2CSNH_2]_s^2} \quad (2.25)$$

โดยค่า  $K_E$  และ  $K_S$  คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของมอดูลที่หนึ่ง (มอดูลสำหรับปฏิกิริยาการสกัด) และมอดูลที่สอง (มอดูลสำหรับปฏิกิริยาการนำกลับ) ตามลำดับ ความต้านทานการถ่ายเทมวลในเทอมทางด้านขวาของสมการที่ (2.21) – (2.25) ประกอบด้วยสี่เทอมของความต้านทานการถ่ายเทมวลคือ ความต้านทานจากการแพร่ของชั้นน้ำ (aqueous layer diffusion), ความต้านทานจากปฏิกิริยาเคมี (chemical reaction), ความต้านทานจากเยื่อแผ่น (membrane) และความต้านทานจากสารละลายอินทรีย์ในชั้นเปลือก (organic layer in shell side) ตามลำดับ ค่า  $K_{ex}$  คือค่าคงที่

สมดุลของการเกิดปฏิกิริยาการสกัด  $k_f$  และ  $k_{f1}$  คือค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V)

### 2.5.7 พลักซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

การสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกโดยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส พลักซ์ที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ผ่านชั้นเยื่อแผ่นเหลวนั้นขึ้นขึ้นกับการเกิดปฏิกิริยา (reaction flux) หรือขึ้นกับการถ่ายเทมวล (diffusion flux) สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. การคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy:  $E_a$ ) โดยเมื่อคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นแล้วได้ค่ามากกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล การถ่ายเทมวลของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) จะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยามากกว่าการแพร่ ถ้าพลังงานกระตุ้นน้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลแสดงถึงการถ่ายเทมวลขึ้นอยู่กับการแพร่เพียงอย่างเดียว โดยไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาเลย

2. การคำนวณค่า  $\alpha$  โดยค่า  $\alpha$  คือพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแพร่ของสาร ซึ่งคำนวณได้โดยตรงจากสมการที่ (2.26) [61]

$$\alpha = \frac{1/\varepsilon k}{h_m/D_m} \quad (2.26)$$

เมื่อ

- $\varepsilon$  = ความเป็นรูพรุนของเส้นใยกลวง
- $k$  = อัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate of reaction)
- $h_m$  = ความหนาของชั้นฟิล์มหรือเส้นใยกลวง
- $D_m$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

โดยค่าพารามิเตอร์ ( $\alpha$ ) ที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์หมายถึงการสกัดและการถ่ายเทมวลของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ถูกกำหนดโดยพลักซ์ของการแพร่ (diffusion flux) เพียงชนิดเดียว

### บทที่ 3

#### สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) จากน้ำปนเปื้อนของหลุมขุดเจาะน้ำมัน (Produced water) โดยใช้มอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้เป็นสารที่มีความบริสุทธิ์ระดับห้องแล็บการทดลอง (Analytical grade) ซึ่งแบ่งออกเป็นสารละลายป้อน สารสกัด สารละลายนำกลับ สารละลายอินทรีย์ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชนิดและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

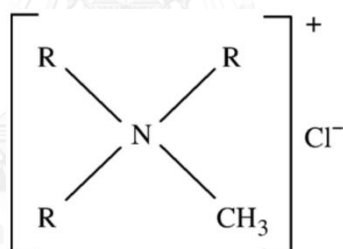
| ชนิด           | ชื่อ                 | สูตรโมเลกุล  | แหล่งที่มา                 |
|----------------|----------------------|--|----------------------------|
| สารละลายป้อน   | Mercury(II) chloride | HgCl <sub>2</sub>  | Merck Co Ltd               |
|                | Asenic trioxide      | As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                     | Univar Co Ltd              |
|                | Produced water       | -  | Salamander Energy Co. Ltd. |
| สารสกัด        | Aliquat 336          | (NR <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> ) <sup>+</sup> Cl <sup>-</sup>    | Cognis Co Ltd              |
| ตัวทำละลาย     | Kerosene             | C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> to C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> | Qrec chemical co Ltd       |
|                | Cyclohexane          | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>                                     | Qrec chemical co Ltd       |
|                | 1,2-dichloroethane   | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>                      | Qrec chemical co Ltd       |
|                | 1-octanol            | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O                                   | Qrec chemical co Ltd       |
| สารละลายนำกลับ | Thiourea             | NH <sub>2</sub> CSNH <sub>2</sub>                                  | Qrec chemical co Ltd       |
|                | Sodium hydroxide     | NaOH   | Qrec chemical co Ltd       |
|                | Sodium thiosulfate   | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | Qrec chemical co Ltd       |
|                | Nitric acid          | HNO <sub>3</sub>   | Qrec chemical co Ltd       |
|                | Deionized water      | H <sub>2</sub> O   |                            |
| กรดปรับค่า pH  | Hydrochloric acid    | HCl  | Qrec chemical co Ltd       |
| สารวิเคราะห์   | Sodium hydroxide     | NaOH   | Qrec chemical co Ltd       |
| ตัวอย่าง       | Sodium borohydride   | NaBH <sub>4</sub>  | Qrec chemical co Ltd       |

องค์ประกอบของน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะน้ำมันประกอบด้วยธาตุโลหะหนัก เกลืออินทรีย์และเกลืออนินทรีย์ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะ

| สารประกอบ              | ความเข้มข้น (ส่วนในล้านส่วน) |
|------------------------|------------------------------|
| เมอร์คิวรี Hg(II)      | 1.1                          |
| อาร์เซนิก As(V)        | 0.9                          |
| เกลือโซเดียม Na(I)     | 1020.0                       |
| เหล็ก Fe(III)          | 0.8                          |
| เกลือแมกนีเซียม Mg(II) | 2.4                          |
| เกลือแคลเซียม Ca(II)   | 11.6                         |

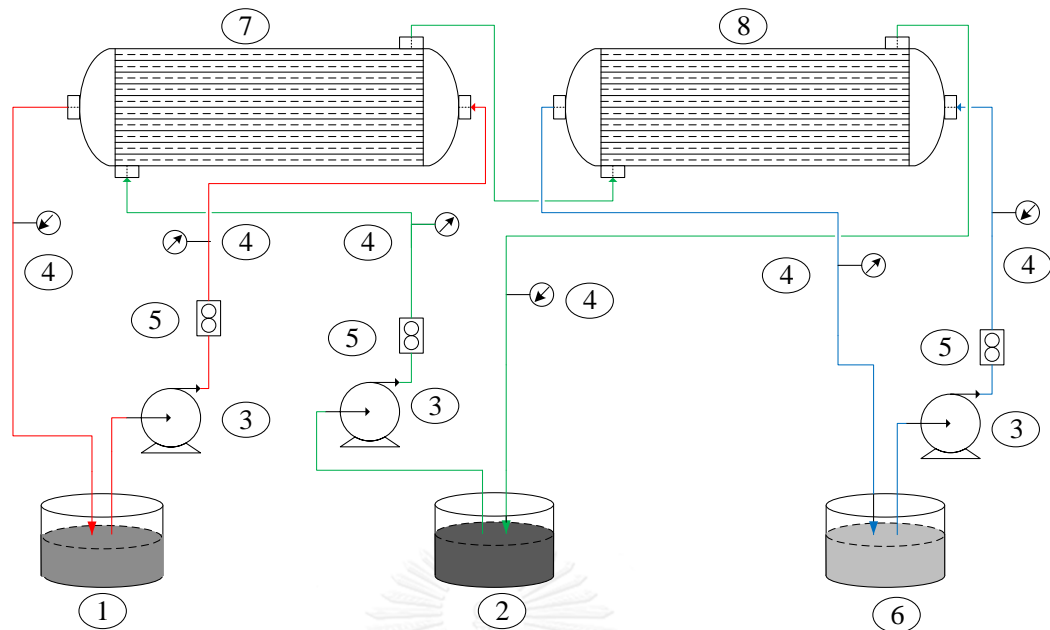
สารสกัดที่ใช้เป็นสารสกัดชนิดเบสคืออะลิควอตซ์สามสามหก (Aliquat336) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างของสารเคมีแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของสารสกัด

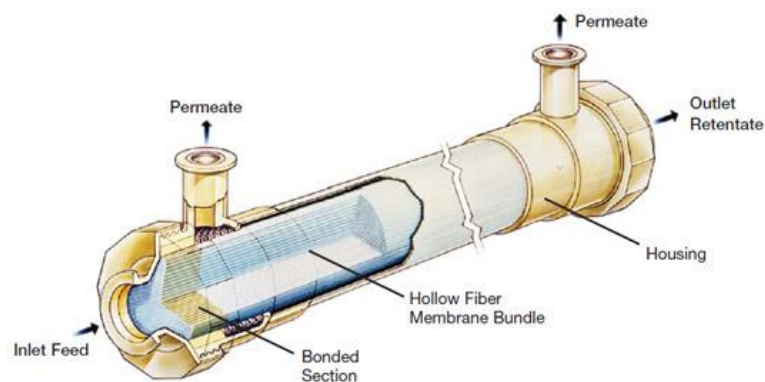
### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดทดลอง Liqui-Cel<sup>®</sup> ระบบการสกัดด้วยของเหลว (Liquid-Liquid Extraction:LLE) รุ่น Cat #5 PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ประกอบด้วยมอดูลของเส้นใยกลวง เกียร์ปัม มาตรวัดอัตราการไหล และมาตรวัดความดันเกจ อุปกรณ์การทดลองมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ Liqui-Cel<sup>®</sup> Laboratory ของมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส (hollow fiber contactor) 1) ถังสารละลายป้อน 2) ถังสารละลายนำกลับ 3) เกียร์ปั๊ม 4) เครื่องวัดความดันเกจขาเข้าและขาออก 5) เครื่องวัดอัตราการไหล 6) ถังตัวทำละลายอินทรีย์ 7) มอดูลเส้นใยกลวงที่หนึ่ง 8) มอดูลเส้นใยกลวงที่สอง

2. มอดูลเส้นใยกลวงของ Celgard<sup>®</sup> X-30 240 ซึ่งมีรูพรุนของพอลิโพรพิลีนขนาดเล็กหลายเส้นในมอดูลเส้นใยกลวงดังแสดงในรูปที่ 3.3 คุณสมบัติของเส้นใยกลวงแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.3 มอดูลเส้นใยกลวง Celgard<sup>®</sup> X-30 240 microporous polypropylene hollow fiber

ตารางที่ 3.3 ลักษณะเฉพาะของมอดูลเส้นใยกลางที่ใช้ในการทดลอง

| ลักษณะ   | คุณลักษณะ                        |
|--|----------------------------------|
| วัสดุเส้นใยกลาง                                    | พอลิโพรพิลีน (polypropylene)     |
| เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง ( $d_i$ )      | 240 ไมโครเมตร                    |
| เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลาง ( $d_o$ )     | 300 ไมโครเมตร                    |
| เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชั้นท่อทั้งหมด ( $d_a$ ) | 2.2 เซนติเมตร                    |
| เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นเปลือกของมอดูล ( $d_s$ )   | 6.30 เซนติเมตร                   |
| ขนาดความยาวที่มีประสิทธิภาพของเส้นใยกลาง (L)       | 15 เซนติเมตร                     |
| จำนวนเส้นใยกลาง (n)                                | 30,000 เส้น                      |
| ขนาดรูพรุนเฉลี่ย                                   | 25 %                             |
| ความพรุนของเส้นใยกลาง (E)                          | 0.03 ไมโครเมตร                   |
| พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ (A)                     | $1.4 \times 10^4$ ตารางเซนติเมตร |
| พื้นที่ต่อหน่วยปริมาตร                             | $29.3 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$  |
| เส้นผ่านศูนย์กลางของชุดเส้นใยกลาง                  | 6.3 เซนติเมตร                    |
| ความยาวของชุดเส้นใยกลาง                            | 20.3 เซนติเมตร                   |
| พื้นที่ผิวที่สัมผัส                                | 25 %                             |
| ปัจจัยความคดเคี้ยว                                 | 2.6                              |
| อุณหภูมิที่ใช้ในการปฏิบัติการ                      | 0 - 60 องศาเซลเซียส              |

3. วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) รุ่น JY 2000-2 จาก Horiba scientific ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งเป็นเครื่องที่มีประสิทธิภาพสูงและวิเคราะห์ความละเอียดได้ต่ำที่สุดคือ 0.6 ส่วนในพันล้านส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทและสารหนู (ICP-OES)

### 3.3 วิธีการทดลอง

ศึกษาหาเวลาที่สามารถสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ที่ดีที่สุด โดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (liquid liquid extraction)

#### 3.3.1 ศึกษาผลของเวลาด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์ปริมาตร 30 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายโครซีนความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
2. เตรียมสารละลายป้อนคือน้ำปนเปื้อนจากหลุมชุดเจาะโดยต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองว้อทแมน (what man) เบอร์ 100 เพื่อกำจัดฝุ่นและตะกอนที่ตกค้างออกก่อน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในสารละลายป้อนความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 30 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับ คือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 M ปริมาตร 30 มิลลิลิตร
4. เติสารละลายป้อนและสารละลายอินทรีย์รวมกันในขวดรูปชมพู่ (volumetric flask) นำไปปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเทของเหลวผสมให้แยกชั้นในกรวยแยก (separation funnel) รอจนกระทั่งของเหลวผสมแยกชั้น จึงไขชั้นน้ำที่อยู่ด้านล่างออกเพื่อไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทและสารหนูที่เหลืออยู่ในสารละลายป้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์ ICP-OES ส่วนชั้นของน้ำมันหรือสารอินทรีย์ (organic liquid) ปริมาตร 30 มิลลิลิตรจะนำไปทำปฏิกิริยาต่อกับสารละลายนำกลับโดยผสมกับสารละลายนำกลับ จากนั้นนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาทีและ



เทลงในกรวยแยก รวบรวมกระทั่งของเหลวทั้งสองแยกชั้น ไขชั้นน้ำออกมาเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทและสารหนูในสารละลายนำกลับ

5. ทำซ้ำข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนเวลาในการปั่นกวนเป็น 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105, 115 นาทีตามลำดับ เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม

ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีการมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส

### 3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายเคโรซีนความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

2. เตรียมสารละลายป้อนคือน้ำป้อนจากหลุมชุดเจาะโดยต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองวอทแมน (what man) เบอร์ 100 เพื่อกำจัดฝุ่นและตะกอนที่ตกค้างออกก่อน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในสารละลายป้อนความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1 ลิตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับ คือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 M ปริมาตร 1 ลิตร

4. ป้อนสารละลายป้อนในชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลางที่หนึ่งและป้อนสารละลายนำกลับที่ชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลางที่สองในทิศทางเดียวกัน จากนั้นป้อนสารละลายอินทรีย์ให้ไหลในทิศทางสวนทางกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งและไหลวนต่อเนื่องไปยังมอดูลที่สอง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน นำกลับ และอินทรีย์เท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงในรูป 3.2

5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 105 นาทีไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู ด้วยเครื่อง ICP-OES

6. ทำซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเป็น 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 และ 0.06 โมลาร์ ตามลำดับ เพื่อหาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนที่เหมาะสม

### 3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายเคโรซีนความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

2. เตรียมสารละลายป้อนคือน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะโดยต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองวอทแมน (what man) เบอร์ 100 เพื่อกำจัดฝุ่นและตะกอนที่ตกค้างออกก่อน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในสารละลายป้อนความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1 ลิตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับ คือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 M ปริมาตร 1 ลิตร

4. ป้อนสารละลายป้อนในชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลวงที่หนึ่งและป้อนสารละลายนำกลับที่ชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลวงที่สองในทิศทางเดียวกัน จากนั้นป้อนสารละลายอินทรีย์ให้ไหลในทิศทางสวนทางกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งและไหลวนต่อเนื่องไปยังมอดูลที่สอง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน นำกลับ และอินทรีย์เท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 105 นาที ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู ด้วยเครื่อง ICP-OES

6. ทำซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในเคโรซีนเป็น 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ เพื่อหาความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สามสามหกที่เหมาะสม

### 3.3.4 ศึกษาผลของชนิดของสารละลายนำกลับ

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายเคโรซีนความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

2. เตรียมสารละลายป้อนคือน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะโดยต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองวอทแมน (what man) เบอร์ 100 เพื่อกำจัดฝุ่นและตะกอนที่ตกค้างออกก่อน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในสารละลายป้อนความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1 ลิตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับ คือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 M ปริมาตร 1 ลิตร

4. ป้อนสารละลายป้อนในชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลางที่หนึ่งและป้อนสารละลายนำกลับที่ชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลางที่สองในทิศทางเดียวกัน จากนั้นป้อนสารละลายอินทรีย์ให้ไหลในทิศทางสวนทางกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งและไหลวนต่อเนื่องไปยังมอดูลที่สอง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน นำกลับ และอินทรีย์เท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 105 นาที ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู ด้วยเครื่อง ICP-OES

6. ทำซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนชนิดของสารละลายนำกลับเป็นสารละลายชนิดเบสคือ โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ สารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ และน้ำที่ปราศจากไอออน (deionized water) ตามลำดับ เพื่อหาชนิดของสารละลายนำกลับที่เหมาะสม

### 3.3.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายเคโรซีนความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

