

การสกัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียของโรงงานแบตเตอรี่ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลว  
ที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

นายสุเมธ ขาวยา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

EXTRACTION OF LEAD ION FROM WASTEWATER OF BATTERY MANUFACTURING BY  
HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

Mr. Sumeth Khaoya

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสกัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียของโรงงานแบตเตอรี่  
ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

โดย

นายสุเมธ ขาวยา

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธารวัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

สุเมธ ขาวยา : การสกัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียของโรงงานแบตเตอรี่ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่  
 พึงด้วยเส้นใยกลวง (EXTRACTION OF LEAD ION FROM WASTEWATER OF BATTERY  
 MANUFACTURING BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE)  
 อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อูรา ปานเจริญ, 75 หน้า

โรงงานแบตเตอรี่ที่เป็นกรณีศึกษาใช้การตกตะกอนด้วยสารเคมีในการบำบัดตะกั่วออกจากน้ำเสียให้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม คือ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เนื่องจากปริมาณน้ำเสียต่อวันมีปริมาณมากจึงบำบัดตะกั่วให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งไม่ทัน เพราะใช้เวลาตกตะกอนนาน โรงงานแก้ปัญหาโดยนำน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารเคมีแล้วระดับหนึ่ง แต่ยังมีตะกั่วเหลือประมาณ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตรกลับเข้าใช้ในกระบวนการล้างแผ่นตะกั่ว ดังนั้นเพื่อลดโอกาสและความเสี่ยงที่ผู้ปฏิบัติงานต้องสัมผัสความอันตรายของสารตะกั่ว งานวิจัยนี้จึงเสนอการสกัดตะกั่วในน้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงานก่อนการตกตะกอนด้วยสารเคมีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พึงด้วยเส้นใยกลวง ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่พบในน้ำเสียซึ่งใช้เป็นสารละลายป้อนเท่ากับ 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเบื้องต้นเลือกสารสกัดที่เหมาะสมจากวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ตัวแปรอื่นที่ศึกษา ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ กำหนดการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับแบบไหลวนและสวนทาง จากผลการทดลองได้ร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนตะกั่ว 99 และ 97 เมื่อใช้สารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3.0 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ  $\text{HNO}_3$  0.25 โมลาร์ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ในเวลา 90 นาที พบว่าปริมาณไอออนตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียเท่ากับ 0.045 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อน ( $k_p$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของตะกั่วกับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ที่คำนวณได้มีค่า  $4.980 \times 10^{-4}$  และ  $1.089 \times 10^{-5}$  เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ กล่าวได้ว่าขั้นตอนการถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนที่ควบคุมการถ่ายเทมวล และหากทราบความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วในน้ำเสียจะสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายเวลาการสกัดที่เหลือความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในน้ำเสียอยู่ภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี .....

ลายมือชื่อ นิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี .....

ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา ..... 2555 .....

ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

# # 5171516721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: EXTRACTION / LEAD ION / WASTEWATER / BATTERY MANUFACTURING /  
HOLLOW FIBER / SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

SUMETH KHAOYA: EXTRACTION OF LEAD ION FROM WASTEWATER OF BATTERY MANUFACTURING BY HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. URA PANCHAROEN, Ph. D., 75 pp.

In common practice, a battery-manufacturing plant in this case study manages lead ions in its wastewater by chemical precipitation. Due to a large amount of wastewater per day, it is by far not in time by the chemical precipitation to reduce lead ions from the total volume below the nation permissible quality of 0.2 mg/l. To handle this restriction, the wastewater after chemical precipitation, which contains lead ions about 1-2 mg/l, is reused in the process. It is of great concern to avoid lead exposure in the workplace, we proposed the application of hollow fiber supported liquid membrane. The wastewater before chemical precipitation containing lead ions of 7.5 mg/l was used as feed solution. A suitable extractant was selected by solvent extraction. The pH of feed solution, concentration of the extractant, types and concentration of stripping solutions, types of organic solvents and flow rates of feed and stripping solutions were investigated. Feed and stripping solutions were circulated counter-currently. By using 0.12 M D2EHPA in kerosene, pH of feed solution of 3.0, 0.25 M HNO<sub>3</sub> and equal flow rates of feed and stripping solutions of 100 ml/min, the highest percentages of extraction and stripping of 99% and 97% were achieved at 90 minutes. The residual amount of lead ions was found to be 0.045 mg/l. In addition, it is found that mass transfer coefficient of lead ions in aqueous feed ( $k_f$ ) and that of the complex species of lead ions and the extractant in liquid membrane phase ( $k_m$ ) were  $4.980 \times 10^{-4}$  and  $1.089 \times 10^{-5}$  cm/s, respectively indicating that the diffusion of the complex species via liquid membrane was the mass transfer controlling step. Finally, at known initial concentration, the separation time with respect to the concentration of lead ions to meet industrial wastewater regulation can be predicted by the mathematical model.

Department : CHEMICAL ENGINEERING Student's Signature .....

Field of Study : CHEMICAL ENGINEERING Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012 Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างจากหลายฝ่าย ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกล่าวขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาตลอดจนคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิจัย ขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อภินันท์ สุทธิธรรมาวัช ประธานกรรมการสอบ โครงร่างวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม และรองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ กรรมการสอบ โครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำชี้แนะซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณองค์กรสำคัญที่สนับสนุนงานวิจัย นั่นคือ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย “โครงการทุนวิจัยมหัศจรรย์ สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย (ทุน สกว. – อุตสาหกรรม) ประจำปี 2553” ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนหลักที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอบคุณ บริษัท น้ำมันปิโตรเลียมไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแบตเตอรี่รวมถึงทุนสนับสนุนการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณธีรสิทธิ์ อังสุรารา คุณวิรัตน์ กัณนิกา คุณจริญญา มะลา คุณปรียาภรณ์ สมพงษ์ รวมถึงพี่และน้องแผนกประกันคุณภาพ บริษัท น้ำมันปิโตรเลียมไทย จำกัด ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ เพื่อนและพี่ในกลุ่มวิจัย Mass Separation ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบุคคลที่ไม่ได้กล่าวถึงที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาตลอดระยะเวลาการทำวิจัย สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน สนับสนุนการศึกษา และให้กำลังใจจนประสบความสำเร็จในวันนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 กระบวนการผลิตเบคเตอรี่ยีสและการบำบัดตะกั่วของโรงงานที่เป็นกรณีศึกษา.....	4
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดไอออนตะกั่ว.....	7
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	10
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	11
1.6 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	11
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	13
2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane extraction).....	13
2.2 ประเภทของเยื่อแผ่นเหลว.....	13
2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่มีตัวรองรับ.....	14
2.2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกวาน.....	14
2.2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	14
2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ.....	15
2.2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (flat sheet supported liquid membrane).....	15
2.2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (spiral- type supported liquid membrane).....	16
2.2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane).....	17
2.3 ชนิดของสารสกัด.....	18
2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant).....	18

	หน้า
2.3.2 สารสกัดชนิดเบส (basic extractant).....	19
2.3.3 สารสกัดชนิดกลาง (neutral extractant).....	19
2.4 กลไกการถ่ายเทมวล.....	20
2.4.1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ .....	20
2.4.2 การถ่ายเทมวลแบบใช้สารสกัดหรือตัวพา.....	20
2.4.2.1 การถ่ายเทมวลแบบง่าย (simple facilitated transport).....	21
2.4.2.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (coupled facilitated transport).....	21
ก. การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบสวนทาง .....	22
ข. การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบทางเดียวกัน.....	23
2.5 กลไกการสกัดไอออนตะกั่ว .....	23
2.6 ทฤษฎีการคำนวณและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทมวล ของไอออนตะกั่ว .....	25
2.6.1 ร้อยละการสกัด (percentage of extraction) และร้อยละการนำกลับ (percentage of stripping) .....	25
2.6.2 การคำนวณค่าคงที่สมดุล (extraction equilibrium constant, $K_{ex}$ ) ของปฏิกิริยาการสกัด ไอออนตะกั่ว.....	26
2.6.3 การคำนวณสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient, D) ของปฏิกิริยาการสกัด ไอออนตะกั่ว.....	26
2.6.4 การคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient, P) ของปฏิกิริยาการสกัด ไอออนตะกั่ว.....	26
2.6.5 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) ของปฏิกิริยาการสกัด ไอออนตะกั่ว.....	27
2.6.6 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและการทำนายเวลาการสกัด ไอออนตะกั่ว .....	30
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง .....	35
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.3 วิธีการทดลอง.....	37
3.3.1 การเตรียมสารละลายป้อน.....	37
3.3.2 ศึกษาชนิดของสารสกัดด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย .....	37
3.3.3 ศึกษาชนิดของตัวทำละลายด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	38