2. เตรียมสารละลายป้อนคือน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองวุ้นแมน (what man) เบอร์ 100 เพื่อกำจัดฝุ่นและตะกอนที่ตกค้างออกก่อน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในสารละลายป้อนความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1 ลิตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับ คือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 M ปริมาตร 1 ลิตร

4. ป้อนสารละลายป้อนในชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลางที่หนึ่งและป้อนสารละลายนำกลับที่ชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลางที่สองในทิศทางเดียวกัน จากนั้นป้อนสารละลายอินทรีย์ให้ไหลในทิศทางสวนทางกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งและไหลวนต่อเนื่องไปยังมอดูลที่สอง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน นำกลับ และอินทรีย์เท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงในรูป 3.2

5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 105 นาที ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู ด้วยเครื่อง ICP-OES

6. ทำซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเป็น 0.03, 0.05, 0.07, 0.09, 0.11 และ 0.13 โมลาร์ เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสม

### 3.3.6 ศึกษาผลของตัวทำละลาย

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายเคโรซีนความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
2. เตรียมสารละลายป้อนคือน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะโดยต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองวุ้นแมน (what man) เบอร์ 100 เพื่อกำจัดฝุ่นและตะกอนที่ตกค้างออกก่อน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในสารละลายป้อนความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1 ลิตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับ คือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.07 โมลาร์ ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 M ปริมาตร 1 ลิตร
4. ป้อนสารละลายป้อนในชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลวงที่หนึ่งและป้อนสารละลายนำกลับที่ชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลวงที่สองในทิศทางเดียวกัน จากนั้นป้อนสารละลายอินทรีย์ให้ไหลในทิศทางสวนทางกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งและไหลวนต่อเนื่องไปยังมอดูลที่สอง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน นำกลับ และอินทรีย์เท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 105 นาที ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู ด้วยเครื่อง ICP-OES
6. ทำซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายเป็นไซโคลเฮกเซน (cyclohexane), ไดคลอโรอีเทน (1,2-dichloroethane) และออกทานอล (1-octanol) เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสม

### 3.3.7 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายเคโรซีนความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
2. เตรียมสารละลายป้อนคือน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะโดยต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองวุ้นแมน (what man) เบอร์ 100 เพื่อกำจัดฝุ่นและตะกอนที่ตกค้างออกก่อน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในสารละลายป้อนความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1 ลิตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับ คือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.07 โมลาร์ ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 M ปริมาตร 1 ลิตร

4. ป้อนสารละลายป้อนในชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลวงที่หนึ่งและป้อนสารละลายนำกลับที่ชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลวงที่สองในทิศทางเดียวกัน จากนั้นป้อนสารละลายอินทรีย์ให้ไหลในทิศทางสวนทางกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งและไหลวนต่อเนื่องไปยังมอดูลที่สอง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน นำกลับ และอินทรีย์เท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 105 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู ด้วยเครื่อง ICP-OES

6. ทำซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็น 75, 150, 200, 250, 300, 350 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่เหมาะสมที่เหมาะสม

### 3.3.8 ศึกษาผลประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

#### 3.3.8.1 การสกัดและนำกลับด้วยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายเคโรซีนความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

2. เตรียมสารละลายป้อนคือน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะโดยต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรอง what man เบอร์ 100 เพื่อกำจัดฝุ่นและตะกอนที่ตกค้างออกก่อน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในสารละลายป้อนความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1 ลิตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับ คือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.07 โมลาร์ ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 M ปริมาตร 1 ลิตร

4. ป้อนสารละลายป้อนในชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลวงที่หนึ่งและป้อนสารละลายนำกลับที่ชั้นท่อของมอดูลเส้นใยกลวงที่สองในทิศทางเดียวกัน จากนั้นป้อนสารละลายอินทรีย์ให้ไหลในทิศทางสวนทางกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งและไหลวนต่อเนื่องไปยังมอดูลที่สอง อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน นำกลับ และอินทรีย์เท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 105 นาที (1.45 ชั่วโมง) เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู ด้วยเครื่อง ICP-OES

6. ทำซ้ำข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนเก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60 ชั่วโมง

### 3.3.8.2 การสกัดและนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1. เตรียมสารละลายอินทรีย์ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยละลายสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายเคโรซีนความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
2. เตรียมสารละลายป้อนคือน้ำป้อนเป็นอนจากหลุมชุดเจาะโดยต้องผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองว้อทแมน (what man) เบอร์ 100 เพื่อกำจัดฝุ่นและตะกอนที่ตกค้างออกก่อน จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกลงในสารละลายป้อนความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ โดยเตรียมสารละลายป้อนปริมาตร 1 ลิตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับคือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.07 โมลาร์ ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 M ปริมาตร 1 ลิตร
4. ป้อนสารละลายอินทรีย์เข้าไปในชั้นท่อและชั้นเปลือกของมอดูลเส้นใยกลวงเป็นระยะเวลา 40 นาทีเพื่อให้สารละลายอินทรีย์แพร่เข้าไปอยู่รูพรุน จากนั้นจึงป้อนสารละลายป้อนปริมาตร 1 ลิตรเข้าไปในชั้นท่อและป้อนสารละลายนำกลับปริมาตร 1 ลิตรเข้าไปในชั้นเปลือก โดยสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลในทิศทางที่สวนทางกัน
5. เก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกที่เวลา 105 นาที (1.45 ชั่วโมง) เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนปรอทและสารหนู ด้วยเครื่อง ICP-OES
6. เปรียบเทียบผลการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) กับระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

## บทที่ 4

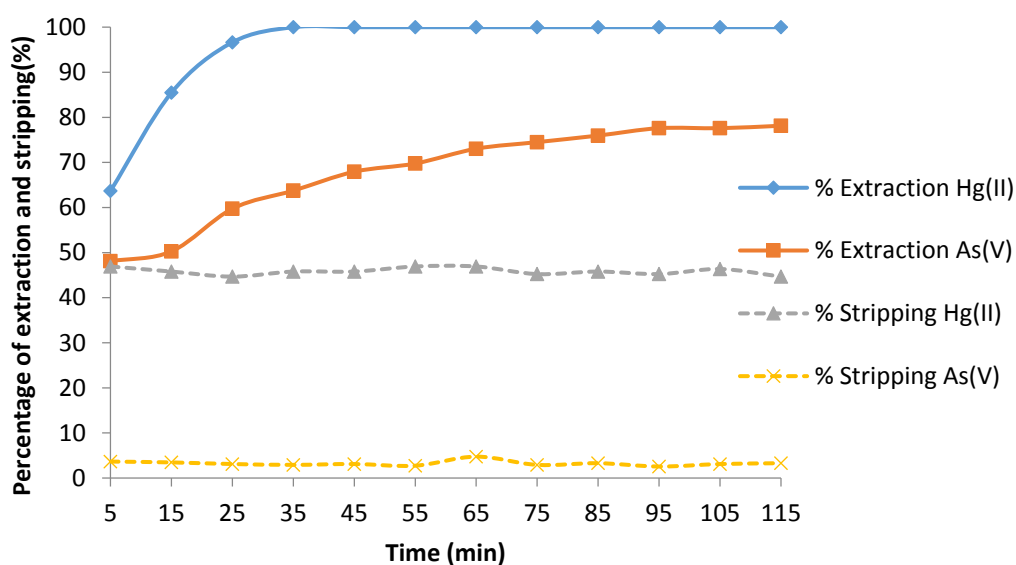
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส สารสกัดที่ใช้เป็นสารสกัดชนิดเบสคืออะลิควอตซ์สามสามหก (Aliquat336) ซึ่งเป็นเกลือควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium salts) ประกอบด้วยหมู่อัลคิล (alkyl) สีแชนเกาะกับ ไนโตรเจนอะตอม สารละลายป้อนที่ใช้เป็นน้ำปนเปื้อนจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมและคอนเดนเสท (natural gas condensate) องค์ประกอบของน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะ (produced water) แสดงในตารางที่ 3.2 สารละลายนำกลับที่เลือกใช้แบ่งเป็นสามกลุ่มคือชนิดกรดได้แก่ กรดไนตริก ชนิดกลางคือน้ำที่มีการดึงเอาไอออนออก (Deionization water) และชนิดเบสซึ่งประกอบด้วย ไทโอ ยูเรีย, โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไทโอซัลเฟต การทดลองเริ่มต้นโดยเตรียมสารละลายป้อน ปริมาตร 1 ลิตรและสารละลายนำกลับปริมาตร 1 ลิตร โดยสารละลายนำกลับในตอนแรกเริ่มจากไทโอ ยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์ จากนั้นเตรียมสารละลาย อินทรีย์โดยนำสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกมาละลายในตัวทำละลายเคโรซีนปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยเริ่มจากความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เมื่อเตรียมสารละลายทั้งสามครบ หมดแล้วจึงเริ่มทำการทดลอง มอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสนี้จะประกอบด้วยมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่ พยุงด้วยเส้นใยกลวงต่อกันสองมอดูล จะมีการเชื่อมกันของชั้นเปลือกของทั้งสองมอดูล ชั้นตอนแรก ป้อนสารละลายอินทรีย์ ป้อนเข้าไปในชั้นเปลือกของมอดูลตัวที่หนึ่งและต่อเนื่องไปยังชั้นเปลือกของ มอดูลที่สองและไหลวนกลับลงไปจนถึงสารละลายอินทรีย์ ชั้นตอนที่สองคือป้อนสารละลายป้อนเข้า ไปในชั้นท่อของมอดูลตัวที่หนึ่ง ชั้นตอนที่สามป้อนสารละลายนำกลับเข้าไปในชั้นท่อ (tube side) ของ มอดูลตัวที่สองโดยไหลในทิศทางเดียวกันกับสารละลายป้อน เก็บตัวอย่างความเข้มข้นที่สายละลาย ป้อนและนำกลับขาออกเพื่อไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ใน องค์ประกอบของน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติ จะประกอบด้วยสาร ทั้งหมดหกตัวด้วยกัน ส่วนประกอบที่เป็นเกลือเช่นโซเดียม (Na(I)) ซึ่งเป็นสารประกอบเกลือแกง สาร รอนินทรีย์ (Mg(II) และ Ca(II)) เป็นสารโลหะอัลคาไลน์เอริช ส่วนโลหะเหล็ก (Fe) สามารถฟอร์มตัวใน รูปของประจุได้สองชนิดคือ เฟอร์รัส (Fe(II)) และ เฟอร์ริก (Fe(III)) ซึ่งเป็นโลหะที่มีประจุบวก เกลือและ โลหะในรูปของประจุบวกไม่สามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหก ซึ่งเป็นสารสกัด ชนิดเบสและประกอบด้วยประจุบวก (cation) ขนาดใหญ่ในโครงสร้าง จึงไม่สามารถที่จะทำปฏิกิริยา การสกัดได้ ส่วนโลหะหนักทั้งสองชนิดคือเมอร์คิวรีและอาร์เซนิกจะฟอร์มตัวในรูปของประจุลบ (anion) คือเมอร์คิวรีคลอไรด์ ( $HgCl_4^{2-}$ ) และอาร์เซไนต์ ( $H_2AsO_4^-$ ) จึงสามารถทำปฏิกิริยาการสกัด

และการนำกลับกลับสารสกัดได้ การวิเคราะห์ความเข้มข้นจะใช้เครื่อง ICP-OES ยี่ห้อ JY-2000 ซึ่งมีความละเอียดในการวัดความเข้มข้นได้ต่ำสุดที่ 0.6 ส่วนในพันล้านส่วน

#### 4.1 ผลของเวลาดำเนินการ

ในการทดลองนี้ได้ทดลองหาเวลาที่เหมาะสมที่สุดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหก จากผลการทดลองพบว่าการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) ใช้เวลาเพียง 35 นาทีก็สามารถสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) ได้สูงที่สุดและผลการสกัดคงที่เมื่อเวลามากกว่า 35 นาที ส่วนไอออนอาร์เซนิก(V) การสกัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนถึงเวลา 105 นาที การสกัดจึงเริ่มคงที่ ส่วนการนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก ตามเวลา ดังนั้นการทดลองต่อไปเราจึงใช้เวลาในเก็บตัวอย่างของสารละลายป้อนและนำกลับขาออกที่เวลา 105 นาที เพื่อให้เกิดการสกัดและนำกลับสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.1

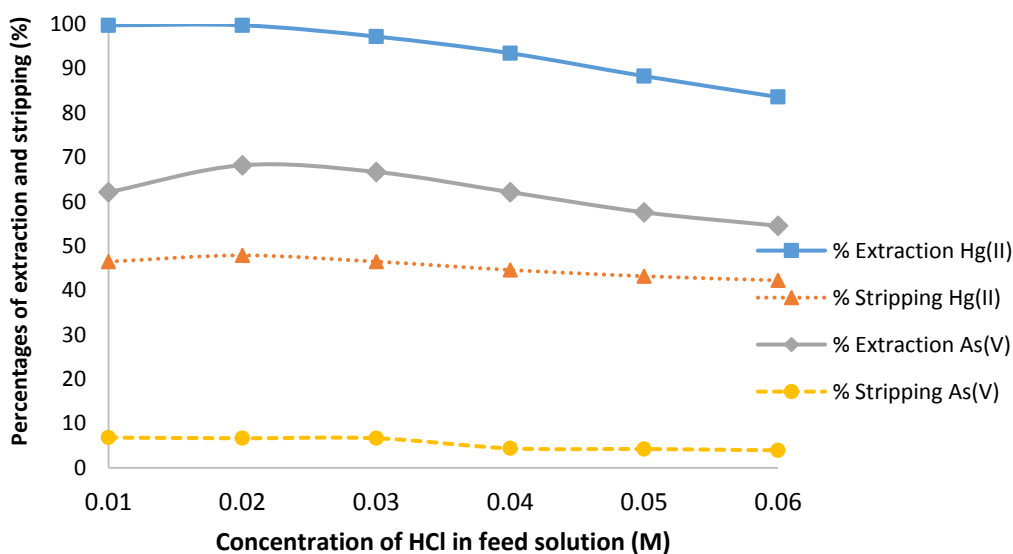


**รูปที่ 4.1** ผลของเวลาต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับคือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์



#### 4.2 ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน

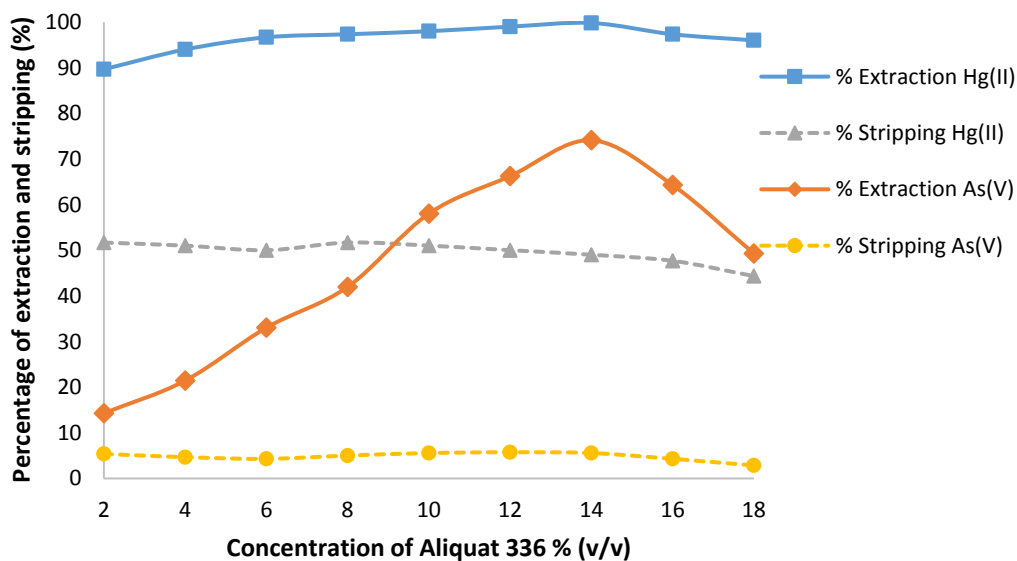
จากรูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเปลี่ยนแปลงจาก 0.01 ถึง 0.06 โมลาร์ ผลการทดลองแสดงถึงการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) ลดลงเรื่อยๆ เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.02 โมลาร์ เนื่องจากไอออนเมอร์คิวรี(II) จะเกิดการฟอร์มตัวในรูปของ  $HgCl_3^-$  และ  $HgCl_4^{2-}$  ในสารละลายป้อนมากยิ่งขึ้น ส่วนการสกัดไอออนอาร์เซนิกจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มจาก 0.01 - 0.02 โมลาร์ เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 0.02 โมลาร์จะทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดลดลง เนื่องจากอะลิควอตซ์เป็นสารสกัดชนิดเบส จึงสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนประจุลบ (anion) ได้ดีในช่วงที่เป็นสภาวะเบสหรือสภาวะที่เป็นกรดอ่อน [35] นอกจากนี้แล้วการเติมกรดที่มากเกินไป ความเป็นกรดจะทำลายเส้นใยกลวงให้เกิดความเสียหายได้ จึงแนะนำให้ใช้กรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์ไว้ใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.2 ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามทกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับคือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์)