3.3.4	ศึกษาศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	38
3.3.5	ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	39
3.3.6	ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง .....	40
3.3.7	ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัดและการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	40
3.3.8	ศึกษาผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	40
3.3.9	สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่ว.....	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....		42
4.1	ชนิดของสารสกัดต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	42
4.2	ผลของตัวทำละลายต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	43
4.3	ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเส้นใยกลวง .....	44
4.4	ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	45
4.5	ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง .....	46
4.6	ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัดและการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	46
4.7	การประยุกต์ผลการทดลองกับทฤษฎี.....	47
4.7.1	ผลการคำนวณค่าคงที่สมดุล (extraction equilibrium constant, $K_{ex}$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว .....	47
4.7.2	ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient, D) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว .....	48
4.7.3	ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน(permeability coefficient, P).....	48
4.7.4	ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) .....	49

4.7.5 เปรียบเทียบผลคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลทดลอง	
และทำนายเวลาการสกัด ไอออนตะกั่ว .....	50
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	53
รายการอ้างอิง .....	54
ภาคผนวก .....	58
ภาคผนวก ก สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ .....	59
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ .....	61
ภาคผนวก ค สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ .....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	75

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 สมบัติของตะกั่ว .....	2
ตารางที่ 1.2 ร้อยละการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรม.....	3
ตารางที่ 1.3 อาชีพที่เสี่ยงต่อการได้รับสารตะกั่ว.....	3
ตารางที่ 1.4 ระดับของตะกั่วในเลือดและปัสสาวะที่ปกติและที่เป็นพิษ.....	4
ตารางที่ 1.5 การเปรียบเทียบมอดูลเยื่อแผ่นต่างๆ.....	10
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	35
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของมอดูลเส้นใยกลวง.....	37
ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ในช่วงความเข้มข้นของ D2EHPA 0.003-0.120 โมลาร์.....	48
ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของการสกัดไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้นของ D2EHPA 0.003-0.120 โมลาร์.....	50
ตารางที่ 4.3 ผลคำนวณเวลาในการสกัดของไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงของมอดูลที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ.....	51
ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการศึกษาชนิดของสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	61
ตารางที่ ข-2 ข้อมูลการศึกษาชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	61
ตารางที่ ข-3 ข้อมูลจากการศึกษาผลความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	62
ตารางที่ ข-4 ข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	63
ตารางที่ ข-5 ข้อมูลจากการศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	64
ตารางที่ ข-6 ข้อมูลจากการศึกษาผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	65
ตารางที่ ข-7 ข้อมูลจากการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใย.....	66
ตารางที่ ข-8 ข้อมูลจากการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายนำกลับกรดในตริกต่อการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	66

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลเปรียบเทียบผลความเข้มข้นของไอออนตะกั่วจากการคำนวณ โดยแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์กับผลการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของ D2EHPA 0.120 โมลาร์.....	67
---	----

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	แผนผังกระบวนการผลิตเบตเตอรี.....	5
รูปที่ 1.2	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในบ่อบำบัดน้ำเสียก่อนการตกตะกอนทางเคมี.....	6
รูปที่ 1.3	ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของ โรงงานผลิตเบตเตอรีด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี.....	7
รูปที่ 2.1	เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกวาน.....	14
รูปที่ 2.2	เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	15
รูปที่ 2.3	เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน.....	15
รูปที่ 2.4	เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน.....	16
รูปที่ 2.5	มอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง.....	17
รูปที่ 2.6	ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับแบบสวนทางกันในเส้นใยกลางหนึ่งเส้น.....	17
รูปที่ 2.7	โครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างสารสกัดชนิดกรด.....	18
รูปที่ 2.8	โครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างสารสกัดชนิดเบส.....	19
รูปที่ 2.9	โครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างสารสกัดชนิดกลาง.....	20
รูปที่ 2.10	การถ่ายเทมวลโดยการแพร่.....	20
รูปที่ 2.11	ทิศทางการถ่ายเทมวลของ ไอออนที่ต้องการแยกในการถ่ายเทมวลแบบง่าย.....	21
รูปที่ 2.12	ทิศทางการถ่ายเทมวลของ ไอออนที่ต้องการแยกและ ไอออนไฮโดรเจนในการถ่ายเทมวลแบบควบคุมแบบสวนทาง.....	22
รูปที่ 2.13	ทิศทางการถ่ายเทมวลของ ไอออนที่ต้องการแยกและ ไอออนไฮโดรเจนในการถ่ายเทมวลแบบควบคุมแบบทางเดียวกัน.....	23
รูปที่ 2.14	กลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคุมของ ไอออนตะกั่วและ ไอออนไฮโดรเจนผ่านเยื่อแผ่นเหลว.....	24
รูปที่ 2.15	การถ่ายเทมวลของ ไอออนตะกั่วผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง.....	28
รูปที่ 3.1	โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดที่ใช้ในการทดลอง.....	35
รูปที่ 3.2	เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS.....	36
รูปที่ 3.3	รูปแบบปฏิบัติการแบบไหลวน และสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทาง.....	39
รูปที่ 4.1	ร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	43
รูปที่ 4.2	ผลของตัวทำละลายกับร้อยละการสกัด ไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	43

รูปที่ 4.3	ผลของตัวทำละลายกับร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง.....	44
รูปที่ 4.4	ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดไอออนตะกั่ว.....	45
รูปที่ 4.5	ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโครซีนกับร้อยละการสกัดไอออนตะกั่ว.....	45
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับไอออนตะกั่วกับชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ.....	46
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนตะกั่วกับอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ.....	47
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[Pb^{2+}][\overline{(HR)_2}]^2$ กับ $[\overline{PbR_2(HR)_2}][H^+]^2$ .....	48
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_r \ln(C_f/C_{f0})$ กับ เวลา .....	49
รูปที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/P$ กับ $[H^+]^2 / [\overline{(HR)_2}]^2$ .....	50
รูปที่ 4.11	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนหลังการสกัดจากผลคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ความเข้มข้นของ D2EHPA 0.120 โมลาร์.....	51

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	พื้นที่การถ่ายเทมวล
$C_f$	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เวลาใดๆ
$C_{f,0}$	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อน
$C_{f,in}$	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนขาเข้า
$C_{f,out}$	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนขาออก
$C_{s,out}$	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายนำกลับขาออก
D	สัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient)
% E	ร้อยละการสกัด
$H^+$	ไอออนไฮโดรเจน
$\overline{[(HR)_2]}$	ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
$\overline{[(HR)_2]}_0$	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารสกัด D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
$J_i$	ฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อน
$J_m$	ฟลักซ์เชิงโมลของสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
$J_s$	ฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายนำกลับ
$k_1$	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
$k_2$	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาย้อนกลับของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
$k_3$	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ
$k_4$	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ
$K_{ex}$	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา (equilibrium constant)
$k_i$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
$k_m$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว
$k_s$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ
L	ความยาวของเส้นใยกลาง

$M^{n+}$	ไอออนโลหะที่มีประจุ n บวก
N	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล
P	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient)
$[Pb^{2+}]_f$	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวิทยาการละลายป้อน
$[Pb^{2+}]_{i,f}$	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาการละลายป้อนกับวิทยาการเยื่อแผ่นเหลว
$[Pb^{2+}]_{i,s}$	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาการเยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาการละลายนำกลับ
$[Pb^{2+}]_s$	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวิทยาการละลายนำกลับ
$[PbR_2(HR)_2]_{i,f}$	ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาการละลายป้อนกับวิทยาการเยื่อแผ่นเหลว
$[PbR_2(HR)_2]_{i,s}$	ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาการเยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาการละลายนำกลับ
$P_m$	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านในวิทยาการเยื่อแผ่นเหลว
$Q_f$	อัตราการไหลของสารละลายป้อน
$r_i$	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง
$r_{lm}$	รัศมี log-mean ของเส้นใยกลวง
$r_o$	รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง
% S	ร้อยละการนำกลับ
t	เวลา
$V_f$	ปริมาตรของสารละลายป้อน

**อักษรกรีก**

$\epsilon$	ความพรุนของเส้นใยกลวง
$\pi$	3.1416

**ตัวห้อย**

f	วิทยาการละลายป้อน
i, f	ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาการละลายป้อนกับวิทยาการเยื่อแผ่นเหลว
m	วิทยาการเยื่อแผ่นเหลว
s	วิทยาการละลายนำกลับ
i, s	ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาการเยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาการละลายนำกลับ



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องสร้างความก้าวหน้าให้กับอุตสาหกรรมต่างๆ การเติบโตของภาคอุตสาหกรรมส่งผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรที่เป็นวัตถุดิบในการผลิต และต่อสิ่งแวดล้อมถ้าการบำบัดของเสียที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊สจากกระบวนการผลิตไม่ได้ตามมาตรฐาน เป็นที่ทราบดีว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมแปรรูปและชุบโลหะ ฯลฯ มักมีไอออนของโลหะหนักละลายปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียและไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ ดังนั้น ไอออนของโลหะหนักเหล่านี้จึงสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมและเข้าสู่สิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์ และมนุษย์ ทำให้เกิดโรคต่างๆ ทั้งที่แสดงอาการเฉียบพลันและเรื้อรัง ดังนั้นเพื่อความสมดุลของการเจริญเติบโตทางภาคอุตสาหกรรม เศรษฐกิจ และการดูแลสิ่งแวดล้อมเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีของประชากร ควบคู่กับความยั่งยืนในการใช้ทรัพยากรที่มีจำกัดและหมดไปได้ มนุษย์จึงต้องใช้ความรู้จากหลายศาสตร์ในการหาเทคโนโลยีและวิธีการต่างๆ เพื่อการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า เช่น การใช้ซ้ำ การนำกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการบำบัดและกำจัดของเสียอันตรายอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

ตะกั่วเป็นโลหะหนัก สีเทาขาว สีจะหมองลงเมื่อถูกอากาศขึ้น ตะกั่วบริสุทธิ์มีลักษณะอ่อนจนใช้เล็บขูดได้ สามารถทำให้โค้งงอและตีเป็นแผ่นได้ มีความเหนียวและลื่น เมื่อจิดลงบนกระดาษจะติดเป็นสีเทา มีความคงทนต่อการกัดกร่อนตามธรรมชาติและการกัดกร่อนของกรดได้ดี ตะกั่วบริสุทธิ์ที่เกิดตามธรรมชาติมีอยู่น้อยมาก โดยทั่วไปมักพบตะกั่วอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น สารประกอบซัลไฟด์ คาร์บอเนต ซัลเฟต และซิลิเกต เป็นต้น มนุษย์นำตะกั่วมาใช้ประโยชน์ 9,000 ปีมาแล้ว (Clooney, 2012 : online) จากหลักฐานทางโบราณคดีเมื่อ 4,000 ปีที่แล้ว พบเหรียญกษาปณ์ที่ทำจากตะกั่วสำหรับการซื้อขายที่ประเทศจีน ชาวกรีกและโรมันโบราณใช้ตะกั่วทำท่อน้ำมากกว่า 2,000 ปี นอกจากนี้ยังพบเหมืองแร่เงินและตะกั่วในแหล่งอารยธรรมโบราณทั่วโลก เช่น ประเทศจีน อินเดีย อิหร่าน และประเทศในแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียน ปัจจุบันมนุษย์ใช้ตะกั่วเป็นอันดับ 5 ของโลหะทั้งหมด ในประเทศไทยก็มีหลักฐานทางประวัติศาสตร์ที่บ่งชี้การใช้ประโยชน์จากตะกั่วมาเป็นพันปี พบหลักฐานการผลิตแร่ตะกั่วในหลายพื้นที่ของอำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เช่น หลุมขุดแร่เผดที่เรียกว่า “หลุมสองท่อ” อุโมงค์ทำเหมืองขนาดเล็ก เศษเตาหลอมที่ใช้สกัดโลหะเงินที่ปนอยู่ในสินแร่ตะกั่ว โลหะตะกั่วรูปกรวยที่เรียกว่า “ตะกั่วนม” และเบ้าหลอมตะกั่วที่ทำด้วยหินและดินเผา เป็นต้น (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, 2554 : ออนไลน์) ประเทศผู้ผลิตตะกั่วที่สำคัญในปัจจุบันได้แก่ สหรัฐอเมริกา รัสเซีย ออสเตรเลีย แคนาดา ส่วนในประเทศไทยพบได้บ้างบริเวณจังหวัดกาญจนบุรี (กุลธิดา ถาวรกิจการ และคณะ, 2544 : ออนไลน์) สมบัติทั่วไปของตะกั่วแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สมบัติของตะกั่ว (สารานุกรมเสรี, 2555 : ออนไลน์)

สมบัติทั่วไป	
ชื่อและสัญลักษณ์	ตะกั่ว (Lead), Pb
เลขอะตอม	82
มวลอะตอม	207.2
ลักษณะ	สีขาวอมน้ำเงิน
ความหนาแน่น	10.66 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	600.61 เคลวิน (327.46 องศาเซลเซียส)
จุดเดือด	2,022 เคลวิน (1,749 องศาเซลเซียส)

ในบรรดาโลหะหนักที่เป็นพิษมนุษย์ใช้ประโยชน์จากตะกั่วมากที่สุด มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ และอุตสาหกรรมสี ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากตะกั่ว เช่น

1. ใช้ทำแผ่นเก็บประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่รถยนต์ เพราะตะกั่วไม่ทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถันที่อุณหภูมิปกติ และตะกั่วมีราคาถูกเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ
2. ใช้เป็นรงควัตถุในอุตสาหกรรมสี
3. ใช้ตะกั่วแผ่นและตะกั่วแท่งสำหรับการก่อสร้างต่าง ๆ การก่อสร้างฐานราก และใช้ทำเปลือกหุ้มสายเคเบิลขนาดใหญ่ที่ฝังอยู่ใต้ดิน เนื่องจากตะกั่วมีความคงทนต่อการกัดกร่อนตามธรรมชาติไม่ว่าจะอยู่ใต้ดิน บนดิน หรือน้ำทะเล
4. ใช้ทำจากกัมมันตภาพรังสีในกิจกรรมต่างๆ เช่น ใช้ในทางการแพทย์ด้านรังสีวิทยา เพราะตะกั่วสามารถสกัดกั้นกัมมันตรังสีได้ดี
5. ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้เป็นอิเล็กโทรดเพื่อจ่ายประจุให้กับอิเล็กโทรไลต์ ในอุตสาหกรรมการชุบแผ่นวงจร
6. ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น ลวดบัดกรี หัวกระสุนปืน สารเคมีสำหรับผลิตพลาสติกชนิดพีวีซี งานหล่อโลหะ และโลหะผสมต่าง ๆ

จากประโยชน์ที่กล่าวแล้วนั้น จำแนกสัดส่วนของการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ร้อยละการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรม (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, 2554 : ออนไลน์)

อุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่ว	ร้อยละการใช้งาน
การผลิตแบตเตอรี่	63
การผลิตสารเคมีสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกพีวีซี	14
การผลิตตะกั่วแท่งและตะกั่วแผ่นสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง	8
การผลิตสายเคเบิล	5
การผลิตอาวุธและกระสุนปืน	3
อื่นๆ	7