### 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด

ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีนความเข้มข้นระหว่าง 2 ถึง 18 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกสามารถสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) ในตัวทำละลายเคโรซีนได้ดีในทุกช่วงความเข้มข้น และสกัดได้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงจุดที่ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งสามารถสกัดได้ 99.8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการสกัดของอาร์เซนิก(V) ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของเลอชาเตอริเย (Le chaterier's) คือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะทำให้ปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ดำเนินไปทางขวาดังสมการที่ (2.4) – (2.5) เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate of reaction) ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสกัดได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีนมากกว่า 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะทำให้การสกัดไอออนอาร์เซนิก(V) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอธิบายโดยทฤษฎีของ wilke change แสดงในสมการที่ (2.21) ประสิทธิภาพของการกำจัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ลดลงเนื่องจากการเกิดการเพิ่มขึ้นของความหนืดของสารละลายอินทรีย์ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้การการถ่ายเท (transport) ที่ลดลง [62] ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกมากกว่า 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ลดลง

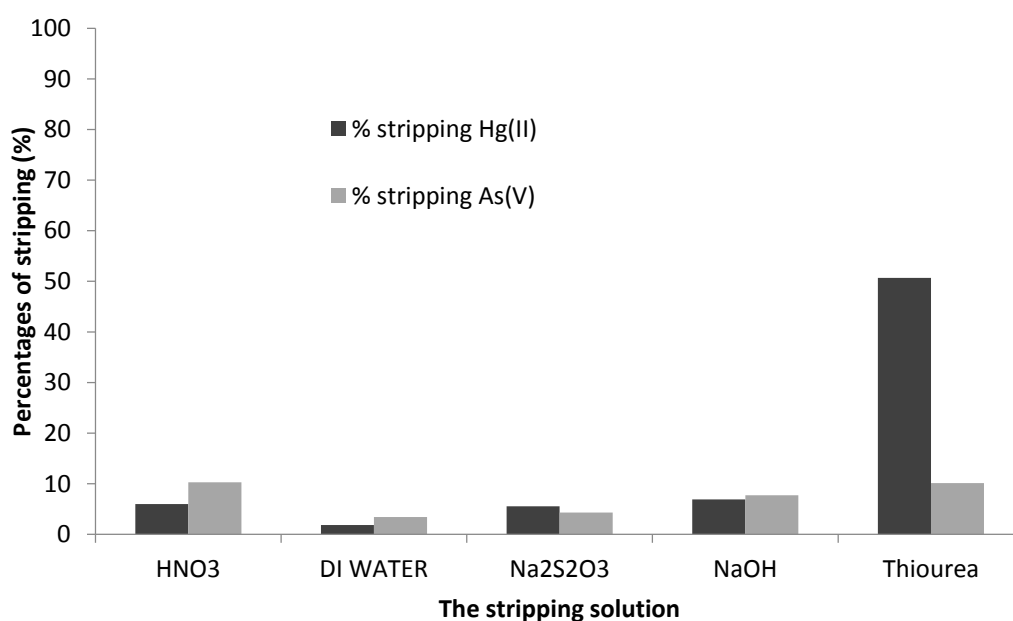


รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีนต่อสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์และสารละลายนำกลับคือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์)

#### 4.4 ผลของชนิดของสารละลายนำกลับ

สารละลายนำกลับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสารละลายสามกลุ่มคือสารละลายที่เป็นเบสเป็นกลาง และเป็นกรด สารละลายที่เป็นเบสได้แก่ไทโอยูเรีย (thiourea), โซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากันคือ 0.01 โมลาร์ สารละลายนำกลับที่เป็นกลางคือน้ำที่มีการดึงไอออนออก (Deionized water) และสารละลายกรดไนตริก (Nitric acid) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ผลการนำกลับของเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก (V) แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าสารละลายไทโอยูเรียเป็นสารสกัดที่เหมาะสมที่สุดในการนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) เนื่องจากโครงสร้างของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกเป็นเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium salt) โดยมีสูตรโครงสร้างแสดงในรูปที่ 3.1 โครงสร้างของสารสกัดนี้ประกอบด้วยหมู่แอลคิล (alkyl) ทั้งหมดสี่แขนที่ต่อกับไนโตรเจนอะตอมซึ่งหมู่แอลคิลจะดึงประจุออกจากไนโตรเจนส่งผลให้อะตอมไนโตรเจนเป็นประจุบวกที่แข็งแรง เมื่อสารสกัดทำปฏิกิริยากับเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) จะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ (metal complex species) ที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง จึงยากที่จะนำกลับโลหะได้ง่าย สารละลายนำกลับที่ใช้จะต้องมีแรงกระทำ (interaction) กับสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะมากพอที่จะนำกลับไอออนโลหะได้และปล่อยสารสกัดกลับเข้าไปในชั้นของสารละลายอินทรีย์ จากผลการทดลองน้ำที่มีการดึง

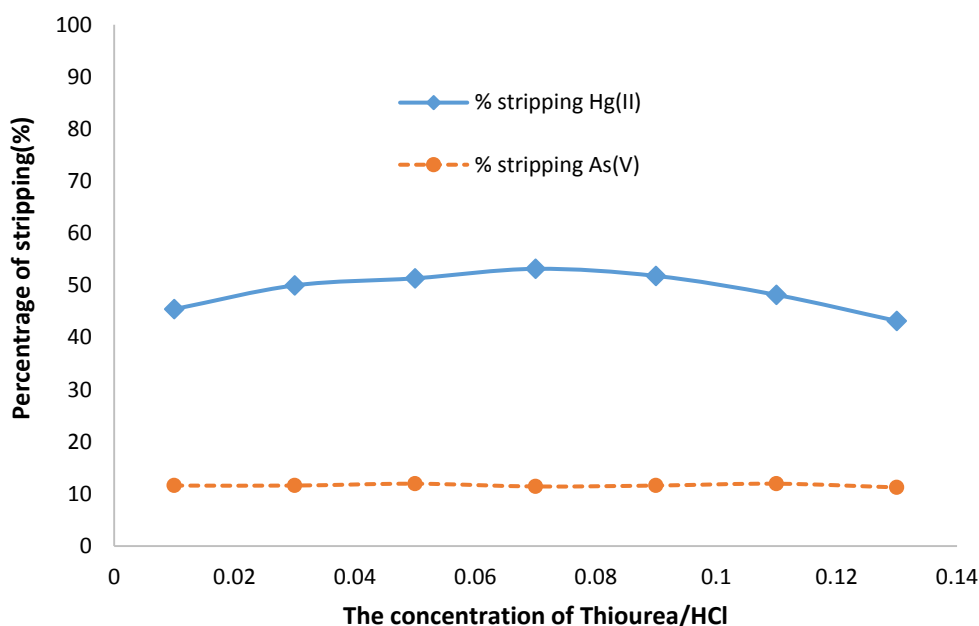
ไอออนออกและสารละลายกรดไนตริกนั้นนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ได้เพียงเล็กน้อย ในส่วนของสารละลายที่เป็นเบส โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์นำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ได้น้อยทั้งคู่ เนื่องจากไม่ใช่สารละลายเบสที่แข็งแรงพอ โดยไทโอยูเรียสามารถนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ได้ดีที่สุดเนื่องจากเป็นสารละลายเบสที่มีประจุขนาดใหญ่ในโครงสร้าง [8] ดังนั้นไทโอยูเรียจึงเป็นสารละลายนำกลับที่ดีที่สุดและใช้ในการทดลองต่อไป



**รูปที่ 4.4** ผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์และความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)

#### 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสม

ความเข้มข้นของสารละลายไทโอยูเรียที่ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์จะศึกษาตั้งแต่ 0.01 โมลาร์ถึง 0.13 โมลาร์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดของเมอร์คิวรี(II) จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงความเข้มข้นของไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์และจะลดลงไปเล็กน้อยหลังจากความเข้มข้น 0.07 โมลาร์ เนื่องปฏิกิริยาการนำกลับของเมอร์คิวรี(II) ที่สามารถผันกลับได้ดังแสดงในสมการ (2.6) – (2.7) เมื่อมีความเข้มข้นของไทโอยูเรียสูงขึ้น ทำให้ไทโอยูเรียละลายอิมตัวในวัฏภาคสารละลายนำกลับและเกิดปฏิกิริยาการนำกลับที่ย้อนกลับได้ [63] ในส่วนของไอออนอาร์เซนิก(V) พบว่าปฏิกิริยาการนำกลับคงที่เมื่อความเข้มข้นของไทโอยูเรียเพิ่มมากขึ้น

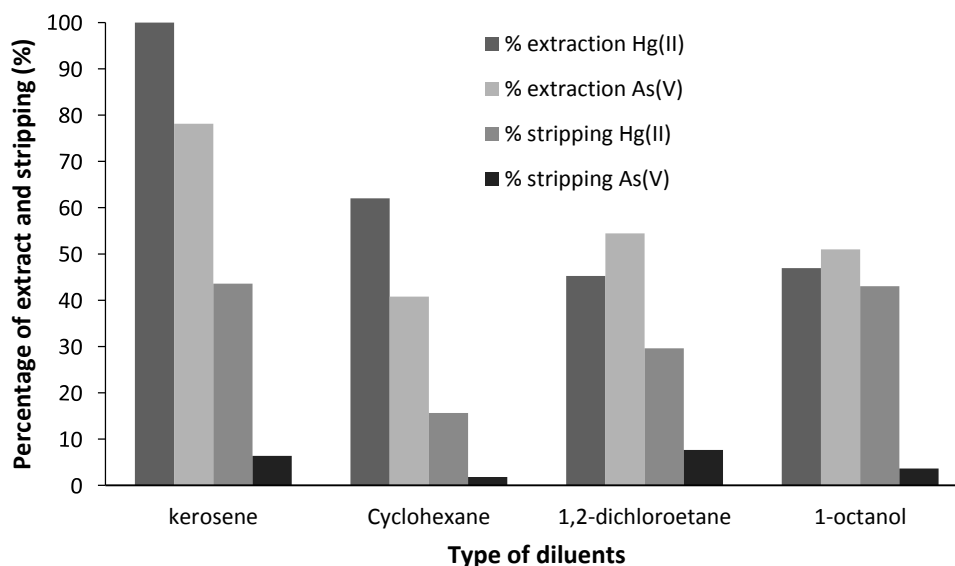


รูปที่ 4.5 ผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อการแยกไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์และความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)

#### 4.6 ผลของชนิดของตัวทำละลายที่เหมาะสม

จากการศึกษาชนิดของตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิดประกอบด้วยเคโรซีน, ไซโคลเฮกเซน, ไดคลอโรอีเทนและออกทานอล จากผลการทดลองพบว่าตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีความเป็นขั้วสูงประกอบด้วยไดคลอโรอีเทนและออกทานอล ซึ่งเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) และค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) สูงจะทำให้เปอร์เซ็นต์การแยกไอออนเมอร์คิวรี(II) และไอออนอาร์เซนิก(V) น้อยกว่าสารที่มีขั้วต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ข้อมูลคุณสมบัติของตัวทำละลายแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.3 ในส่วนของตัวทำละลายออกทานอลพบว่าความหนืดของตัวทำละลายอินทรีย์เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพการแยกไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ลดลง ซึ่งผลการทดลองในแบบเดียวกันพบในงานวิจัยของ Shailest et al. [64] ส่วนตัวทำละลายอินทรีย์ไดคลอโรอีเทนซึ่งเป็นสารที่มีขั้วสูง ตัวทำละลายที่มีขั้วสูงที่จะทำให้เปอร์เซ็นต์การแยกลดลงเนื่องจากมีแรงดึงดูด (interaction) ระหว่างสารสกัดและตัวทำละลายอินทรีย์ที่มากขึ้นด้วย ซึ่งสารสกัดจะไปจับกับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ในสารละลายป้อนได้ลดลง ซึ่งส่งผลให้ปฏิบัติการสกัดไอออนโลหะลดลงตามไปด้วย [65] ในส่วนของตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วน้อย พบว่าเคโรซีนให้เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับที่ดีที่สุด เพราะเป็นตัวทำละลายมีค่าความเป็นขั้วที่ต่ำที่สุด โดยสาร

สกัดอะลิควอตซ์สามสามหกซึ่งเป็นสารสกัดชนิดเบสที่ไม่มีขี้้วสามารถละลายในเคโรซีนได้ดีกว่าไซโคลเฮกเซน ในการทดลองต่อไปจะใช้เคโรซีนเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหก

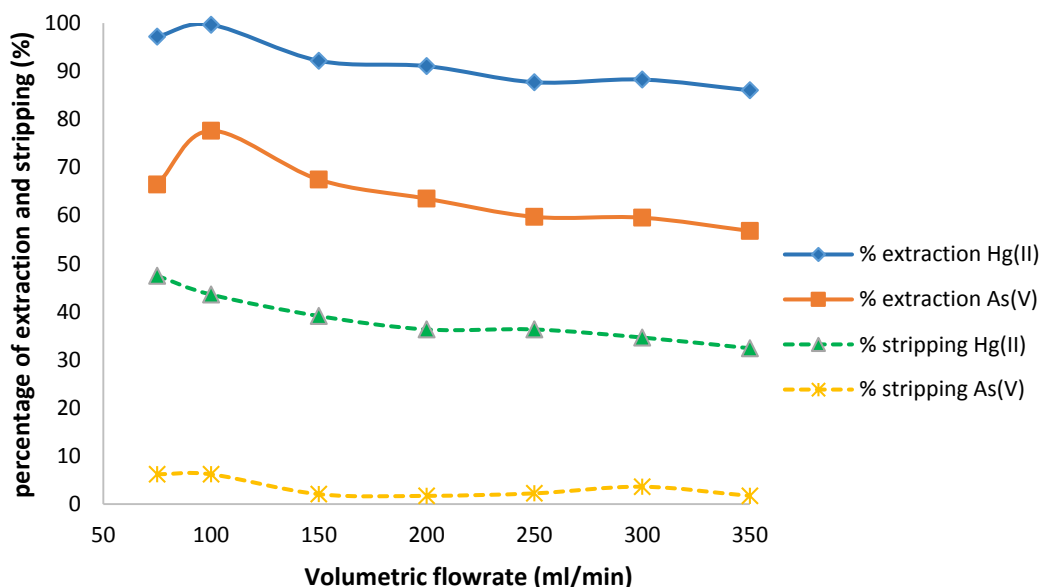


**รูปที่ 4.6** ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์, ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์)

#### 4.7 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับที่ต่างกันตั้งแต่ 75 ถึง 350 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.7 จากผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์สกัดเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 75 ถึง 100 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากความหนาของชั้นขอบเขต (boundary layer) ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายน้ำและสารละลายอินทรีย์ลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (permeability) เพิ่มขึ้น [29, 66] เมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับมากกว่า 100 มิลลิลิตรต่อนาทีจะทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับลดลง เนื่องจากอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาที่สารละลายน้ำ (สารละลายป้อนและนำกลับ) และสารละลายอินทรีย์จะเกิดปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับ (residence time) น้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าถังของสารละลายของเหลวอินทรีย์มีน้ำเข้าไปผสมด้วย เพราะว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะทำให้ความดันของสารละลายน้ำ (aqueous solution) มากกว่าสารละลายอินทรีย์มากเกินไป ทำ

ให้น้ำแพร่ผ่านเข้าไปในชั้นของสารละลายอินทรีย์ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ลดลง[67]

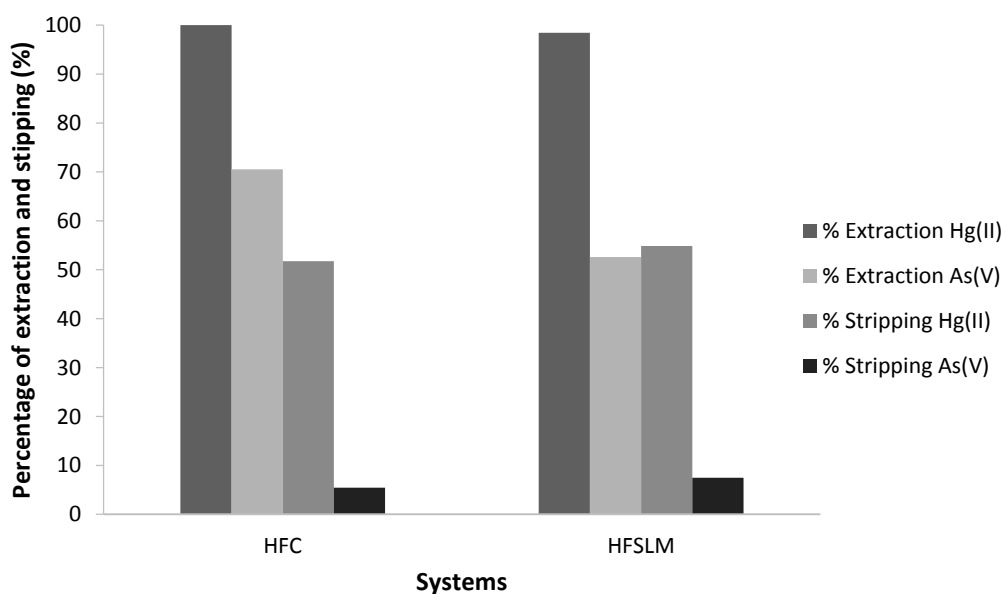


**รูปที่ 4.7** ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์, ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์)