โอกาสที่บุคคลทั่วไปจะได้รับตะกั่วเข้าร่างกาย เช่น ทางปากโดยรับประทานอาหารและน้ำดื่มที่ปนเปื้อนตะกั่ว ทางการหายใจ และการดูดซึมทางผิวหนัง ส่วนใหญ่เกิดกับผู้ที่มิอาชีพเกี่ยวข้องกับตะกั่ว ตะกั่วสะสมในร่างกายที่ละน้อย อาการเป็นพิษเรื้อรังจากตะกั่วจะค่อยๆ แสดงออกภายหลังที่ได้รับสารตะกั่ว หรืออาจนานเป็นปีๆ จึงจะแสดงอาการ ตะกั่วที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิตจะทำให้เม็ดเลือดแดงน้อยกว่าปกติ ทำให้เกิดอาการโลหิตจาง (anemia) และมีผลให้ปริมาณเหล็กในน้ำเหลืองเพิ่มขึ้นผิดปกติ ตะกั่วบางส่วนจะไปสะสมในกระดูกแทนที่แคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) ซึ่งจำเป็นในการสร้างกระดูกและฟัน ทำให้มีอาการปวดตามข้อ กระดูกผุ และหักง่าย ถ้าสะสมที่รากฟันจะทำให้เห็นสีม่วง หรือสีดำบริเวณเหงือก บางครั้งเรียกว่า เส้นตะกั่ว (lead line) และทำให้ฟันหลุดได้ง่าย ตะกั่วสามารถเกาะกับกระดูกในร่างกายได้นาน และยังสะสมในระบบประสาท สมอง ตับ ไจมัน และระบบน้ำเหลือง อาการพิษเรื้อรังที่พบบ่อย คือ อาการของระบบย่อยอาหาร เช่น ปวดท้อง เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก น้ำหนักลด อาการพิษทางประสาทและสมอง ทำให้ทรงตัวไม่อยู่ เกิดอาการประสาทหลอน ซึม ไม่รู้สึกตัว มือและเท้าตก ชัก เป็นอัมพาต สลบ และอาจตายได้ อาชีพที่มีความเสี่ยงต่อการได้รับสารตะกั่ว และระดับปกติและระดับที่เป็นพิษของตะกั่วแสดงในตารางที่ 1.3 และตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.3 อาชีพที่เสี่ยงต่อการได้รับสารตะกั่ว (กุลธิดา ถาวรกิจการ และคณะ, 2544 : ออนไลน์)

อาชีพที่มีโอกาสได้รับตะกั่วสูง	อาชีพที่มีโอกาสได้รับตะกั่วปานกลาง
ทำงานในโรงงานแบตเตอรี่	ทำงานในเมืองตะกั่ว
หลอมตะกั่ว	ทำสายไฟ
หลอมโลหะที่ทำสีกันสนิม	ประกอบเครื่องเสียงวิทยุโทรทัศน์
ตัดโลหะจากเรือเก่า	ซ่อมรถยนต์
ทำงานในโรงงานสีที่มีตะกั่วผสมอยู่	ประกอบรถยนต์
ทำงานในโรงงานผลิตพลาสติกชนิดพีวีซี	ทำเครื่องปั้นดินเผา เครื่องแก้วที่ใช้สีที่มีตะกั่วผสม

ตารางที่ 1.4 ระดับของตะกั่วในเลือดและปัสสาวะที่ปกติและที่เป็นพิษ (กุลธิดา ถาวรกิจการ และคณะ, 2544 : ออนไลน์)

ระดับตะกั่ว	ระดับปกติ	ระดับเริ่มเป็นพิษ (ยังไม่แสดงอาการ ทางคลินิก)	ระดับเป็นพิษ (แสดงอาการทาง คลินิก)
ระดับตะกั่วในเลือด (ไมโครกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)	10-20	40	70
ระดับตะกั่วในปัสสาวะ (ไมโครกรัมต่อลิตร) ตรวจพบ coproporphyrin (หน่วยต่อมิลลิกรัม)  delta-ALA (มิลลิกรัมต่อปริมาณ ปัสสาวะ 1 วัน)	10-70  80 /ปริมาณ ปัสสาวะ ใน 1 วัน	100  200 /ปริมาณปัสสาวะ 1 ลิตร	200-400  600 /ปริมาณปัสสาวะ 1 ลิตร
	2-3	5-10	10-20

อาการพิษเฉียบพลันจากสารตะกั่ว ส่วนมากเกิดจากการรับประทาน ดังนั้นแพทย์จะต้องล้างท้องโดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟต 3 เปอร์เซ็นต์ หรือให้ผงถ่าน (activated charcoal) เพื่อป้องกันการดูดซึม แล้วรักษาตามอาการ

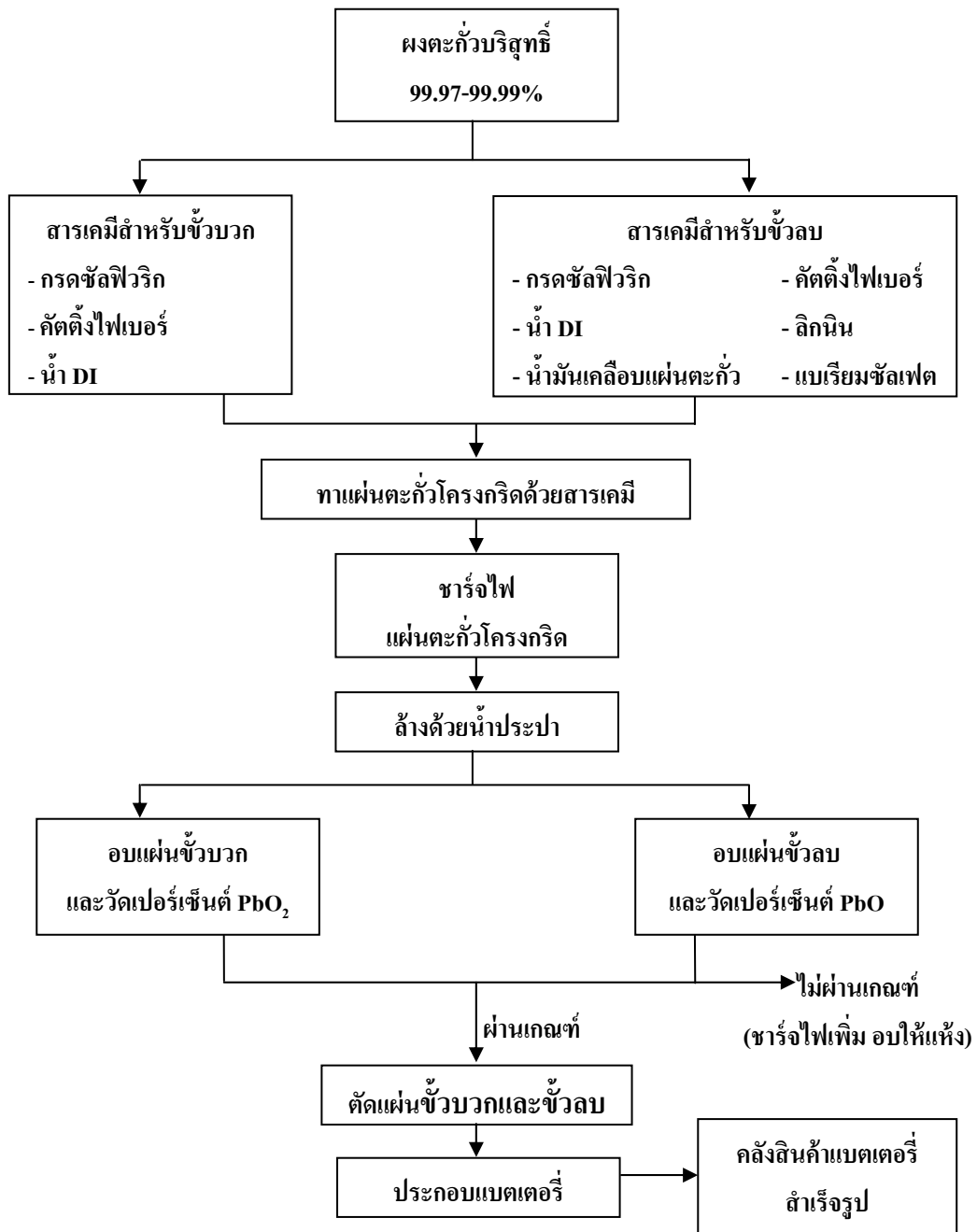
อาการพิษเรื้อรังเริ่มแรกของพิษตะกั่ว สังเกตค่อนข้างยาก เช่น อาการปวดหัว กระสับกระส่าย จึงมักใช้ผลวิเคราะห์เลือด และปัสสาวะทางเคมีบ่งชี้ ร่วมกับสังเกตอาการทางคลินิก การรักษาทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ แพทย์ใช้หลักการเดียวกันคือพยายามเร่งการขับตะกั่วออกจากร่างกาย โดยให้สารเคมี(chelating agent) เกาะ แล้วดึงตะกั่วออกทางปัสสาวะ ส่วนมากใช้แคลเซียมโซเดียมเอดีเตด( $\text{CaNa}_2\text{EDETATE}$ ) ฉีดเข้าเส้นเลือดดำ 1 - 2 กรัมต่อวัน

#### 1.2 กระบวนการผลิตแบตเตอรี่และการบำบัดตะกั่วของโรงงานที่เป็นกรณีศึกษา

กระบวนการผลิตแบตเตอรี่ของโรงงานที่เป็นกรณีศึกษาแสดงดังรูปที่ 1.1

1. บดตะกั่วบริสุทธิ์ 99.97-99.99 เปอร์เซ็นต์ พร้อมกับเติมแก๊สออกซิเจนเพื่อสร้างตะกั่วออกไซด์
2. แบ่งตะกั่วออกไซด์ออก 2 ส่วน ส่วนแรกผสมกับกรดซัลฟิวริก คัดตั้งไฟเบอร์ และ น้ำ DI ที่เป็นสารเคมีสำหรับขั้วบวก ส่วนที่สองผสมกับกรดซัลฟิวริก คัดตั้งไฟเบอร์ น้ำ DI ลิกนิน น้ำมันเคลือบแผ่นตะกั่ว และแบเรียมซัลเฟตที่เป็นสารเคมีสำหรับขั้วลบ
3. ทาแผ่นตะกั่วโครงกริดด้วยตะกั่วออกไซด์ในข้อ 2 เพื่อใช้เป็นแผ่นขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่

4. ชาร์จไฟแผ่นตะกั่วโครงกริดในสารละลายกรดซัลฟิวริก เพื่อกระตุ้นความเป็นขั้วบวกและขั้วลบ
5. ล้างสารเคมีส่วนเกินออกจากแผ่นขั้วบวกและขั้วลบด้วยน้ำประปา น้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนนี้จะถูกปล่อยไปยังบ่อบำบัด
6. อบแผ่นขั้วบวกและขั้วลบให้แห้งด้วยสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นวัดเปอร์เซ็นต์  $PbO_2$  ในแผ่นขั้วบวกและ  $PbO$  ในแผ่นขั้วลบ ให้อยู่ในระดับที่ฝ่ายคุณภาพกำหนด ถ้าไม่ผ่านต้องชาร์จไฟเพิ่มและอบให้แห้งอีกครั้ง
7. ตัดแผ่นขั้วบวกและขั้วลบให้ได้ขนาดตามต้องการ และส่งไปขั้นตอนประกอบแบตเตอรี่



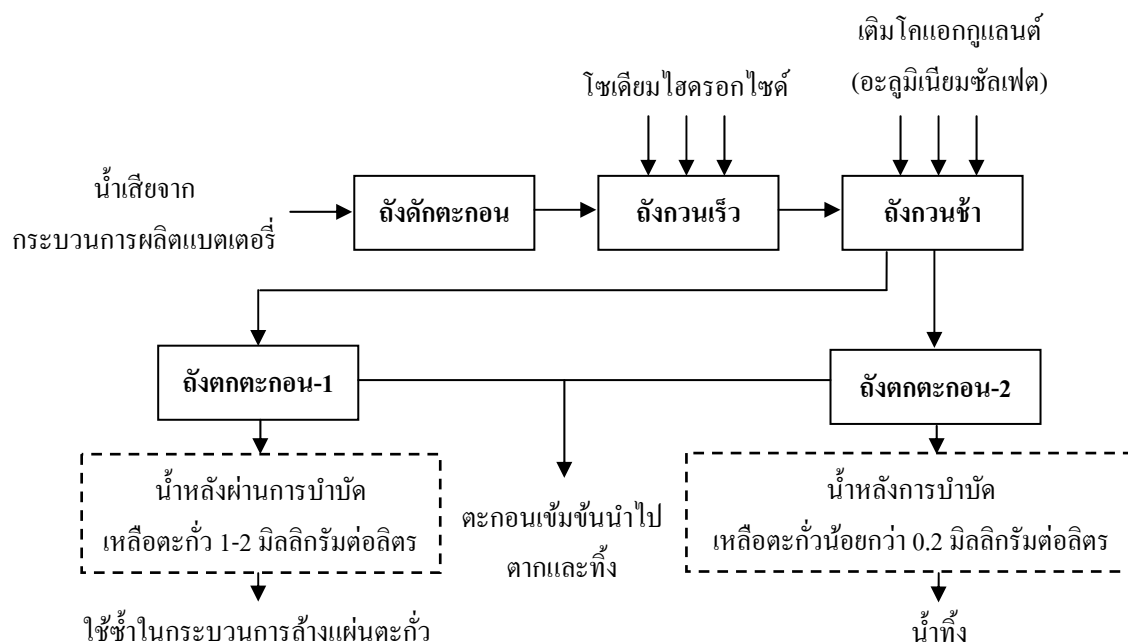
รูปที่ 1.1 แผนผังกระบวนการผลิตแบตเตอรี่

ตะกั่วในบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานเกิดจากขั้นตอนการล้างแผ่นตะกั่ว จากผลวิเคราะห์ในรูปที่ 1.2 พบความเข้มข้นประมาณ 7.0-8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีบำบัดตะกั่วที่โรงงานใช้ในปัจจุบันคือการตกตะกอนทางเคมี ดังรูปที่ 1.3 ปฏิบัติการเคมีของการตกตะกอนแสดงดังสมการที่ 1.1 และเนื่องจากมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมของกระทรวงอุตสาหกรรม กำหนดความเข้มข้นของไอออนตะกั่วต้องไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นถ้าต้องการให้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง จะใช้เวลาตกตะกอนนาน และไม่สามารถบำบัดน้ำได้ทัน เพราะมีน้ำเสียประมาณ 150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โรงงานแก้ปัญหาโดยนำน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนแล้วระดับหนึ่งที่ยังมีตะกั่วเหลืออยู่ประมาณ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร กลับเข้าใช้ในกระบวนการผลิตที่ขั้นตอนการล้างแผ่นตะกั่ว ทำให้มีความเสี่ยงที่พนักงานจะสัมผัสความอันตรายของสารตะกั่วเข้าร่างกาย เพื่อลดความเสี่ยงนี้ โรงงานพยายามหาวิธีบำบัดน้ำเสียให้ทัน โดยที่ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียต้องได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

 <b>บริษัท คอนซัลแตนท์ เซ็นเตอร์ แอนด์ แล็บ จำกัด</b> <b>CONSULTANT CENTER AND LAB. CORP., LTD.</b> 5, 7 ซอยประชาอุทิศ 97/1 ถนนประชาอุทิศ แขวงทุ่งครุ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 5, 7 SOI PRACHAUTHIT 97/1, PRACHAUTHIT ROAD, THUNGKRU, BANGKOK 10140 www.labcccl.pantown.com E-mail : labcccl@hotmail.com TEL. & FAX. 0-2840-7013-5						
ใบรายงานผลการวิเคราะห์						
Analysis No.- 0568/11					หน้า 1/1	
ชื่อลูกค้า	: บริษัท น้ำมันปิโตรเลียมไทย จำกัด					
ที่อยู่	: 1 อาคารทีพีแอนด์ ที ชั้น 9-10 ซ.วิภาวดีรังสิต 19 แขวงจตุจักร เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900					
สถานที่รับตัวอย่าง	: นำจากโรงงานแบบเคอร์รี่ (TPS) ช.สมุทรปราการ					
วันที่รับ	: 13 ก.ค. 2554	วันที่รับตัวอย่าง	: 13 ก.ค. 2554			
เวลาที่รับ	: 10.45 น.	วันที่วิเคราะห์	: 13-18 ก.ค. 2554			
ผู้รับตัวอย่าง	: ลูกค้า	วันที่รายงานผล	: 18 ก.ค. 2554			
วิธีรับ	: ชั่งเก็บ	เลขที่ใบรายงานผล	: TPS-01/2011			
พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์ *	ผลการวิเคราะห์			
			Sample 1 ๒๘	Sample 2	Sample 3	
ลักษณะตัวอย่าง			ใส	ใส	เหลืองอ่อน, ค่อนข้างใส	
1. Lead	mg/L as Pb	AAS	7.27			
หมายเหตุ : * Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA AWWA WEF, 21 <sup>st</sup> edition 2005.						

รูปที่ 1.2 ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในบ่อบำบัดน้ำเสียก่อนการตกตะกอนทางเคมี





รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

### 1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดไอออนตะกั่ว

Rosell et al., 1998 ศึกษาการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของสารละลายนำกลับกรดไนตริก และกรดไฮเปอร์คลอริก ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่ศึกษาเท่ากับ 0.1-3.0 โมลาร์ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5-4.5 และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากับ 0.28-1.5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าสารละลายกรดไนตริกและไฮเปอร์คลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3.5 และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากับ 0.54 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถนำกลับไอออนตะกั่วได้ร้อยละ 67 และ 44

Gumi et al., 2000 ศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วและแคดเมียมด้วย activated composite membrane (ACM) โดยใช้ D2EHPA เป็นสารสกัดในตัวทำละลายในเคโรซีน และสารละลายกรดไนตริก เป็นสารละลายนำกลับ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 1.5-4.5 ความเข้มข้นของสารสกัดเท่ากับ 0.25-1.20 โมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.1-2.0 โมลาร์ พบว่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่เหมาะสมเท่ากับ 4.0 ความเข้มข้นของสารสกัด 0.50 โมลาร์ และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเท่ากับ 2.0 โมลาร์ ให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนตะกั่วและแคดเมียมสูงสุด เท่ากับ 0.120 และ 0.020 เซนติเมตรต่อนาที

Aguilar et al., 2001 ศึกษาการสกัดไอออนตะกั่วและไอออนแคดเมียมโดยใช้สารสกัด Kelex 100 ความเข้มข้น 0.134 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 3.0 โมลาร์ เป็นสารละลายนำกลับ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3.0 ทดลองเปรียบเทียบสองระบบ คือ ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (flat-sheet supported liquid membrane, SLM) และระบบเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ (polymer inclusion membrane, PIM) โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน จากผลการทดลองพบว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนตะกั่วและไอออนแคดเมียมสูงกว่าระบบเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ มีค่าเท่ากับ  $9.7 \times 10^{-5}$  และ  $8.2 \times 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และยังพบว่าไอออนตะกั่วเริ่มตกตะกอนเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนสูงกว่าหรือเท่ากับ 7.0

German et al., 2004 ศึกษาการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ (polymer inclusion membranes, PIM) โดยใช้ D2EHPA เป็นสารสกัดในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม และสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 1.5 โมลาร์ เป็นสารละลายนำกลับ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.0-5.0 ความเข้มข้นของสารสกัด 1.0-5.0 โมลาร์ พบว่าที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 2-3 และความเข้มข้นของสารสกัดเท่ากับ 2.5 โมลาร์ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนตะกั่วสูงสุด เท่ากับ  $3.0 \times 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที อัตราการถ่ายเทมวล เท่ากับ  $3.5 \times 10^{-6}$  โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที หลังจากทดลองสกัด 5 รอบ ต่อเนื่องใน 3 ชั่วโมง อัตราการถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วลดลงร้อยละ 30 แสดงว่าเยื่อแผ่นมีความเสถียรสามารถใช้งานได้ 3 ชั่วโมง

Belkhoche et al., 2006 ศึกษาการสกัดไอออนโลหะที่มีประจุสองบวกและสามบวกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน สารละลายป้อนคือน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสังกะสี ประกอบด้วยไอออนตะกั่ว (II) โคบอลต์ (II) นิกเกิล (II) ทองแดง (II) แคดเมียม (II) และเหล็ก (III) แทนด้วยสัญลักษณ์ M(II) และ M(III) ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของสารสกัดจาก 2 กลุ่ม คือ สารสกัดเชิงพาณิชย์ ได้แก่ di(2-ethylhexyl)phosphoric acid (D2EHPA), tri-octylphosphine oxide (TOPO) และสารสกัดที่สังเคราะห์ขึ้นเอง ได้แก่ di[p (1,1,3,3-tetramethylbutyl) phenyl] phosphoric acid (DOPPA), 1,12-(4,9 dioxatrisdecanyl) diphosphonic acid (DOTDDA), methylenediphosphonic acid (MDPA), 1,13-diamino-4,7,10-trioxatridecanyltetra-methylene phosphonic acid (DATOMPA) สารสกัดทั้งสองกลุ่มใช้เคโรซีนเป็นตัวทำละลาย และใช้สารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ เป็นสารละลายนำกลับ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3.0 จากผลการทดลองพบว่า D2EHPA สามารถสกัดไอออนตะกั่ว (II) ร้อยละ 91 เมื่อเติม TOPO ลงใน D2EHPA สามารถสกัดทองแดง (II) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 9 เป็นร้อยละ 57 DOTDDA สามารถสกัดทองแดง (II) ออกจากน้ำเสียได้ร้อยละ 100 ส่วน DOPPA สามารถสกัดโคบอลต์ (II) ได้ร้อยละ 100 เช่นกัน ในขณะที่ MPDA สกัดแคดเมียม (II) ตะกั่ว (II) และนิกเกิล (II) ได้ร้อยละ 83, 69 และ 63 ตามลำดับ DATOMPA สกัดเหล็ก (III) ได้ร้อยละ 72



Kozłowska et al., 2007 ศึกษาการสกัดไอออนตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี ด้วยเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ (polymer inclusion membrane, PIM) ความเข้มข้นของสารละลายป้อนเท่ากับ 0.1 โมลาร์ ทดลองใช้สารสกัด 4 ชนิด ได้แก่ D2EHPA, Cyanex<sup>®</sup> 272, Cyanex<sup>®</sup> 301 และ Cyanex<sup>®</sup> 302 ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน และใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ เป็นสารละลายนำกลับ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3.0 จากผลการทดลองพบว่า Cyanex<sup>®</sup> 302 มีประสิทธิภาพในการสกัดสูงสุด และมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี เท่ากับ  $11.0 \times 10^{-6}$ ,  $5.83 \times 10^{-6}$  และ  $2.48 \times 10^{-6}$  ตามลำดับ

Chandrashekhar and Mansing, 2007 ศึกษาการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) จากสารละลาย sodium succinate โดยใช้ 2-octylaminopyridine เป็นสารสกัด และกรดแอสติก ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ เป็นสารละลายนำกลับ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 1.0-12.0 ความเข้มข้นของสารสกัด 0.01-0.048 โมลาร์ และชนิดของตัวทำละลาย ได้แก่ เบนซีน ไชลีน โทลูอิน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ คลอโรฟอร์ม เมทิลไอโซบิวทิลคีโตน บิวทานอล เอมีลอะซิเตท เคโรซีน เอมีลแอลกอฮอล์ และไดคลอโรมีเทน จากผลการทดลองพบว่าที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 10.0 และความเข้มข้นของสารสกัด 0.024 โมลาร์ ร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 100 เมื่อใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย และเท่ากับ 66 และ 52 เมื่อใช้ไชลีนและโทลูอิน ตามลำดับ

Shilimkar and Anuse, 2007 ศึกษาการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้ n-octylaniline เป็นสารสกัด และสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ เป็นสารละลายนำกลับ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 1.0-10.0 ความเข้มข้นของสารสกัด ร้อยละ 0.01-10 โดยปริมาตร ชนิดของตัวทำละลาย ได้แก่ เบนซีน ไนโตรเบนซีน โทลูอิน ไชลีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ บิวทานอล คลอโรฟอร์ม เมทิลไอโซบิวทิลคีโตน และเอมีลแอลกอฮอล์ จากผลการทดลองพบว่าที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 8.0-8.3 ความเข้มข้นของ n-octylaniline ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโทลูอินให้ร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วเท่ากับ 100 และเท่ากับ 92 เมื่อใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเยื่อแผ่นสามารถสกัดไอออนตะกั่วได้ดี อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้เยื่อแผ่น โดยเฉพาะเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับ ต้องเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของตัวรองรับแต่ละชนิด ความสะดวกในการใช้งาน การดูแลรักษา ราคาของมอดูลเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการบำบัด ในสารละลายป้อน ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน รวมทั้งสิ่งปนเปื้อนในสารละลายป้อนที่ทำให้เกิดฟาวลิง (fouling) ตารางที่ 1.5 เปรียบเทียบมอดูลเยื่อแผ่นต่างๆ

ตารางที่ 1.5 การเปรียบเทียบมอดูลเยื่อแผ่นต่างๆ (รัตนา จิรรัตนานนท์, 2543: 54)