#### 4.8 ประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

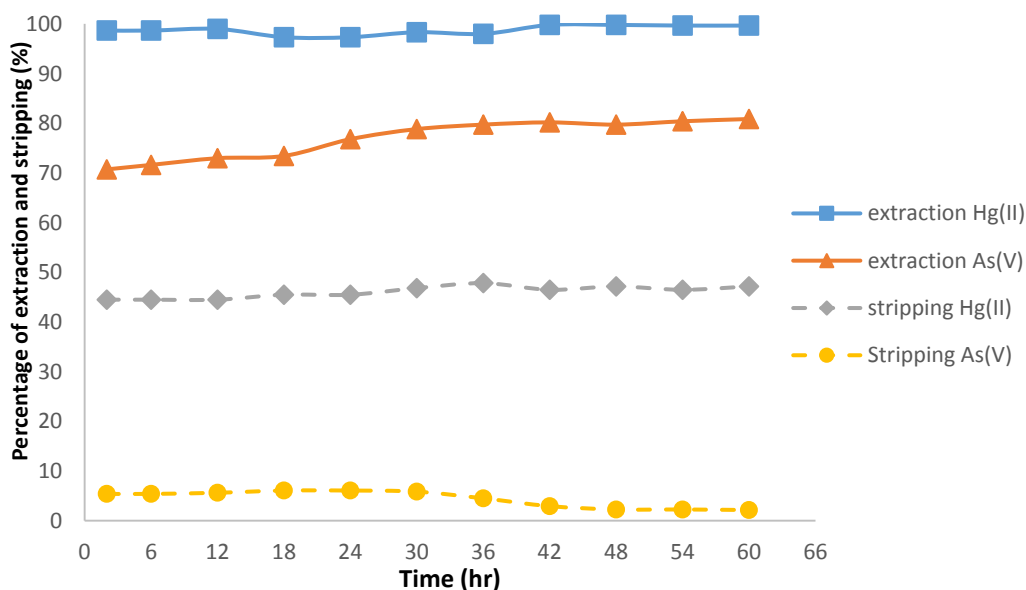
ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของประสิทธิภาพและความเสถียรภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส จากรูปที่ 4.8 พบว่า การสกัดเมอร์คิวรี(II) ของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสและเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่การสกัดอาร์เซนิก(V) ของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสมากกว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงอย่างมีนัยสำคัญ ระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสมีการถ่ายเทมวลที่เร็วกว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่า นอกจากนี้แล้วการใช้สองมอดูลจะทำให้มีความเสถียรการถ่ายเทมวล โดยมอดูลแรกใช้สำหรับปฏิกิริยาการสกัดและมอดูลที่สองใช้สำหรับปฏิกิริยาการนำกลับ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง [42, 44] ส่วนการนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสและเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีค่าใกล้เคียงกัน

ในส่วนองเสถียรภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส ในการทดลองนี้ได้ทำลงดำเนินระบบไปเรื่อยๆจนถึง 60 ชั่วโมง และต้องหยุดเนื่องจากเกิดความร้อนที่เพิ่มขึ้นมาที่เกียร์บีบ ทำให้เกิดความเสียหายต่อเกียร์บีบได้ จากผลในการทดลองรูปที่ 4.9 พบว่าการสกัดและนำกลับเมอร์คิวรี (II) และอาร์เซนิก(V) ไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อดำเนินระบบไปเรื่อยๆ เนื่องจากระบบการไหลของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสจะให้ของเหลวอินทรีย์ (organic liquid) ไหลอยู่ชั้นเปลือกอย่างต่อเนื่อง สารละลายป้อนและนำกลับ (aqueous solution) จะไหลอยู่ในชั้นท่อของมอดูลที่หนึ่งและมอดูลที่สองตามลำดับ ซึ่งจะทำให้เกิดการสกัดและนำกลับขึ้นโดยที่สารละลายอินทรีย์ไม่หลุดออกจากรูพรุน โดยเสถียรภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสมากที่สุดที่เวลา 700 ชั่วโมง หรือ 29 วัน [38] ในขณะที่ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะมีเสถียรภาพได้เพียง 8 วัน ซึ่งพบโดย Guell et al., 2008 [68] ที่ทดลองสกัดไอออนโครเมียม (VI) ด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกโดยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเส้นใยกลวง



รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก (V) โดยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสและระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

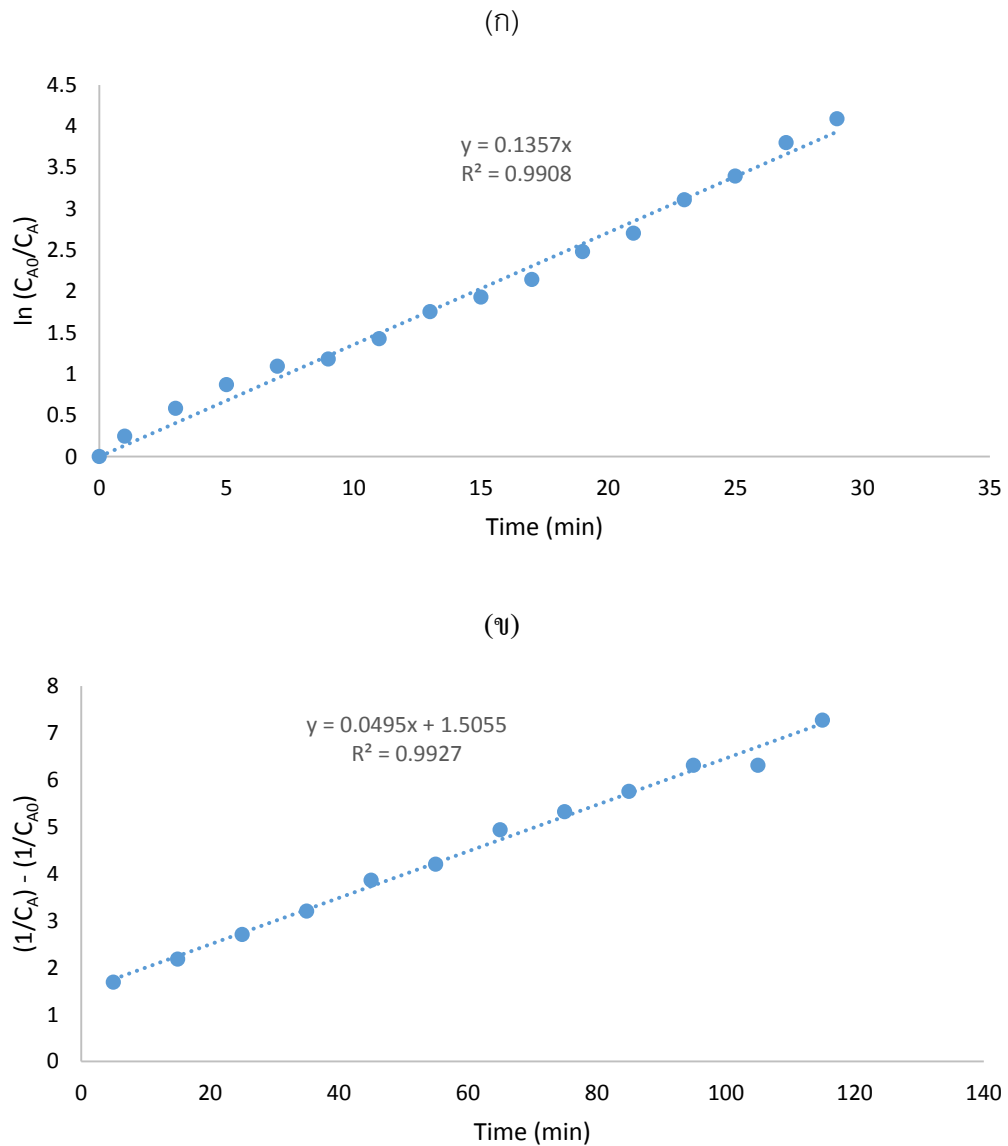




รูปที่ 4.9 ผลของเสถียรภาพต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) (ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์, ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, สารละลายนำกลับไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์)

#### 4.9 อันดับการเกิดปฏิกิริยา

อันดับการเกิดปฏิกิริยาการสกัดของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกแสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณแสดงถึงอันดับการเกิดปฏิกิริยาของการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) อยู่ในอันดับที่หนึ่ง ส่วนอันดับการเกิดปฏิกิริยาของไอออนอาร์เซนิก(V) อยู่ในอันดับที่สองซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ (correlation coefficient) ที่ดีที่สุด โดยเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) จะมากที่สุดเมื่อเข้าสู่เวลา 30 และ 115 นาที ตามลำดับ ความชันที่ได้จากกราฟของการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) เป็นค่าคงที่ ( $K_f'$ ) และ ( $k_{f1}'$ ) โดยสามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order rate reaction constant:  $k_f$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดเมอร์คิวรี(II) คือ  $6.79 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  และค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (second order rate reaction constant:  $k_{f1}$ ) ของการสกัดอาร์เซนิก(V) มีค่า  $4.95 \times 10^{-2} \text{ L mol}^{-1} \text{ min}^{-1}$  ค่าคงที่ทั้งสองจะนำไปใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.10 อันดับอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหก  
ก.) ไอออนเมอร์คิวรี(II) ข.) ไอออนอาร์เซนิก(V)

ตารางที่ 4.1 อันดับอัตราการเกิดปฏิกิริยา

| Rate reaction order | Hg(II)           | As(V)            |
|---------------------|------------------|------------------|
| 0                   | 0.789 Non-Accept | 0.606 Non-Accept |
| 1                   | 0.991 Acceptable | 0.364 Non-Accept |
| 2                   | 0.717 Non-Accept | 0.993 Acceptable |

#### 4.10 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของระบบอนุภาคเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

##### 4.10.1 ค่าคงที่สมดุล

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.12) – (2.13) จากผลการคำนวณพบว่า ค่าคงที่สมดุลของการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) คือ  $8.46 \times 10^{-7}$  และค่าคงที่สมดุลของการสกัดไอออนอาร์เซนิก(V) คือ  $4.59 \times 10^{-6}$

##### 4.10.2 สัมประสิทธิ์การแพร่

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.19) – (2.21) โดยเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการแพร่ของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก (V) ในวิทยาศาสตร์ละลายน้ำและวิทยาศาสตร์ละลายอินทรีย์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในวิทยาศาสตร์ละลายน้ำของไอออนเมอร์คิวรี(II) คือ  $1.6 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาทีและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในวิทยาศาสตร์ละลายน้ำของไอออนอาร์เซนิก(V) คือ  $1.31 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที และสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนเมอร์คิวรี(II) ในวิทยาศาสตร์ละลายอินทรีย์คือ  $2.52 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาทีและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนอาร์เซนิก(V) ในวิทยาศาสตร์ละลายอินทรีย์คือ  $2.07 \times 10^{-9}$  ตารางเมตรต่อวินาที โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมในหัวข้อถัดไป

##### 4.10.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) ในสารละลายน้ำชั้นท่อ ( $k_f$ ) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น ( $k_m$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก ( $k_o$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.15) – (2.17) ภายใต้สภาวะที่ดีที่สุด (optimum condition) ซึ่งประกอบด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนเมอร์คิวรีและอาร์เซนิกคือ 1.1 และ 0.9 ส่วนในพันล้านส่วน ตามลำดับ ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกในตัวทำละลายเคโรซีน 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความเข้มข้นของไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (overall mass transfer coefficient) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.22) – (2.23) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของชั้นท่อ เยื่อแผ่น ชั้นเปลือก และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) แสดงในตารางที่ 4.2

จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายน้ำในชั้นท่อ (ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อนในชั้นท่อ ( $k_f$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายนำกลับในชั้นท่อ ( $k_s$ )) มีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายในชั้นของเหลวอินทรีย์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของการแพร่ในเยื่อแผ่นเหลว (membrane diffusion) แสดงว่าการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของการแพร่ในชั้นท่อมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมน้อยที่สุด ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นการแพร่ของสารอินทรีย์ (organic diffusion) ส่งผลต่อการแยกไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ของระบบมอดูลเส้นใยกลวงมากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่มากที่สุด จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) มากกว่าไอออนอาร์เซนิก(V) แสดงถึงการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) ด้วยสารสกัดอะลิควอดซ์สามสามหมกมีค่ามากกว่าการสกัดอาร์เซนิก(V) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

**ตารางที่ 4.2** ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของไอออนเมอร์คิวรี (II) และอาร์เซนิก(V)

| Solute/phase   | Hg(II)   | As(V)  |
|--|--|--|
| Toxic metal/ feed (m/s)  | $k_{Hg,f} = 3.34 \times 10^{-6}$                         | $k_{As,f} = 2.92 \times 10^{-6}$                       |
| Toxic metal/stripping (m/s)                                    | $k_{Hg,s} = 3.29 \times 10^{-6}$                         | $k_{As,s} = 2.87 \times 10^{-6}$                       |
| Metal-complex species/membrane (m/s)                           | $k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-},m} = 9.05 \times 10^{-6}$  | $k_{(R_3N^+CH_3)_2AsO_4^{3-},m} = 7.43 \times 10^{-6}$ |
| Metal-complex species/shell side (m/s)                         | $k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-},o} = 10.19 \times 10^{-6}$ | $k_{(R_3N^+CH_3)_2AsO_4^{3-},o} = 8.93 \times 10^{-6}$ |
| Overall mass transfer coefficient of extraction reaction (m/s) | $K_E = 3.34 \times 10^{-6}$                              | $K_E = 2.33 \times 10^{-6}$                            |
| Overall mass transfer coefficient of stripping reaction (m/s)  | $K_S = 2.41 \times 10^{-7}$                              | $K_S = 2.09 \times 10^{-7}$                            |

#### 4.10.4 ฟลักซ์ที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลว

ปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ถูกควบคุมโดยฟลักซ์การแพร่หรือฟลักซ์ของการเกิดปฏิกิริยามีหลายวิธีในการคำนวณ โดยในงานวิจัยนี้ใช้การคำนวณค่า  $\alpha$  (พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแพร่) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.26)

ค่า  $\alpha$  ของปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) มีค่าเท่ากับ 0.00018 และค่าของไอออนอาร์เซนิก(V) 0.00049 ซึ่งค่าที่ได้เข้าใกล้ค่าศูนย์ แสดงถึงการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะทั้งสองชนิดถูกควบคุมโดยฟลักซ์ของการแพร่เพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเลย เนื่องจากระบบมอดูลมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสไม่ได้ฝังสารละลายอินทรีย์ลงในรูพรุนของเส้นใยกลวง แต่ให้ไหลผ่านรูพรุนและชั้นเปลือกของทั้งสองมอดูลแทน การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก (V) ที่เกิดที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวและไปยังชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่งเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยานำกลับในมอดูลที่สอง



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการทดลองสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) จากน้ำปนเปื้อนจากกระบวนการขุดเจาะ (produced water) ด้วยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส ที่สภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน 0.02 โมลาร์, ความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกละลายในตัวทำละลายเคโรซีนที่ 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สารละลายนำกลับที่ใช้คือไทโอยูเรียความเข้มข้น 0.07 โมลาร์และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่สภาวะดังกล่าว เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) คือ 100 และ 78.78 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับไอออนอาร์เซนิก(V) คือ 47.88 และ 6.66 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองแสดงประสิทธิภาพในการแยกไอออนโลหะที่มีพิษออกจากรูปปนเปื้อนจากกระบวนการขุดเจาะด้วยระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส โดยความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) สุดท้ายที่เหลือในน้ำปนเปื้อนคือ 0 และ 0.19 ส่วนในล้านส่วนซึ่งผ่านมาตรฐานน้ำปนเปื้อนของกระทรวงอุตสาหกรรม การสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) ด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกเป็นปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งส่วนการสกัดไอออนอาร์เซนิก(V) เป็นปฏิกิริยาอันดับที่สอง จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) ที่สภาวะที่ดีที่สุดข้างต้น พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของชั้นของเหลวอินทรีย์ (organic diffusion) ที่ไหลในชั้นเปลือกของทั้งสองมอดูลมีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (overall mass transfer coefficient) มากที่สุด ส่วนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นทอ (aqueous layer diffusion) มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมน้อยที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) มีค่า  $3.34 \times 10^{-6}$  และ  $2.33 \times 10^{-6}$  เมตรต่อวินาที ตามลำดับ แสดงถึงสามารถสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) ได้มากกว่าไอออนอาร์เซนิก(V)

พลาซซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสสามารถคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่าค่า พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแพร่ ( $\alpha$ ) ของการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) คือ 0.00018 และ 0.00049 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ไร้หน่วยมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หมายถึงการถ่ายเทมวลของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ขึ้นอยู่กับพลาซซ์การแพร่ (diffusion flux) เพียงอย่างเดียว ไม่ได้ขึ้นกับการเกิดปฏิกิริยาเลย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรกรองน้ำปนเปื้อนจากหลุมขุดเจาะให้สะอาดไม่ให้มีตะกอนหรือฝุ่นเจือปนเนื่องจากจะส่งผลต่อการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V)

2. ในระหว่างการดำเนินการระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส ต้องทำให้ความดันของสารละลายที่เป็นน้ำ (aqueous solution) มากกว่าสารละลายของเหลวอินทรีย์ (organic liquid) มากกว่า 2.5 - 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psig) เพื่อป้องกันไม่ให้อาร์เซนิก(V) แพร่ผ่านเข้าไปในชั้นของสารละลายที่เป็นน้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ลดลง

3. ในระหว่างดำเนินการระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส เมื่อสังเกตให้สารละลายที่เป็นน้ำเข้าไปอยู่ในถังของสารละลายของเหลวอินทรีย์ หมายถึงความดันในสารละลายป้อนหรือสารละลายนำกลับมากเกินไป ให้ลดความเร็วหรืออัตราการไหลของสารละลายป้อนหรือนำกลับลง เมื่อสารละลายของเหลวอินทรีย์ปนกับน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกลดลง

4. เมื่อเก็บตัวอย่างที่เวลาที่ต้องการของสารละลายป้อนและนำกลับขาออกแล้ว ต้องนำไปผ่านการย่อย (digest) เพื่อย่อยไขมันที่ตกค้างอยู่ในตัวอย่างก่อน ถ้ามีน้ำมันในตัวอย่างจะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ได้ โดยเก็บตัวอย่างปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้น (conc. Nitric acid) ลงไปประมาณ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ นำตัวอย่างไปต้มเพื่อให้ทำลายน้ำมันที่อยู่ในตัวอย่าง จากนั้นเติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้กลับมาเป็น 30 มิลลิลิตรเหมือนเดิม

## รายการอ้างอิง

1. Administration, E.I., Natural Gas Processing: The Crucial Link Between Natural Gas Production and Its Transportation to Market. 2006.
2. Camus, L., et al., Comparison of produced water toxicity to Arctic and temperate species. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015. 113(0): p. 248-258.
3. Industry, Thailand regularoty discharge standards. 1996.
4. Inbaraj, B.S., et al., Adsorption of toxic mercury(II) by an extracellular biopolymer poly( $\gamma$ -glutamic acid). *Bioresource Technology*, 2009. 100(1): p. 200-207.
5. Francis, T., T. Prasada Rao, and M.L.P. Reddy, Cyanex 471X as extractant for the recovery of Hg(II) from industrial wastes. *Hydrometallurgy*, 2000. 57(3): p. 263-268.
6. Meera, R., T. Francis, and M.L.P. Reddy, Studies on the liquid-liquid extraction of mercury(II) from acidic chloride solutions using Cyanex 923. *Hydrometallurgy*, 2001. 61(2): p. 97-103.
7. Gupta, B. and Z. Begum I, Separation and removal of arsenic from metallurgical solutions using bis(2,4,4-trimethylpentyl)dithiophosphinic acid as extractant. *Separation and Purification Technology*, 2008. 63(1): p. 77-85.
8. Fábrega, F.d.M. and M.B. Mansur, Liquid-liquid extraction of mercury (II) from hydrochloric acid solutions by Aliquat 336. *Hydrometallurgy*, 2007. 87(3-4): p. 83-90.
9. Gabelman, A. and S.-T. Hwang, Hollow fiber membrane contactors. *Journal of Membrane Science*, 1999. 159(1-2): p. 61-106.



10. Ansari, S.A., et al., Novel diglycolamide-functionalized calix[4]arenes for actinide extraction and supported liquid membrane studies: Role of substituents in the pendent arms and mass transfer modeling. *Journal of Membrane Science*, 2013. 430(0): p. 304-311.
11. Leepipatpiboon, N., U. Pancharoen, and P. Ramakul, Separation of Co(II) and Ni(II) from thiocyanate media by hollow fiber supported liquid membrane containing Alamine300 as carrier - investigation of polarity of diluent and membrane stability. *Korean J. Chem. Eng.*, 2013. 30(1): p. 194-200.
12. Hao, Z., et al., Supported liquid membranes with organic dispersion for recovery of Cephalexin. *Journal of Membrane Science*, 2014. 468(0): p. 90-97.
13. Ramakul, P., W. Pattaweeekongka, and U. Pancharoen, Mass transfer modeling of membrane carrier system for extraction of C(IV) from sulfate media using hollow fiber supported liquid membrane. *Korean J. Chem. Eng.*, 2006. 23(1): p. 85-92.
14. DŻygiel, P. and P.P. Wiczorek, Chapter 3 - Supported Liquid Membranes and Their Modifications: Definition, Classification, Theory, Stability, Application and Perspectives, in *Liquid Membranes*, V.S. Kislik, Editor. 2010, Elsevier: Amsterdam. p. 73-140.
15. Perez, M.E.M., et al., Study of As(V) transfer through a supported liquid membrane impregnated with trioctylphosphine oxide (Cyanex 921). *Journal of Membrane Science*, 2007. 302(1-2): p. 119-126.
16. Güell, R., et al., Modelling of liquid-liquid extraction and liquid membrane separation of arsenic species in environmental matrices. *Separation and Purification Technology*, 2010. 72(3): p. 319-325.

17. Chakrabarty, K., P. Saha, and A.K. Ghoshal, Separation of mercury from its aqueous solution through supported liquid membrane using environmentally benign diluent. *Journal of Membrane Science*, 2010. 350(1–2): p. 395-401.
18. Jönsson, J.Å. and L. Mathiasson, Membrane-based techniques for sample enrichment. *Journal of Chromatography A*, 2000. 902(1): p. 205-225.
19. Kocherginsky, N.M., Q. Yang, and L. Seelam, Recent advances in supported liquid membrane technology. *Separation and Purification Technology*, 2007. 53(2): p. 171-177.
20. Panja, S., et al., Carrier mediated transport of Pd(II) from nitric acid medium using Dithiodiglycolamide(DTDGA) across a supported liquid membrane (SLM). *Journal of Membrane Science*, 2014. 449(0): p. 67-73.
21. Kandwal, P., et al., Mathematical modeling of Cs(I) transport through flat sheet supported liquid membrane using calix-[4]-bis(2,3-naphtho)-18-crown-6 as the mobile carrier. *Desalination*, 2011. 278(1–3): p. 405-411.
22. Fontàs, C., V. Salvadó, and M. Hidalgo, Selective enrichment of palladium from spent automotive catalysts by using a liquid membrane system. *Journal of Membrane Science*, 2003. 223(1–2): p. 39-48.
23. Johnson, J. and M. Busch, Engineering aspects of reverse osmosis module design. *Desalination*, 2010. 15(1-3): p. 236-248.
24. Karabelas, A.J., M. Kostoglou, and C.P. Koutsou, Modeling of spiral wound membrane desalination modules and plants – review and research priorities. *Desalination*, 2015. 356(0): p. 165-186.
25. Singh, V. and C. Das, Comparison of spiral wound UF membrane performance between turbulent and laminar flow regimes. *Desalination*, 2014. 337(0): p. 43-51.

26. Ansari, S.A., et al., Performance of some extractants used for 'actinide partitioning' in a comparative hollow fibre supported liquid membrane transport study using simulated high level nuclear waste. *Journal of Membrane Science*, 2009. 337(1–2): p. 304-309.
27. Ramakul, P., K. Nakararueng, and U. Pancharoen, One-through Selective Separation of Copper, Chromium and Zinc Ions by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. *Korean J. Chem. Eng.*, 2004. 21(6): p. 1212-1217.
28. Vernekar, P.V., et al., Mathematical Model for the Extraction of Neodymium from Nitrate Media using Hollow Fiber Supported Liquid Membrane Operated in a Recycling Mode. *Separation Science and Technology*, 2013. 48: p. 1003-1014.
29. Manna, M.S., P. Saha, and A.K. Ghoshal, Separation of medicinal catechins from tea leaves (*Camellia sinensis*) extract using hollow fiber supported liquid membrane (HF-SLM) module. *Journal of Membrane Science*, 2014. 471(0): p. 219-226.
30. San Roman, M.F., et al., Liquid membrane technology: fundamentals and review of its applications. *J Chem Technol Biotechnol*, 2010. 85: p. 2-10.
31. Zheng, H.-D., et al., Instability mechanisms of supported liquid membranes for copper (II) ion extraction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009. 351(1–3): p. 38-45.
32. Prapasawat, T., et al., Separation of As(III) and As(V) by hollow fiber supported liquid membrane base on the mass transfer theory. *Korean J. Chem. Eng.*, 2008. 25(1): p. 158-163.
33. Pancharoen, U., et al., Selective removal of mercury as  $\text{HgCl}_4^{2-}$  from natural gas well produced water by TOA via HFSLM. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010. 489(1): p. 72-79.

34. Pancharoen, U., W. Poonkum, and A.W. Lothongkum, Treatment of arsenic ions from produced water through hollow fiber supported liquid membrane. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009. 482(1–2): p. 328-334.
35. Lothongkum, A.W., et al., Simultaneous removal of arsenic and mercury from natural-gas-co-produced water from the Gulf of Thailand using synergistic extractant via HFSLM. *Journal of Membrane Science*, 2011. 369(1–2): p. 350-358.
36. Bey, S., et al., Removal of As(V) by PVDF hollow fibers membrane contactors using Aliquat-336 as extractant. *Desalination*, 2010. 264(3): p. 193-200.
37. Mafu, L.D., T.A.M. Msagati, and B.B. Mamba, The enrichment and removal of arsenic (III) from water samples using HFSLM. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2012. 50–52(0): p. 121-126.
38. Galán, B., M. Calzada, and I. Ortiz, Recycling of Cr(VI) by membrane solvent extraction: Long term performance with the mathematical model. *Chemical Engineering Journal*, 2006. 124(1–3): p. 71-79.
39. Pabby, A.K. and A.M. Sastre, State-of-the-art review on hollow fibre contactor technology and membrane-based extraction processes. *Journal of Membrane Science*, 2013. 430(0): p. 263-303.
40. Ambare, D.N., et al., Non-dispersive solvent extraction of neodymium using a hollow fiber contactor: Mass transfer and modeling studies. *Journal of Membrane Science*, 2013. 446(0): p. 106-112.
41. Swain, B., et al., Separation of Co(II) and Li(I) with Cyanex 272 using hollow fiber supported liquid membrane: A comparison with flat sheet supported liquid membrane and dispersive solvent extraction process. *Chemical Engineering Journal*, 2015. 271(0): p. 61-70.
42. Lazarova, Z., B. Syska, and K. Schügerl, Application of large-scale hollow fiber membrane contactors for simultaneous extractive removal and stripping of penicillin G. *Journal of Membrane Science*, 2002. 202(1–2): p. 151-164.

43. Coelho, I.M., et al., Transport mechanisms and modelling in liquid membrane contactors. *Separation and Purification Technology*, 2000. 19(3): p. 183-197.
44. Ortiz, I., B. Galan, and A. Irabien, Kinetic Analysis of the Simultaneous Nondispersive Extraction and Back-Extraction of Chromium(VI). *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1996. 35: p. 1369-1377.
45. Coelho, I.M., et al., Membrane-based solvent extraction and stripping of lactate in hollow-fibre contactors. *Journal of Membrane Science*, 1997. 134(1): p. 19-32.
46. Gugliuzza, A. and A. Basile, Membrane contactors: fundamentals, membrane materials and key operations, in *Handbook of Membrane Reactors*, A. Basile, Editor. 2013, Woodhead publishing: Amsterdam. p. 54-106.
47. Lin, S.-H. and R.-S. Juang, Removal of free and chelated Cu(II) ions from water by a nondispersive solvent extraction process. *Water Research*, 2002. 36(14): p. 3611-3619.
48. Lin, S.-H. and R.-S. Juang, Mass-transfer in hollow-fiber modules for extraction and back-extraction of copper(II) with LIX64N carriers. *Journal of Membrane Science*, 2001. 188(2): p. 251-262.
49. Boening, D.W., Ecological effects, transport, and fate of mercury: a general review. *Chemosphere*, 2000. 40(12): p. 1335-1351.
50. Mohan, D. and C.U. Pittman Jr, Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 2007. 142(1–2): p. 1-53.
51. Deng, C., et al., Toxic effects of mercury on PSI and PSII activities, membrane potential and transthylakoid proton gradient in *Microsorium pteropus*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2013. 127(0): p. 1-7.

52. Wang, X., R. Sun, and C. Wang, pH dependence and thermodynamics of Hg(II) adsorption onto chitosan-poly(vinyl alcohol) hydrogel adsorbent. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014. 441(0): p. 51-58.
53. Minhas, F.T., S. Memon, and M.I. Bhangar, Transport of Hg(II) through bulk liquid membrane containing calix[4]arene thioalkyl derivative as a carrier. *Desalination*, 2010. 262(1-3): p. 215-220.
54. Ngim, C.H., et al., Chronic neurobehavioural effects of elemental mercury in dentists. *British Journal of Industrial Medicine*, 1992. 49: p. 782-790.
55. Fujino, Y., et al., Mental health burden amongst inhabitants of an arsenic-affected area in Inner Mongolia, China. *Social Science & Medicine*, 2004. 59(9): p. 1969-1973.
56. Agreda, D.D., et al., Supported liquid membranes technologies in metal removal from liquid effluents. *REVISTA DE METALURGIA*, 2011. 47(2): p. 146-168.
57. El-Nadi, Y.A., Effect of diluents on the extraction of praseodymium and samarium by Cyanex 923 from acidic nitrate medium. *Journal of Rare Earths*, 2010. 28(2): p. 215-220.
58. Kislik, V.S., Chapter 3 - Chemistry of Metal Solvent Extraction, in *Solvent Extraction*, V.S. Kislik, Editor. 2012, Elsevier: Amsterdam. p. 113-156.
59. Yang, Q. and N.M. Kocherginsky, Copper removal from ammoniacal wastewater through a hollow fiber supported liquid membrane system: Modeling and experimental verification. *Journal of Membrane Science*, 2007. 297(1-2): p. 121-129.
60. Baudot, A., J. Flourey, and H.E. Smorenburg, Liquid-Liquid Extraction of Aroma Compounds with Hollow Fiber Contactor. *AIChE Journal*, 2001. 47(8): p. 1780-1793.

61. S Kislik, V., Chapter 2 - Carrier-Facilitated Coupled Transport Through Liquid Membranes: General Theoretical Considerations and Influencing Parameters, in Liquid Membranes, V.S. Kislik, Editor. 2010, Elsevier: Amsterdam. p. 17-71.
62. Mortaheb, H.R., et al., Study on removal of cadmium by hybrid liquid membrane process. *Journal of Hazardous Materials*, 2010. 177(1-3): p. 660-667.
63. Bhatluri, K.K., et al., Supported liquid membrane-based simultaneous separation of cadmium and lead from wastewater. *Journal of Membrane Science*, 2014. 459(0): p. 256-263.
64. Shailesh, S., et al., Role of diluents in uranium transport across a supported liquid membrane using di(2 - ethylhexyl)isobutyramide as the carrier. *Desalination*, 2008. 232(1-3): p. 281-290.
65. Panja, S., et al., Role of organic diluents on Am(III) extraction and transport behaviour using N,N,N',N'-tetraoctyl-3-oxapentanediamide as the extractant. *Journal of Membrane Science*, 2012. 403-404(0): p. 71-77.
66. Gupta, S., M. Chakraborty, and Z.V.P. Murthy, Performance study of hollow fiber supported liquid membrane system for the separation of bisphenol A from aqueous solutions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014. 20(4): p. 2138-2145.
67. Güell, R., et al., Efficient hollow fiber supported liquid membrane system for the removal and preconcentration of Cr(VI) at trace levels. *Separation and Purification Technology*, 2008. 62(2): p. 389-393.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## ภาคผนวก ก

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา

#### ก-1 ค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, $K_{ex}$ ) ของปฏิกิริยาการสกัด

ปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยสารสกัดอะลิควอดซ์สามสามหมก ในสมการที่ (2.12) – (2.13) ค่าคงที่สมดุลเขียนได้ดังนี้

$$K_{ex, Hg(II)} = \frac{[(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-}][Cl^-]^2}{[HgCl_4^{2-}][(R_3N^+CH_3)Cl^-]^2} \quad (ก-1)$$

$$K_{ex, As(V)} = \frac{[R_3N^+CH_3H_2AsO_4^-][Cl^-]}{[H_2AsO_4^-][(R_3N^+CH_3)Cl^-]} \quad (ก-2)$$

#### ก-2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient: $D$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบ่งออกเป็นสองชนิดคือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนในชั้นน้ำ และสัมประสิทธิ์การแพร่ในเยื่อแผ่นเหลว แสดงดังต่อไปนี้

1. สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อน

$$D_{aq}^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta V_A^{0.6}} \quad (ก-3)$$

2. สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

$$D_m^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta V_A^{0.6}} \quad (ก-4)$$

เมื่อ

$D_{aq}^*$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคสารละลายป้อน (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

$D_m^*$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

$M$  = น้ำหนักโมเลกุลของตัวทำละลาย (กรัมต่อโมล)

$\eta$  = ความหนืดของตัวทำละลาย (เซนติพ้อย, cP)

- $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว (เคลวิน)  
 $V_A$  = ปริมาตรเชิงโมลาร์ของตัวถูกละลาย (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)

ก-3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ (mass transfer coefficient in tube side : $k_t$ )

$$k_t = 1.62 \frac{D}{2r_i} \left( \frac{4r_i^2 u_{tube}}{DL} \right)^{1/3} \quad (\text{ก-5})$$