ข้อมูล	แผ่นแบน	แผ่นม้วน	ท่อ	เส้นใยกลวง
พื้นที่ / ปริมาตร ( $m^2/m^3$ )	100-400	300-1,000	150-300	9,000-30,000
ฟลักซ์ ( $l/m^2h$ )	10-50	10-50	10-50	0.5-5.0
ความกว้างของช่องสารละลาย (mm)	~5	~1.5	>10-13	0.1-0.5
การเปลี่ยนเยื่อแผ่น	เป็นแผ่น	ทิ้งชุด	เป็นท่อ	ทิ้งชุด
การเกิดฟาวลิง	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ	สูง
การทำความสะอาด	ปานกลาง	ปานกลาง	ง่าย	ยาก
ราคา	ปานกลาง	ถูก	แพง	ถูกมาก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงสามารถใช้แยกไอออนโลหะต่างๆ ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแยกตะกั่วที่มีความเข้มข้น 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากน้ำเสียในบ่อบำบัดของกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ ด้วยเหตุผลที่เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงสามารถแยกไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำมาก มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง มีสมบัติในการเลือกผ่าน ในกรณีที่ต้องการนำกลับไอออนนั้น สามารถนำกลับได้พร้อมกับการแยกในขั้นตอนเดียว (simultaneous extraction and recovery) นอกจากนี้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีราคาถูก ใช้พลังงานน้อย ต้นทุนการดำเนินการต่ำ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่ำเนื่องจากมีส่วนเคลื่อนที่จำนวนน้อย ถึงแม้สารสกัดและตัวทำละลายที่ใช้จะมีราคาสูง แต่ปริมาณที่ใช้จะน้อย ดังนั้นในเชิงเศรษฐศาสตร์ถือว่าคุ้มค่า (ประกร รามกุล, 2544)

#### 1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.4.1 เพื่อศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.4.2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการสกัดและนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

- ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัด
- ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ
- ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์
- ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน
- อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

1.4.3 สร้างและทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับผลการทดลอง และใช้แบบจำลองทำนายเวลาที่ต้องใช้ในการสกัดไอออนตะกั่วให้เหลือความเข้มข้นที่ต้องการ เมื่อทราบความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วในน้ำเสีย

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.5.1 ทดสอบชนิดของสารสกัด ได้แก่ D2EHPA และ Cyanex<sup>®</sup> 923 และชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ เกลโรซีน ไซลีน และโทลูอิน ในการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเพื่อเลือกสารสกัดและตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับศึกษาการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.5.2 ศึกษาการสกัดไอออนตะกั่วในน้ำเสียของกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงให้ได้ความเข้มข้นต่ำกว่าข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร) กำหนดรูปแบบปฏิบัติการแบบไหลวน และลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบสวนทาง ตัวแปรที่ศึกษาดังนี้
- ความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน 1.0-5.0
  - ความเข้มข้นของสารสกัดที่เลือกจากการสกัดด้วยตัวทำละลาย 0.003-0.120 โมลาร์
  - ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ เกลโรซีน ไซลีน และโทลูอิน (ทดสอบผลการสกัดเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย)
  - ชนิดของสารละลายนำกลับ ได้แก่ กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก ที่ความเข้มข้น 0.1-2.0 โมลาร์
  - อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100-400 มิลลิลิตรต่อนาที
- 1.5.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่ว และทดสอบความน่าเชื่อถือกับผลการทดลอง เพื่อใช้ทำนายเวลาในการสกัดไอออนตะกั่วในน้ำเสียที่ความเข้มข้นไอออนตะกั่วเริ่มต้นต่างๆ ให้เหลือความเข้มข้นของไอออนตะกั่วอยู่ภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

## 1.6 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

- 1.6.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีต่างๆ และด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.6.2 ทดลองเพื่อหาชนิดของสารสกัด และชนิดของตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย
- 1.6.3 ทดลองเพื่อหาความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.6.4 ทดลองเพื่อหาความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.6.5 ทดลองเพื่อหาชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่เหมาะสมต่อการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

- 1.6.6 ทดลองเพื่อหาอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
- 1.6.7 ทดลองชนิดของตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เพื่อทดสอบผลการสกัดเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย
- 1.6.8 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่ว และทดสอบความน่าเชื่อถือกับผลการทดลอง
- 1.6.9 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### 1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1.7.1 ทราบภาวะที่เหมาะสมของการสกัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
- 1.7.2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายเวลาที่ต้องใช้ในการสกัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้นตามข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม เมื่อทราบความเข้มข้นเริ่มต้น
- 1.7.3 สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้แยกไอออนชนิดอื่น

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction)

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นการแยกตัวถูกละลายหรือองค์ประกอบที่ละลายได้ออกจากสารละลายด้วยสารสกัด (ซึ่งละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์) ที่เติมเข้าไปเพื่อทำให้เกิดเฟสที่แตกต่างจากเฟสขององค์ประกอบที่ต้องการแยก การแยกจะเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายออกมาในตัวทำละลาย ในขณะที่องค์ประกอบอื่นๆ ยังคงอยู่ในเฟสเริ่มต้น

#### 2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane extraction)

การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวใช้หลักการของการสกัดด้วยตัวทำละลาย คือ องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งส่วนใหญ่ละลายอยู่ในสารละลายน้ำจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดที่ละลายอยู่ในสารละลายอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนละลายในสารละลายอินทรีย์ และถูกนำกลับด้วยการทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับ การสกัดและการนำกลับจะเกิดอย่างต่อเนื่อง

การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย 3 วัฏภาค ได้แก่

1. วัฏภาคสารละลายป้อน (feed phase) ซึ่งมีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่
2. วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) เป็นวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ประกอบด้วยสารสกัดที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์
3. วัฏภาคสารละลายนำกลับ (stripping phase) มีสารละลายนำกลับ (stripping solution) ทำหน้าที่นำกลับ (recovery หรือ stripping) องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนจากวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

วัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับจะไม่รวมกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

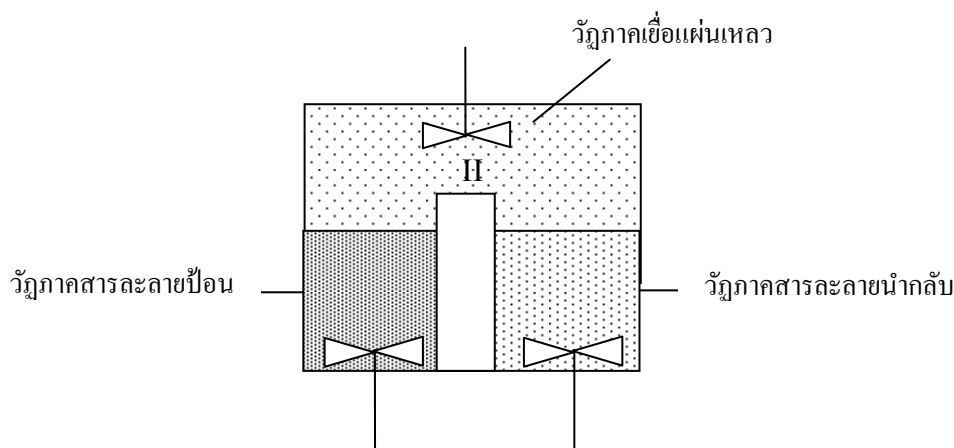
#### 2.2 ประเภทของเยื่อแผ่นเหลว

เยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่มีตัวรองรับ (unsupported liquid membrane) เช่น เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน (bulk liquid membrane) และเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (emulsion liquid membrane, ELM) เป็นต้น และเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับ (supported liquid membrane, SLM) ซึ่งมีตัวรองรับแบบต่างๆ เช่น ชนิดแผ่นแบน (flat sheet) ชนิดแผ่นม้วน (spiral wound) ชนิดท่อ (tubular) และชนิดเส้นใยกลวง (hollow fiber) เป็นต้น

## 2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่มีตัวรองรับ

### 2.2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน

เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววนเตรียมได้โดยบรรจุสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในอุปกรณ์ และมีแผ่นกั้นไม่ให้วัฏภาคทั้งสองรวมตัวกัน แล้วบรรจุเยื่อแผ่นเหลวที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าและไม่รวมกับสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับลงในอุปกรณ์เพื่อกั้นระหว่างสองวัฏภาค การถ่ายเทมวลขององค์ประกอบที่ต้องการจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ และในที่สุดองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากวัฏภาคสารละลายป้อนจะละลายเข้าไปในวัฏภาคสารละลายนำกลับ ข้อจำกัดของกระบวนการนี้อยู่ที่อัตราการถ่ายเทมวลที่ค่อนข้างต่ำและต้องใช้เยื่อแผ่นเหลวในปริมาณมาก รูปที่ 2.1 แสดงระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน

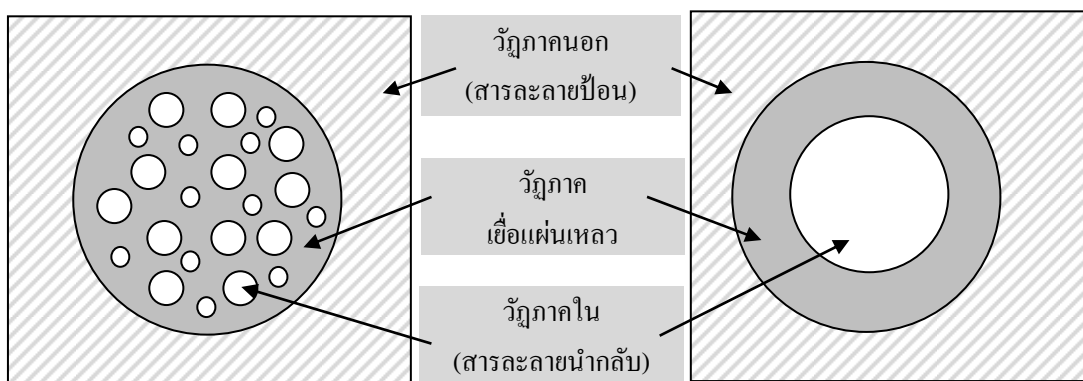


รูปที่ 2.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน (Marr et al., 1982)

### 2.2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันประกอบด้วยสารละลายป้อนที่ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ซึ่งอยู่ชั้นนอก เยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (dispersion phase) และสารละลายนำกลับที่เป็นอิมัลชันอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว ดังรูปที่ 2.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของวัฏภาคน้ำในวัฏภาคน้ำมัน (water in oil (w/o) emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ และเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของวัฏภาคน้ำมันในวัฏภาคน้ำ (oil in water (o/w) emulsion) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน กลไกการถ่ายเทมวลเริ่มจากการทำปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากวัฏภาคสารละลายป้อนกับสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งจะแพร่ไปทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับได้ องค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายนำกลับ

เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเตรียมได้โดยผสมสารละลายนำกลับกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งต้องไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำมาปั่นจนเพื่อให้สารละลายนำกลับแตกเป็นอิมัลชันขนาดเล็ก ปกติจะเติมสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความเสถียรให้กับเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงเติมเยื่อแผ่นเหลวที่มีอิมัลชันของสารละลายนำกลับลงในสารละลายป้อน เกิดการเรียงวัฏภาค 3 ชั้น จากด้านนอกไปด้านในดังนี้ วัฏภาคสารละลายป้อน วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และวัฏภาคสารละลายนำกลับ ตามลำดับ ในที่สุดองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากวัฏภาคสารละลายป้อนจะเข้าไปอยู่ในวัฏภาคสารละลายนำกลับ จากนั้นแยกสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่มีองค์ประกอบที่ต้องการละลายอยู่ออกจากเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันตามลำดับ



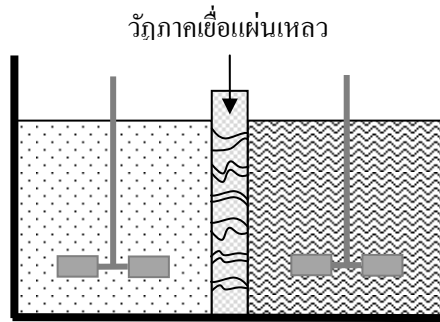
รูปที่ 2.2 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (วีรวัฒน์ ปีทวิงศา, 2546: 12)

## 2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ

### 2.2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน

#### (flat sheet supported liquid membrane)

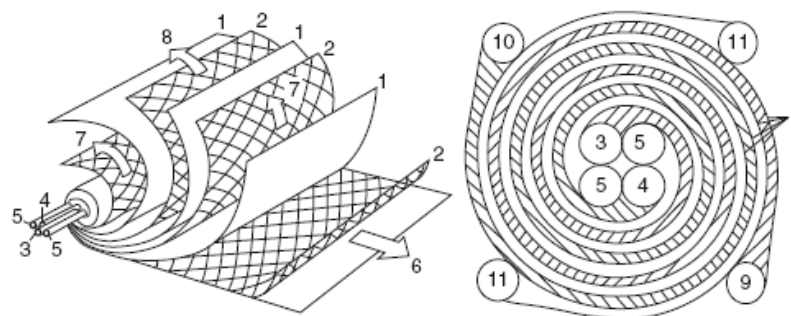
เยื่อแผ่นที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนมีความเหมาะสมสำหรับใช้ศึกษากลไกการถ่ายเทมวล เนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจเพราะไม่มีการเคลื่อนที่ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ องค์ประกอบที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อนสามารถถ่ายเทมวลผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับได้ ขณะที่สารสกัดยังคงถูกตรึงไว้ในรูพรุนของตัวรองรับ เยื่อแผ่นเหลวนิพนธ์นี้มีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่การถ่ายเทมวลน้อย ระบบเยื่อแผ่นที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน แสดงดังรูปที่ 2.3



ภูมิภาคสารละลายป้อน      ภูมิภาคสารละลายนำกลับ  
**รูปที่ 2.3** เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Bukhari, 2007: 4)

**2.2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (spiral-type supported liquid membrane)**

ลักษณะของตัวรองรับแบบแผ่นม้วนแสดงดังรูปที่ 2.4 ส่วนใหญ่ทำจากฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำ และแผ่นตาข่ายพอลิเอสเตอร์ม้วนรอบท่อนำเข้าสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ เมื่อนำมาประกอบเป็นมอดูล ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของจะถูกผนึกด้วยตัวประสานอีพอกซี (epoxy) สารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้วจะไหลผ่านชั้นของแผ่นม้วนไปที่ท่อรวม (collection pipe) เพื่อส่งออกจากมอดูล ส่วนสารละลายนำกลับที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะไหลออกทางท่อทางออก กระบวนการนี้มีจุดเด่นคือมอดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน แต่มีความดันตกคร่อม (pressure drop) ค่อนข้างสูง



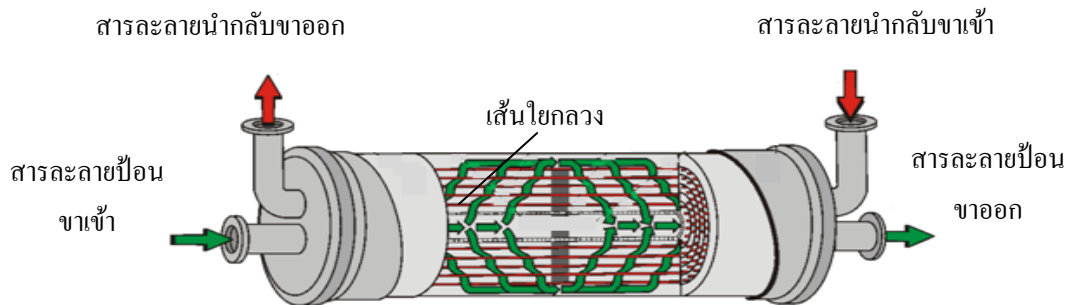
**รูปที่ 2.4** เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (Kislik, 2010: 249)

- หมายเลข 1 เยื่อแผ่นเหลวชนิดมีรูพรุนแบบไม่ชอบน้ำ      หมายเลข 2 ช่องว่างตาข่าย (mesh spacer)
- หมายเลข 3 และ 9 ท่อของสารละลายป้อนขาเข้าและขาออก ตามลำดับ
- หมายเลข 4 และ 10 ท่อของสารละลายนำกลับขาเข้าและขาออก ตามลำดับ
- หมายเลข 5 และ 11 ท่อของสารละลายอินทรีย์ขาเข้าและขาออก ตามลำดับ
- หมายเลข 6 ชั้นของสารละลายป้อน      หมายเลข 7 ชั้นของสารละลายอินทรีย์
- หมายเลข 8 ชั้นของสารละลายนำกลับ