เมื่อ

- $k_t$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายน้ำในชั้นท่อของทั้งสองมอดูล (เมตรต่อวินาที)  
 $D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคที่เป็นน้ำ (ตารางเมตรต่อวินาที)  
 $r_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)  
 $U_{tube}$  = ความเร็วการไหลของสารละลายป้อนและนำกลับในชั้นท่อของทั้งสองมอดูล (เมตรต่อวินาที)  
 $L$  = ความยาวของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

ก-4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น (mass transfer coefficient in membrane:  $k_m$ )

$$k_m = \frac{\varepsilon D_m}{\tau r_i \ln(r_o / r_i)} \quad (\text{ก-6})$$

เมื่อ

- $k_m$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกภายในเยื่อแผ่น (เมตรต่อวินาที)  
 $D_m$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ (organic liquid phase) (ตารางเมตรต่อวินาที)  
 $r_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)  
 $r_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)  
 $\varepsilon$  = ปริมาณรูพรุนในมอดูลเส้นใยกลวง (%)  
 $\tau$  = ค่าความคดเคี้ยวของมอดูลเส้นใยกลวง

ก-5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก (mass transfer coefficient in shell side:  $k_o$ )

$$k_o = \frac{0.245D}{4r_H} \left( \frac{4r_H u_{shell}}{\nu} \right)^{2/3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \quad (\text{ก-7})$$

เมื่อ

$K_o$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์  
ในชั้นเปลือกของทั้งสองมอดูล (เมตรต่อวินาที)

$D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนที่ต้องการแยกในวัฏภาคที่เป็นน้ำ (ตารางเมตรต่อ  
วินาที)

$U_{shell}$  = ความเร็วการไหลของสารละลายอินทรีย์ในชั้นเปลือกของทั้งสองมอดูล (เมตรต่อ  
วินาที)

$\nu$  = ความหนืดไคเนมาติก (kinematic viscosity) (ตารางเมตรต่อวินาที)

$r_H$  = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic radius) ของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

โดยการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางแบบไฮดรอลิก (hydraulic diameter) สามารถคำนวณ  
ได้จากสมการที่ (2.18)

$$d_h = \frac{d_a^2 - d_i^2 - nd_o^2}{nd_o} \quad (\text{ก-7})$$

เมื่อ

$D_a$  = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชั้นท่อ (เมตร)

$D_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

$D_o$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของมอดูลเส้นใยกลวง (เมตร)

$N$  = จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล

### ก-6 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (overall mass transfer coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าความต้านทานการถ่ายเทมวล (mass transfer resistance) ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) แสดงดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_E} = \frac{1}{k_{Hg,f}} + \frac{[Cl^-]_f}{k_f[(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{oi}} + \frac{[Cl^-]_f^2}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-},m} K_{ex}[(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} + \frac{[Cl^-]_f^2}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-},o} K_{ex}[(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} \quad (ก-9)$$

$$\frac{1}{K_S} = \frac{1}{k_{Hg,s}} + \frac{1}{k_f[NH_2CSNH_2]_s} + \frac{1}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-},m}} + \frac{K_{ex}[R_3N^+CH_3Cl^-]_{si}^2}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-},o} [NH_2CSNH_2]_s^2} \quad (ก-10)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับไอออนอาร์เซนิก(V) แสดงดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_E} = \frac{1}{k_{As,f}} + \frac{[Cl^-]_f}{k_{f1}[(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{oi}} + \frac{[Cl^-]_f}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-,m} K_{ex}[(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} + \frac{[Cl^-]_f}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-,o} K_{ex}[(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} \quad (ก-11)$$

$$\frac{1}{K_S} = \frac{1}{k_{As,s}} + \frac{1}{k_{f1}[NH_2CSNH_2]_s} + \frac{1}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-,m}} + \frac{K_{ex}[R_3N^+CH_3Cl^-]_{si}}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-,o} [NH_2CSNH_2]_s} \quad (ก-12)$$

### ก-7 พลักซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

โดยการคำนวณพลักซ์ที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{1/\varepsilon k}{h_m/D_m} \quad (ก-13)$$

**ภาคผนวก ข**  
**ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ**

**ตารางที่ ข.1** ผลของเวลาดำเนินการที่มีผลต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II)และอาร์เซนิก  
(V) ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

(ดูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก ค-1 และ ค-2)

| เวลา<br>(นาที) | [Hg] <sub>f</sub> (ppm) |       | [Hg] <sub>s</sub><br>(ppm) | % การ<br>สกัด | % การ<br>นำกลับ | [As] <sub>s</sub> (ppm) |       | [As] <sub>s</sub><br>(ppm) | % การ<br>สกัด | % การ<br>นำกลับ |
|----------------|-------------------------|-------|----------------------------|---------------|-----------------|-------------------------|-------|----------------------------|---------------|-----------------|
|                | ขา<br>เข้า              | ขาออก |                            |               |                 | ขา<br>เข้า              | ขาออก |                            |               |                 |
| 5              | 1.10                    | 0.399 | 0.516                      | 63.69         | 46.93           | 0.90                    | 0.467 | 0.033                      | 48.09         | 3.64            |
| 15             | 1.10                    | 0.160 | 0.504                      | 85.47         | 45.81           | 0.90                    | 0.448 | 0.031                      | 50.27         | 3.46            |
| 25             | 1.10                    | 0.037 | 0.492                      | 96.65         | 44.69           | 0.90                    | 0.362 | 0.028                      | 59.74         | 3.10            |
| 35             | 1.10                    | 0.000 | 0.504                      | 100           | 45.81           | 0.90                    | 0.326 | 0.026                      | 63.75         | 2.91            |
| 45             | 1.10                    | 0.000 | 0.504                      | 100           | 45.81           | 0.90                    | 0.289 | 0.028                      | 67.94         | 3.10            |
| 55             | 1.10                    | 0.000 | 0.516                      | 100           | 46.93           | 0.90                    | 0.272 | 0.025                      | 69.76         | 2.73            |
| 65             | 1.10                    | 0.000 | 0.516                      | 100           | 46.93           | 0.90                    | 0.243 | 0.043                      | 73.04         | 4.74            |
| 75             | 1.10                    | 0.000 | 0.498                      | 100           | 45.25           | 0.90                    | 0.230 | 0.026                      | 74.50         | 2.91            |
| 85             | 1.10                    | 0.000 | 0.504                      | 100           | 45.81           | 0.90                    | 0.216 | 0.030                      | 75.96         | 3.28            |
| 95             | 1.10                    | 0.000 | 0.498                      | 100           | 45.25           | 0.90                    | 0.202 | 0.023                      | 77.60         | 2.55            |
| 105            | 1.10                    | 0.000 | 0.510                      | 100           | 46.37           | 0.90                    | 0.202 | 0.028                      | 77.60         | 3.10            |
| 115            | 1.10                    | 0.000 | 0.492                      | 100           | 44.69           | 0.90                    | 0.197 | 0.030                      | 78.14         | 3.28            |

**สภาวะที่ทดลอง:** ความเข้มข้นของอะลิควอตต์สามสามหก 10 % โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน 6.5 ไทไอยูเรีย 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์

ตารางที่ ข.2 ผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดและนำกลับ  
ไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมพัทธ์

| [HCl]<br>(M) | [Hg] <sub>f</sub> (ppm) |           | [Hg] <sub>s</sub><br>(ppm) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ | [As] <sub>s</sub> (ppm) |           | [As] <sub>s</sub><br>(ppm) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ |
|--------------|-------------------------|-----------|----------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|------------------|--------------------|
|              | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                            |                  |                    | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                            |                  |                    |
| 0.01         | 1.10                    | 0.003     | 0.511                      | 99.72            | 46.48              | 0.90                    | 0.341     | 0.061                      | 62.12            | 6.82               |
| 0.02         | 1.10                    | 0.003     | 0.527                      | 99.72            | 47.89              | 0.90                    | 0.286     | 0.060                      | 68.18            | 6.67               |
| 0.03         | 1.10                    | 0.031     | 0.511                      | 97.18            | 46.48              | 0.90                    | 0.300     | 0.060                      | 66.67            | 6.67               |
| 0.04         | 1.10                    | 0.072     | 0.491                      | 93.43            | 44.60              | 0.90                    | 0.341     | 0.040                      | 62.12            | 4.39               |
| 0.05         | 1.10                    | 0.129     | 0.475                      | 88.26            | 43.19              | 0.90                    | 0.382     | 0.038                      | 57.58            | 4.24               |
| 0.06         | 1.10                    | 0.181     | 0.465                      | 83.57            | 42.25              | 0.90                    | 0.409     | 0.035                      | 54.55            | 3.94               |

สภาวะที่ทดลอง: ความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สามสามหก 10 % โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนเริ่มต้น 6.5, ไทโอยูเรีย 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์ และ  $Q_f = Q_s$  คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

**ตารางที่ ข.3** ผลของความเข้มข้นของอะลิควอตส์สามสามหกต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี (II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมพัทธ์

| [Aliqua<br>t<br>336]<br>(%<br>(v/v)) | [Hg] <sub>f</sub> (ppm) |           | [Hg] <sub>s</sub><br>(pp<br>m) | %<br>การ<br>สกัด | % การ<br>นำกลับ | [As] <sub>s</sub> (ppm) |       | [As] <sub>s</sub><br>(pp<br>m) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------|--------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------|-------|--------------------------------|------------------|--------------------|
|                                      | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                                |                  |                 | ขา<br>เข้า              | ขาออก |                                |                  |                    |
| 2                                    | 1.10                    | 0.114     | 0.568                          | 89.67            | 51.67           | 0.90                    | 0.771 | 0.048                          | 14.29            | 5.36               |
| 4                                    | 1.10                    | 0.066     | 0.561                          | 94.00            | 51.00           | 0.90                    | 0.707 | 0.042                          | 21.43            | 4.64               |
| 6                                    | 1.10                    | 0.037     | 0.550                          | 96.67            | 50.00           | 0.90                    | 0.603 | 0.039                          | 33.04            | 4.29               |
| 8                                    | 1.10                    | 0.029     | 0.568                          | 97.33            | 51.67           | 0.90                    | 0.522 | 0.045                          | 41.96            | 5.00               |
| 10                                   | 1.10                    | 0.022     | 0.561                          | 98.00            | 51.00           | 0.90                    | 0.378 | 0.050                          | 58.04            | 5.54               |
| 12                                   | 1.10                    | 0.011     | 0.550                          | 99.00            | 50.00           | 0.90                    | 0.304 | 0.051                          | 66.25            | 5.71               |
| 14                                   | 1.10                    | 0.002     | 0.539                          | 99.80            | 49.00           | 0.90                    | 0.233 | 0.050                          | 74.11            | 5.54               |
| 16                                   | 1.10                    | 0.029     | 0.524                          | 97.33            | 47.67           | 0.90                    | 0.321 | 0.039                          | 64.29            | 4.29               |
| 18                                   | 1.10                    | 0.044     | 0.488                          | 96.00            | 44.33           | 0.90                    | 0.456 | 0.026                          | 49.29            | 2.86               |

**สภาวะที่ทดลอง:** กรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ในสารละลายป้อน, ไทโอยูเรีย 0.01 โมลาร์ละลายใน  
กรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์ และ  $Q_f = Q_s$  คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

**ตารางที่ ข.4** ผลของชนิดของสารละลายนำกลับต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมพัทธ์

| สารละลายนำกลับ                                | [Hg] <sub>f</sub> (ppm) |       | [Hg] <sub>s</sub> (ppm) | % การสกัด | % การนำกลับ | [As] <sub>s</sub> (ppm) |       | [As] <sub>s</sub> (ppm) | % การสกัด | % การนำกลับ |
|---|-------------------------|-------|-------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------|-------------------------|-----------|-------------|
|   | ขาเข้า                  | ขาออก |                         |           |             | ขาเข้า                  | ขาออก |                         |           |             |
| HNO <sub>3</sub>                              | 1.10                    | 0.000 | 0.568                   | 100       | 5.99        | 0.90                    | 0.147 | 0.093                   | 83.70     | 10.29       |
| DI WATER                                      | 1.10                    | 0.000 | 0.561                   | 100       | 1.84        | 0.90                    | 0.133 | 0.031                   | 85.25     | 3.43        |
| Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.10                    | 0.051 | 0.550                   | 95.39     | 5.53        | 0.90                    | 0.136 | 0.039                   | 84.91     | 4.29        |
| NaOH  | 1.10                    | 0.015 | 0.568                   | 98.62     | 6.91        | 0.90                    | 0.137 | 0.069                   | 84.73     | 7.72        |
| Thiourea                                      | 1.10                    | 0.000 | 0.561                   | 100       | 50.69       | 0.90                    | 0.133 | 0.091                   | 85.25     | 10.12       |

**สภาวะที่ทดลอง:** กรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ในสารละลายป้อน, ความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สามสามหก 14 % โดยปริมาตร, ไทไอยูเรีย 0.01 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์ และ  $Q_f = Q_s$  คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที



ตารางที่ ข.5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับไทโอยูเรียที่ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01 โมลาร์ต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

| [Thio urea] (M) | [Hg] <sub>f</sub> (ppm) |       | [Hg] <sub>s</sub> (ppm) | % การสกัด | % การนำกลับ | [As] <sub>s</sub> (ppm) |       | [As] <sub>s</sub> (ppm) | % การสกัด | % การนำกลับ |
|-----------------|-------------------------|-------|-------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------|-------------------------|-----------|-------------|
|                 | ขาเข้า                  | ขาออก |                         |           |             | ขาเข้า                  | ขาออก |                         |           |             |
| 0.01            | 1.10                    | 0.050 | 0.500                   | 95.45     | 45.45       | 0.90                    | 0.104 | 11.61                   | 78.04     | 11.61       |
| 0.03            | 1.10                    | 0.015 | 0.550                   | 98.64     | 50.00       | 0.90                    | 0.104 | 11.61                   | 79.46     | 11.61       |
| 0.05            | 1.10                    | 0.000 | 0.565                   | 100       | 51.36       | 0.90                    | 0.108 | 11.96                   | 78.93     | 11.96       |
| 0.07            | 1.10                    | 0.000 | 0.585                   | 100       | 53.18       | 0.90                    | 0.103 | 11.43                   | 77.86     | 11.43       |
| 0.09            | 1.10                    | 0.000 | 0.570                   | 100       | 51.82       | 0.90                    | 0.104 | 11.61                   | 78.39     | 11.61       |
| 0.11            | 1.10                    | 0.000 | 0.530                   | 100       | 48.18       | 0.90                    | 0.108 | 11.96                   | 79.11     | 11.96       |
| 0.13            | 1.10                    | 0.000 | 0.475                   | 100       | 43.18       | 0.90                    | 0.101 | 11.25                   | 79.11     | 11.25       |

สภาวะที่ทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ในสารละลายป้อน, ความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สาม สวมหก 14 % โดยปริมาตร และ  $Q_f = Q_s$  คือ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที

**ตารางที่ ข.6** ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก (V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

| ตัวทำ<br>ละลาย<br>อินทรีย์ | [Hg] <sub>f</sub> (ppm) |           | [Hg] <sub>s</sub><br>(pp<br>m) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ | [As] <sub>s</sub> (ppm) |           | [As] <sub>s</sub><br>(pp<br>m) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ |
|----------------------------|-------------------------|-----------|--------------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|-----------|--------------------------------|------------------|--------------------|
|                            | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                                |                  |                    | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                                |                  |                    |
| Kerosene                   | 1.10                    | 0.000     | 0.479                          | 100              | 43.58              | 0.90                    | 0.197     | 0.057                          | 78.14            | 6.38               |
| Cyclo-<br>hexane           | 1.10                    | 0.418     | 0.172                          | 62.01            | 15.64              | 0.90                    | 0.533     | 0.016                          | 40.80            | 1.82               |
| Dichloro-<br>ethane        | 1.10                    | 0.602     | 0.326                          | 45.25            | 29.61              | 0.90                    | 0.410     | 0.069                          | 54.46            | 7.65               |
| Octanol                    | 1.10                    | 0.584     | 0.473                          | 46.93            | 43.02              | 0.90                    | 0.441     | 0.033                          | 51.00            | 3.64               |

**สภาวะที่ทดลอง:** กรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ในสารละลายป้อน, ความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สาม  
สามหก 14 % โดยปริมาตร, ไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01  
โมลาร์ และ  $Q_f = Q_s$  คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข.7 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัดและนำกลับ  
ไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

| Volumetric<br>flowrate<br>(ml/min) | [Hg] <sub>f</sub> (ppm) |           | [Hg] <sub>s</sub><br>(ppm) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ | [As] <sub>s</sub> (ppm) |           | [As] <sub>s</sub><br>(ppm) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ |
|------------------------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|------------------|--------------------|
|                                    | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                            |                  |                    | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                            |                  |                    |
| 75                                 | 1.10                    | 0.031     | 0.522                      | 97.21            | 47.49              | 0.90                    | 0.302     | 0.056                      | 66.44            | 6.20               |
| 100                                | 1.10                    | 0.004     | 0.479                      | 99.66            | 43.58              | 0.90                    | 0.201     | 0.056                      | 77.62            | 6.20               |
| 150                                | 1.10                    | 0.086     | 0.430                      | 92.18            | 39.11              | 0.90                    | 0.293     | 0.019                      | 67.47            | 2.07               |
| 200                                | 1.10                    | 0.098     | 0.399                      | 91.06            | 36.31              | 0.90                    | 0.328     | 0.015                      | 63.51            | 1.72               |
| 250                                | 1.10                    | 0.135     | 0.399                      | 87.71            | 36.31              | 0.90                    | 0.362     | 0.020                      | 59.72            | 2.24               |
| 300                                | 1.10                    | 0.129     | 0.381                      | 88.27            | 34.64              | 0.90                    | 0.364     | 0.033                      | 59.55            | 3.61               |
| 350                                | 1.10                    | 0.154     | 0.356                      | 86.03            | 32.40              | 0.90                    | 0.389     | 0.015                      | 56.80            | 1.72               |

สภาวะที่ทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ในสารละลายป้อน, ความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สาม  
สามหก 14 % โดยปริมาตร, ไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01  
โมลาร์

ตารางที่ ข.8 ประสิทธิภาพของระบบมอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัสและเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย  
กลางต่อการสกัดและนำกลับไปออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V)

| ระบบ  | [Hg] <sub>f</sub> (ppm) |           | [Hg] <sub>s</sub><br>(ppm) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ | [As] <sub>s</sub> (ppm) |           | [As] <sub>s</sub><br>(ppm) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำ<br>กลับ |
|-------|-------------------------|-----------|----------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|------------------|------------------------|
|       | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                            |                  |                    | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                            |                  |                        |
| HFSLM | 1.10                    | 0.017     | 0.604                      | 98.44            | 54.86              | 0.90                    | 0.427     | 0.067                      | 52.61            | 7.48                   |
| HFC   | 1.10                    | 0.000     | 0.569                      | 100              | 51.75              | 0.90                    | 0.265     | 0.049                      | 70.52            | 5.44                   |

สภาวะที่ทดลอง: กรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ในสารละลายป้อน, ความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สาม  
สามหก 14 % โดยปริมาตร, ไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01  
โมลาร์, เวลาเก็บตัวอย่าง 120 นาที และ  $Q_f = Q_s$  คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

**ตารางที่ ข.9** ผลของเสถียรภาพต่อการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธี  
มอดูลเส้นใยกลางแบบสัมผัส

| เวลา<br>(ชั่วโมง) | [Hg] <sub>f</sub><br>(ppm) |           | [Hg] <sub>s</sub><br>(ppm) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ | [As] <sub>s</sub> (ppm) |           | [As] <sub>s</sub><br>(ppm) | %<br>การ<br>สกัด | %<br>การ<br>นำกลับ |
|-------------------|----------------------------|-----------|----------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|------------------|--------------------|
|                   | ขา<br>เข้า                 | ขา<br>ออก |                            |                  |                    | ขา<br>เข้า              | ขา<br>ออก |                            |                  |                    |
| 2                 | 1.10                       | 0.015     | 0.489                      | 98.66            | 44.48              | 0.90                    | 0.264     | 0.049                      | 70.72            | 5.41               |
| 6                 | 1.10                       | 0.015     | 0.489                      | 98.66            | 44.48              | 0.90                    | 0.255     | 0.049                      | 71.62            | 5.41               |
| 12                | 1.10                       | 0.011     | 0.489                      | 99.00            | 44.48              | 0.90                    | 0.243     | 0.051                      | 72.97            | 5.63               |
| 18                | 1.10                       | 0.029     | 0.500                      | 97.32            | 45.48              | 0.90                    | 0.239     | 0.055                      | 73.42            | 6.08               |
| 24                | 1.10                       | 0.029     | 0.500                      | 97.32            | 45.48              | 0.90                    | 0.209     | 0.055                      | 76.80            | 6.08               |
| 30                | 1.10                       | 0.018     | 0.515                      | 98.33            | 46.82              | 0.90                    | 0.191     | 0.053                      | 78.83            | 5.86               |
| 36                | 1.10                       | 0.022     | 0.526                      | 97.99            | 47.83              | 0.90                    | 0.182     | 0.041                      | 79.73            | 4.50               |
| 48                | 1.10                       | 0.002     | 0.511                      | 99.80            | 46.49              | 0.90                    | 0.178     | 0.026                      | 80.18            | 2.93               |
| 54                | 1.10                       | 0.002     | 0.519                      | 99.80            | 47.16              | 0.90                    | 0.182     | 0.020                      | 79.73            | 2.25               |
| 60                | 1.10                       | 0.004     | 0.511                      | 99.67            | 46.49              | 0.90                    | 0.176     | 0.020                      | 80.41            | 2.25               |

**สภาวะที่ทดลอง:** กรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ในสารละลายป้อน, ความเข้มข้นของอะลิควอตซ์สาม  
สามหก 14 % โดยปริมาตร, ไทโอยูเรีย 0.07 โมลาร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริก 0.01  
โมลาร์, เวลาเก็บตัวอย่าง 120 นาที และ  $Q_f = Q_s$  คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

**ภาคผนวก ค**  
**ตัวอย่างการคำนวณ**

**ค-1 การคำนวณร้อยละการสกัดไอออนเมอร์คิวรีและอาร์เซนิก**

จากข้อมูลในภาคผนวก ข ในตารางที่ ข.1 ที่เวลา 105 นาที

ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรีที่เวลาเริ่มต้นคือ 1.1 ส่วนในล้านส่วน

ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรีขาออกคือ 0.0 ส่วนในล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนเมอร์คิวรี} &= (1.1-0)/1.1 \times 100 \\ &= 100 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกที่เวลาเริ่มต้นคือ 0.9 ส่วนในล้านส่วน

ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกขาออกคือ 0.202 ส่วนในล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนเมอร์คิวรี} &= (0.9-0.202)/0.9 \times 100 \\ &= 77.60 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

**ค-2 การคำนวณร้อยละการนำกลับของไอออนเมอร์คิวรีและอาร์เซนิก**

ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรีที่เวลาเริ่มต้นคือ 1.1 ส่วนในล้านส่วน

ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรีที่สายสารละลายนำกลับขาออกคือ 0.51 ส่วนในล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนเมอร์คิวรี} &= 0.51/1.1 \times 100 \\ &= 46.37 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกที่เวลาเริ่มต้นคือ 0.9 ส่วนในล้านส่วน

ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกที่สายสารละลายนำกลับขาออกคือ 0.028 ส่วนในล้านส่วน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนเมอร์คิวรี} &= 0.028/0.9 \times 100 \\ &= 3.10 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

ค-3 การคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant,  $K_{ex}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient,  $D$ )

1. การคำนวณค่าคงที่สมดุลของไอออนเมอร์คิวรี

$$K_{ex, Hg(II)} = \frac{[(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-}][Cl^-]^2}{[HgCl_4^{2-}][(R_3N^+CH_3)Cl^-]^2} \quad (ค-1)$$

การคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) เป็นค่าเฉพาะจุดที่สถานะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกที่ 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยค่าคงที่แต่ละตัวหาได้ดังต่อไปนี้

ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรีเริ่มต้นคือ 1.1 ส่วนในล้านส่วน (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
แปลงเป็นหน่วยโมลาร์ (โมลต่อลิตร) = 1.1/1000/200.7  
=  $5.48 \times 10^{-6}$  โมลาร์

ความเข้มข้นที่สมดุลของไอออนเมอร์คิวรีคือ 0.002 ส่วนในล้านส่วน (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
แปลงเป็นหน่วยโมลาร์ (โมลต่อลิตร) = 0.002/1000/200.7  
=  $9.97 \times 10^{-9}$  โมลาร์

ดังนั้น ความเข้มข้นของไอออนเมอร์คิวรีที่หายไปคือ =  $(5.48 \times 10^{-6}) - (9.97 \times 10^{-9})$   
=  $5.33 \times 10^{-6}$  โมลาร์

สารสกัดมีอัตราส่วนการทำปฏิกิริยากับไอออนเมอร์คิวรีในอัตราส่วน 2:1

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัดคือ = 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร  
=  $14 \times 10 \times 0.88/442$  โมลาร์  
= 0.279 โมลาร์

ดังนั้น สารสกัดถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา =  $2 \times 5.33 \times 10^{-6}$   
=  $1.07 \times 10^{-6}$  โมลาร์

ดังนั้น สารสกัดที่สมดุลจะมีปริมาณ =  $(0.279) - (1.07 \times 10^{-6})$   
= 0.278 โมลาร์

การคำนวณในด้านสารผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเริ่มต้นไม่มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงของไอออนเมอร์คิวรีจึงเท่ากับการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} \text{สารประกอบเชิงซ้อน } [(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-}] \text{ ที่สมดุล} &= 5.48 \times 10^{-6} \text{ โมลาร์} \\ \text{สารประกอบคลอไรด์ } [Cl^-] \text{ ที่สมดุล} &= 2 \times 5.48 \times 10^{-6} \\ &= 1.09 \times 10^{-5} \text{ โมลาร์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า ค่าคงที่สมดุล} &= [(1.09 \times 10^{-5})^2] \times [5.48 \times 10^{-6}] / ([0.278^2] \times [9.97 \times 10^{-9}]) \\ &= 8.46 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

## 2. การคำนวณค่าคงที่สมดุลของไอออนอาร์เซนิก

$$K_{ex,As(V)} = \frac{[R_3N^+CH_3H_2AsO_4^-][Cl^-]}{[H_2AsO_4^-][R_3N^+CH_3Cl^-]} \quad (\text{ค-2})$$

การคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนอาร์เซนิก(v) โดยค่าคงที่แต่ละตัวหาได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกเริ่มต้นคือ} & 0.9 \text{ ส่วนในล้านส่วน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \\ \text{แปลงเป็นหน่วยโมลาร์ (โมลต่อลิตร)} & = 0.9/1000/145.4 \\ & = 1.60 \times 10^{-6} \text{ โมลาร์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นที่สมดุลของอาร์เซนิกคือ} & 0.233 \text{ ส่วนในล้านส่วน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \\ \text{แปลงเป็นหน่วยโมลาร์ (โมลต่อลิตร)} & = 0.233/1000/145.4 \\ & = 1.60 \times 10^{-6} \text{ โมลาร์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกที่หายไปคือ} & = (6.18 \times 10^{-6}) - (1.60 \times 10^{-9}) \\ & = 4.59 \times 10^{-6} \text{ โมลาร์} \end{aligned}$$

สารสกัดมีอัตราส่วนการทำปฏิกิริยากับไอออนอาร์เซนิกในอัตราส่วน 1:1

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัดคือ} & = 14 \text{ เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร} \\ & = 14 \times 10 \times 0.88/442 \text{ โมลาร์} \\ & = 0.279 \text{ โมลาร์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น สารสกัดถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา} & = 1 \times 4.59 \times 10^{-6} \\ & = 4.59 \times 10^{-6} \text{ โมลาร์} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น สารสกัดที่สมดุลจะมีปริมาณ} & = (0.279) - (4.59 \times 10^{-6}) \\ & = 0.278 \text{ โมลาร์} \end{aligned}$$



การคำนวณในด้านสารผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเริ่มต้นไม่มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงของไอออนอาร์เซนิกจึงเท่ากับการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์

$$\text{สารประกอบเชิงซ้อน } [R_3N^+CH_3H_2SO_4^-] \text{ ที่สมดุล} = 4.59 \times 10^{-6} \text{ โมลาร์}$$

$$\text{สารประกอบคลอไรด์ } [Cl^-] \text{ ที่สมดุล} = 4.59 \times 10^{-6} \text{ โมลาร์}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า ค่าคงที่สมดุล} &= [4.59 \times 10^{-6}] \times [4.59 \times 10^{-6}] / ([0.278] \times [1.60 \times 10^{-6}]) \\ &= 4.71 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

### 3. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนเมอร์คิวรี

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคสารละลายป้อนตามสมการด้านล่างนี้

$$D_{aq}^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta V_A^{0.6}} \quad (\text{ค-3})$$

เมื่อ

$$M = 18 \quad (\text{กรัมต่อโมล})$$

$$\eta = 1 \quad (\text{เซนติพ้อย, cP})$$

$$T = 308 \quad (\text{เคลวิน})$$

$$V_A = 20.05 \quad (\text{ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล})$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าได้ } (D_{aq}^*) &= (7.4 \times 10^{-8}) \times (18)^{0.5} \times 308 / (1 \times (20.05)^{0.6}) \\ &= 1.6 \times 10^{-5} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนเมอร์คิวรีในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวตามสมการด้านล่างนี้

$$D_m^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta V_A^{0.6}} \quad (\text{ค-4})$$

เมื่อ

$$M = 170 \quad (\text{กรัมต่อโมล})$$

$$\eta = 1.95 \quad (\text{เซนติพ้อย, cP})$$

$$T = 308 \quad (\text{เคลวิน})$$

$$V_A = 20.05 \quad (\text{ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล})$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าได้ } (D_m^*) &= (7.4 \times 10^{-8}) \times (170)^{0.5} \times 308 / (1.95 \times (20.05)^{0.6}) \\ &= 2.52 \times 10^{-5} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

#### 4. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนอาร์เซนิก

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในวัฏภาคสารละลายป้อนตามสมการด้านล่างนี้

$$D_{aq}^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta V_A^{0.6}} \quad (\text{ค-3})$$

เมื่อ

$$M = 18 \quad (\text{กรัมต่อโมล})$$

$$\eta = 1 \quad (\text{เซนติพ้อย, cP})$$

$$T = 308 \quad (\text{เคลวิน})$$

$$V_A = 27.85 \quad (\text{ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล})$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าได้ } (D_{aq}^*) &= (7.4 \times 10^{-8}) \times (18)^{0.5} \times 308 / (1 \times (27.85)^{0.6}) \\ &= 1.31 \times 10^{-5} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนอาร์เซนิกในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวตามสมการด้านล่างนี้

$$D_m^* = \frac{7.4 \times 10^{-8} (M)^{0.5} T}{\eta V_A^{0.6}} \quad (\text{ค-4})$$

เมื่อ

$$M = 170 \quad (\text{กรัมต่อโมล})$$

$$\eta = 1.95 \quad (\text{เซนติพ้อย, cP})$$

$$T = 308 \quad (\text{เคลวิน})$$

$$V_A = 27.85 \quad (\text{ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล})$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าได้ } (D_m^*) &= (7.4 \times 10^{-8}) \times (170)^{0.5} \times 308 / (1.95 \times (27.85)^{0.6}) \\ &= 2.07 \times 10^{-5} \text{ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

#### ค-4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ, เยื่อแผ่น และชั้นเปลือกของไอออนเมอร์ คิวรีแสดงดังต่อไปนี้

##### 1. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ

$$k_t = 1.62 \frac{D}{2r_i} \left( \frac{4r_i^2 u_{tube}}{DL} \right)^{1/3} \quad (\text{ค-5})$$

เมื่อ

$$D = 1.60 \times 10^{-9} \quad (\text{ตารางเมตรต่อวินาที})$$

$$r_i = 0.000012 \quad (\text{เมตร})$$

$$U_{tube} = 100 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที} \\ = 100/60/1.4/10^{-4} = 1.2 \times 10^{-4} \quad (\text{เมตรต่อวินาที})$$

$$L = 0.15 \quad (\text{เมตร})$$

$$\text{แทนค่า} \quad k_t = 1.62 \times \frac{1.60 \times 10^{-9}}{2 \times 0.000012} \left( \frac{4 \times (0.000012)^2 \times 1.2 \times 10^{-4}}{1.60 \times 10^{-9} \times 0.15} \right)^{1/3} \\ = 3.34 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

##### 2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น

$$k_m = \frac{\varepsilon D_m}{\tau r_i \ln(r_o / r_i)} \quad (\text{ค-6})$$

เมื่อ

$$D_m = 2.52 \times 10^{-9} \quad (\text{ตารางเมตรต่อวินาที})$$

$$r_i = 0.00012 \quad (\text{เมตร})$$

$$r_o = 0.00015 \quad (\text{เมตร})$$

$$\varepsilon = 0.25$$

$$\tau = 2.6$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } k_m &= \frac{0.25(2.52 \times 10^{-9})}{2.6 \times 0.00012 \times \ln(0.00015 / 0.00012)} \\ &= 9.05 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

### 3. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก

$$k_o = \frac{0.245D}{4r_H} \left( \frac{4r_H u_{shell}}{\nu} \right)^{2/3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \quad (\text{ค-7})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} D &= 1.60 \times 10^{-9} && \text{(ตารางเมตรต่อวินาที)} \\ U_{shell} &= 75 && \text{มิลลิเมตรต่อวินาที} \\ &= 75/60/1.4/10^4 && = 8.93 \times 10^{-5} \text{ (เมตรต่อวินาที)} \\ \nu &= (0.001 \text{ kg/m.s}) / (1000 \text{ kg/m}^3) \\ &= 10^{-6} && \text{(ตารางเมตรต่อวินาที)} \\ r_H &= 5.96 \times 10^{-8} && \text{(เมตร)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } k_o &= \frac{0.245 \times (1.60 \times 10^{-9})}{4 \times (5.96 \times 10^{-8})} \left( \frac{4 \times (5.96 \times 10^{-8}) \times 8.93 \times 10^{-5}}{10^{-6}} \right)^{2/3} \left( \frac{10^{-6}}{1.60 \times 10^{-9}} \right)^{1/3} \\ &= 10.19 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ, เยื่อแผ่น และชั้นเปลือกของไอออนอาร์เซนิกแสดงดังต่อไปนี้

### 4. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นท่อ

$$k_t = 1.62 \frac{D}{2r_i} \left( \frac{4r_i^2 u_{tube}}{DL} \right)^{1/3} \quad (\text{ค-5})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} D &= 1.31 \times 10^{-9} && \text{(ตารางเมตรต่อวินาที)} \\ r_i &= 0.000012 && \text{(เมตร)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_{\text{tube}} &= 100 && \text{มิลลิลิตรต่อวินาที} \\
 &= 100/60/1.4/10^{-4} && = 1.2 \times 10^{-4} \quad (\text{เมตรต่อวินาที}) \\
 L &= 0.15 && (\text{เมตร})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{แทนค่า} \quad k_r &= 1.62 \times \frac{1.31 \times 10^{-9}}{2 \times 0.00012} \left( \frac{4 \times (0.00012)^2 \times 1.2 \times 10^{-4}}{1.31 \times 10^{-9} \times 0.15} \right)^{1/3} \\
 &= 2.92 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}
 \end{aligned}$$

### 5. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น

$$k_m = \frac{\varepsilon D_m}{\tau r_i \ln(r_o / r_i)} \quad (\text{ค-6})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 D_m &= 2.07 \times 10^{-9} && (\text{ตารางเมตรต่อวินาที}) \\
 r_i &= 0.00012 && (\text{เมตร}) \\
 r_o &= 0.00015 && (\text{เมตร}) \\
 \varepsilon &= 0.25 \\
 \tau &= 2.6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{แทนค่า} \quad k_m &= \frac{0.25 \times (2.07 \times 10^{-9})}{2.6 \times 0.00012 \times \ln(0.00015 / 0.00012)} \\
 &= 7.43 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}
 \end{aligned}$$

### 6. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก

$$k_o = \frac{0.245D}{4r_H} \left( \frac{4r_H u_{\text{shell}}}{\nu} \right)^{2/3} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{1/3} \quad (\text{ค-7})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 D &= 1.31 \times 10^{-9} && (\text{ตารางเมตรต่อวินาที}) \\
 U_{\text{shell}} &= 75 && \text{มิลลิลิตรต่อวินาที}
 \end{aligned}$$

$$= 75/60/1.4/10^4 = 8.93 \times 10^{-5} \text{ (เมตรต่อวินาที)}$$

$$\begin{aligned} \nu &= (0.001 \text{ kg/m.s}) / (1000 \text{ kg/m}^3) \\ &= 10^{-6} \quad \text{(ตารางเมตรต่อวินาที)} \end{aligned}$$

$$r_H = 5.96 \times 10^{-8} \quad \text{(เมตร)}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } k_o &= \frac{0.245 \times (1.31 \times 10^{-9})}{4 \times (5.96 \times 10^{-8})} \left( \frac{4 \times (5.96 \times 10^{-8}) \times 8.93 \times 10^{-5}}{10^{-6}} \right)^{2/3} \left( \frac{10^{-6}}{1.31 \times 10^{-9}} \right)^{1/3} \\ &= 8.93 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

### 7. การคำนวณรัศมีไฮดรอลิก

โดยการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางแบบไฮดรอลิก (hydraulic diameter) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$d_h = \frac{d_a^2 - d_i^2 - nd_o^2}{nd_o} \quad \text{(ค-8)}$$

เมื่อ

$$D_a = 0.022 \quad \text{(เมตร)}$$

$$D_i = 0.00024 \quad \text{(เมตร)}$$

$$D_o = 0.00030 \quad \text{(เมตร)}$$

$$N = 30000$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } d_h &= \frac{(0.022)^2 - (0.00024)^2 - ((30000) \times (0.0003)^2)}{(0.0003) \times (30000)} \\ &= 1.19 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } r_h = (1.19)/2 = 5.97 \times 10^{-8} \text{ เมตร}$$

### ค-5 การคำนวณอันดับการเกิดปฏิกิริยา

การคำนวณอันดับการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรีและอาร์เซนิกด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกสามารถคำนวณได้จากการพล็อตกราฟของความเข้มข้นที่สภาวะต่างๆกันกับเวลาโดย

1. ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นลบด้วยความเข้มข้นที่เวลาใดๆต่อเวลา

$(C_{A0} - C_A)$  vs time โดยหน่วยของค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับศูนย์คือ (mol/l.min)

2. ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง พล็อตกราฟความสัมพันธ์ลอการิทึมระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นหารด้วยความเข้มข้นที่เวลาใดๆต่อเวลา

$\ln(C_{A0}/C_A)$  vs time โดยหน่วยของค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งคือ ( $\text{min}^{-1}$ )

3. ปฏิกิริยาอันดับสอง พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผกผันของความเข้มข้นเริ่มต้นลบด้วยสัดส่วนผกผันของความเข้มข้นที่เวลาใดๆต่อเวลา

$(1/C_A) - (1/C_{A0})$  vs time โดยหน่วยของค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสองคือ (L mol/min)

ยกตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) ในรูปที่ 4.10 โดยความชันที่ได้จากกราฟคือค่าคงที่  $k_f'$  มีค่า  $0.1357 \text{ min}^{-1}$  และ  $k_{f1}'$  มีค่า  $0.0495 \text{ L/mol. min}$

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) สามารถคำนวณได้ดังนี้ จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) ในสมการที่ (2.4) สามารถเขียนในรูปย่อๆได้คือ



อัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate of reaction) คือ  $r = -k_f [C_A]^m [C_B]^n$

กำหนดให้  $[C_B] = n/m [C_A] = 2 [C_A]$

โดย n และ m คือค่าสัมประสิทธิ์จากปฏิกิริยาเคมี (n = 2 และ m = 1)

ดังนั้น  $r = -k_f (n/m) [C_A]^1 [C_A]^2$   
 $= -k_f' [C_A]^3$

อันดับของปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรีคือปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งคือ  $k_f = k_f' / (n/m)$   
 $= 0.1357/2$   
 $= 0.0679 \text{ min}^{-1}$

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสกัดอาร์เซนิก(V) สามารถคำนวณได้ดังนี้ จากปฏิกิริยาการสกัดอาร์เซนิก(V) ในสมการที่ (2.5) สามารถเขียนในรูปย่อๆได้คือ



อัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate of reaction) คือ  $r = -k_f [C_A]^m [C_B]^n$

กำหนดให้  $[C_B] = n/m [C_A] = [C_A]$

โดย  $n$  และ  $m$  คือค่าสัมประสิทธิ์จากปฏิกิริยาเคมี ( $n = 1$  และ  $m = 1$ )

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad r &= -k_f (n/m) [C_A]^1 [C_A]^1 \\ &= -k_f' [C_A]^2 \end{aligned}$$

อันดับของปฏิกิริยาการสกัดไอออนอาร์เซนิกคือปฏิกิริยาอันดับสอง

$$\begin{aligned} \text{ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองคือ } k_{f1} &= k_f' / (n/m) \\ &= 0.0495/1 \\ &= 0.0495 \text{ (L mol/min)} \end{aligned}$$

ค่าคงที่อันดับการเกิดปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี(II) และอาร์เซนิก(V) จะนำไปใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมต่อในหัวข้อถัดไป

#### ค-6 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับไอออนเมอร์คิวรีด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_E} = \frac{1}{k_{Hg,f}} + \frac{[Cl^-]_f}{k_f [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{oi}} + \frac{[Cl^-]_f^2}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_2} \cdot m \cdot K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} + \frac{[Cl^-]_f^2}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_2} \cdot o \cdot K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2} \quad (\text{ค-11})$$

ค่าในแต่ละพจน์ของสมการที่ (ค-11) .ในเทอมด้านขวาคือค่าความต้านทานการถ่ายเทมวล (mass transfer resistance) โดยเรียงลำดับจากความต้านทานการถ่ายเทมวลจากชั้นท่อ, ความต้านทานการถ่ายเทมวลจากปฏิกิริยา, ความต้านทานการถ่ายเทมวลเนื่องจากชั้นเยื่อแผ่นและความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นเปลือกของมอดูลที่หนึ่ง ซึ่งใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการสกัดไอออนเมอร์คิวรี โดยค่าความเข้มข้นของสารหาได้ที่ความเข้มข้นของสารสกัด 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรหาได้ดังต่อไปนี้



$$\begin{aligned}
\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นท่อ} &= 1/(3.34 \times 10^{-6}) \\
&= 2.99 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร} \\
\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลจากปฏิกิริยา} &= [0.278] / 0.0679 / [1.09 \times 10^{-5}] \\
&= 5.79 \times 10^{-4} \text{ วินาทีต่อเมตร} \\
\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น} &= [1.09 \times 10^{-5}]^2 / (9.05 \times 10^{-6}) / (8.46 \times 10^{-7}) / [0.278]^2 \\
&= 2.01 \times 10^2 \text{ วินาทีต่อเมตร} \\
\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก} &= [1.09 \times 10^{-5}]^2 / (10.2 \times 10^{-6}) / (8.46 \times 10^{-7}) / [0.278]^2 \\
&= 1.78 \times 10^2 \text{ วินาทีต่อเมตร} \\
\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลรวมในมอดูลที่หนึ่ง} &= (2.99 \times 10^5) + (5.79 \times 10^{-4}) + \\
&\quad (2.01 \times 10^2) + (1.78 \times 10^2) \\
&= 2.99 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร} \\
\text{ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (K<sub>F</sub>)} &= (1/2.99 \times 10^5) \\
&= 3.34 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}
\end{aligned}$$

สมการที่ (ค-12) แสดงค่าในเทอมด้านขวาคือค่าความต้านทานการถ่ายเทมวล (mass transfer resistance) โดยเรียงลำดับจากความต้านทานการถ่ายเทมวลจากชั้นท่อ, ความต้านทานการถ่ายเทมวลจากปฏิกิริยา, ความต้านทานการถ่ายเทมวลเนื่องจากชั้นเยื่อแผ่นและความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นท่อของมอดูลที่สอง ซึ่งใช้สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการนำกลับไอออนเมอร์คิวรี โดยค่าความเข้มข้นของสารหาได้ที่ความเข้มข้นของสารสกัด 14 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรหาค่าได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_S} = \frac{1}{k_{Hg,s}} + \frac{1}{k_f [NH_2CSNH_2]_s} + \frac{1}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-},m}} + \frac{K_{ex} [R_3N^+CH_3Cl]_{si}^2}{k_{(R_3N^+CH_3)_2HgCl_4^{2-},o} [NH_2CSNH_2]_s^2} \quad (\text{ค-12})$$

$$\begin{aligned}
\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นท่อ} &= 1/(3.28 \times 10^{-6}) \\
&= 3.04 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร} \\
\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลจากปฏิกิริยา} &= 1/ (0.0679) / (0.069) \\
&= 2.10 \times 10^2 \text{ วินาทีต่อเมตร} \\
\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น} &= 1/ (9.05 \times 10^{-6}) \\
&= 1.10 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร} \\
\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก} &= (8.46 \times 10^{-7}) \times [1.36 \times 10^{-6}]^2 / (10.2 \times 10^{-6}) / [0.069]^2 \\
&= 3.15 \times 10^{-11} \text{ วินาทีต่อเมตร}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลรวมในมอดูลที่หนึ่ง} &= (3.04 \times 10^5) + (2.10 \times 10^2) + \\ & (1.10 \times 10^5) + (3.15 \times 10^{-11}) \\ &= 4.15 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (K<sub>S</sub>)} &= (1/4.15 \times 10^5) \\ &= 2.41 \times 10^{-7} \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับไปไอออนอาร์เซนิกด้วยสารสกัดอะลิควอตซ์สามสามหกแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_E} = \frac{1}{k_{As,f}} + \frac{[Cl^-]_f}{k_{f1}[(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{oi}} + \frac{[Cl^-]_f}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-} \cdot m} K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi}^2 + \frac{[Cl^-]_f}{k_{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-} \cdot o} K_{ex} [(R_3N^+CH_3)Cl^-]_{fi} \quad (\text{ค-13})$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการสกัดไอออนอาร์เซนิกในมอดูลที่หนึ่งแสดงในสมการที่ (ค-13) ซึ่งพจน์ทางด้านขวาของสมการจะคล้ายกับสมการที่ (ค-11)

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นท่อ} &= 1/(2.93 \times 10^{-6}) \\ &= 3.41 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลจากปฏิกิริยา} &= [0.278] / 0.0495 / [4.58 \times 10^{-6}] \\ &= 3.3 \times 10^{-4} \text{ วินาทีต่อเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น} &= [4.58 \times 10^{-6}] / (7.43 \times 10^{-6}) / (4.71 \times 10^{-5}) / [0.278] \\ &= 4.69 \times 10^4 \text{ วินาทีต่อเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก} &= [4.58 \times 10^{-6}] / (8.93 \times 10^{-6}) / (4.71 \times 10^{-5}) / [0.278] \\ &= 3.91 \times 10^4 \text{ วินาทีต่อเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลรวมในมอดูลที่หนึ่ง} &= (3.41 \times 10^5) + (3.3 \times 10^{-4}) + \\ & (4.69 \times 10^4) + (3.91 \times 10^4) \\ &= 4.27 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (K<sub>E</sub>)} &= (1/4.27 \times 10^5) \\ &= 2.33 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

ในขณะที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของปฏิกิริยาการนำกลับของไอออนอาร์เซนิกใน  
มอดูลที่สองแสดงดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1}{k_{As,s}} + \frac{1}{k_{f1}[\text{NH}_2\text{CSNH}_2]_s} + \frac{1}{k_{\frac{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-}{.m}}}} + \frac{K_{ex}[\text{R}_3\text{N}^+\text{CH}_3\text{Cl}^-]_{si}}{k_{\frac{(R_3N^+CH_3)H_2AsO_4^-}{.o}}[\text{NH}_2\text{CSNH}_2]_s} \quad (\text{ค-14})$$

$$\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นท่อ} = 1/(2.27 \times 10^{-6})$$

$$= 3.41 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร}$$

$$\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลจากปฏิกิริยา} = 1/(0.0495)/(0.069)$$

$$= 2.88 \times 10^2 \text{ วินาทีต่อเมตร}$$

$$\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่น} = 1/(7.43 \times 10^{-6})$$

$$= 1.35 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร}$$

$$\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก} = (4.71 \times 10^{-5}) \times [4.53 \times 10^{-6}]/(8.93 \times 10^{-6})/[0.069]$$

$$= 3.41 \times 10^{-4} \text{ วินาทีต่อเมตร}$$

$$\text{ความต้านทานการถ่ายเทมวลรวมในมอดูลที่หนึ่ง} = (3.41 \times 10^5) + (2.88 \times 10^2) +$$

$$(1.35 \times 10^5) + (3.41 \times 10^{-4})$$

$$= 4.76 \times 10^5 \text{ วินาทีต่อเมตร}$$

$$\text{ดังนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (K<sub>s</sub>)} = (1/4.76 \times 10^5)$$

$$= 2.09 \times 10^{-6} \text{ เมตรต่อวินาที}$$

### ค-7 พลักซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัส

การหาอัตราการแพร่หรือปฏิกิริยาต่อการการถ่ายเทมวลของไอออนเมอร์คิวรีและอาร์เซนิกในระบบมอดูลเส้นใยกลวงแบบสัมผัสแสดงโดยค่าพารามิเตอร์ ( $\alpha$ ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแพร่ การคำนวณพารามิเตอร์สำหรับการสกัดไอออนเมอร์คิวรีสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{1/\varepsilon k}{h_m / D_m} \quad (\text{ค-13})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 25 && \text{เปอร์เซ็นต์} \\ k &= 0.1357 && (\text{นาที}^{-1}) \\ h_m &= 0.00006 && (\text{เมตร}) \\ D_m &= 3.65 \times 10^{-10} && (\text{ตารางเมตรต่อวินาที}) \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1/(0.25) \times 0.1357}{(0.00006) / 3.65 \times 10^{-10}} \\ &= 1.80 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการแพร่สำหรับการไอออนอาร์เซนิกคือ

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 25 && \text{เปอร์เซ็นต์} \\ k &= 0.0495 && (\text{ลิตรต่อโมลต่อนาที}) \\ h_m &= 0.00006 && (\text{เมตร}) \\ D_m &= 3.65 \times 10^{-10} && (\text{ตารางเมตรต่อวินาที}) \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1/(0.25) \times 0.0495}{(0.00006) / 3.65 \times 10^{-10}} \\ &= 4.90 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้าชื่อ นายดลภพ ศรีบุตดา เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม 2533 ที่โรงพยาบาลค่ายสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา อาศัยและเติบโตในบ้านเลขที่ 112 หมู่ 1 ตำบลตะโก อำเภอห้วยแถลง จังหวัดนครราชสีมา เป็นบุตรของนายมธุรส และนางรพีพรรณ ศรีบุตดา จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นเมื่อปี พ.ศ. 2548 ที่โรงเรียนห้วยแถลงพิทยาคม มาศึกษาต่อมัธยมปลายที่โรงเรียนบุญวัฒนาและจบการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2551 จากนั้นจึงได้เข้าเรียนต่อปริญญาตรี สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรและจบการศึกษาปริญญาตรีเมื่อปีการศึกษา 2554 ระหว่างศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้ไปฝึกงานที่โรงงานแอดวานซ์แพคเกจจิ้งในส่วนวางแผนการผลิต เป็นเวลา 2 เดือน เริ่มการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2555 โดยรับทุนโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) พ.ศ. 2556 ระดับปริญญาโท รหัส MSD56I0017 จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย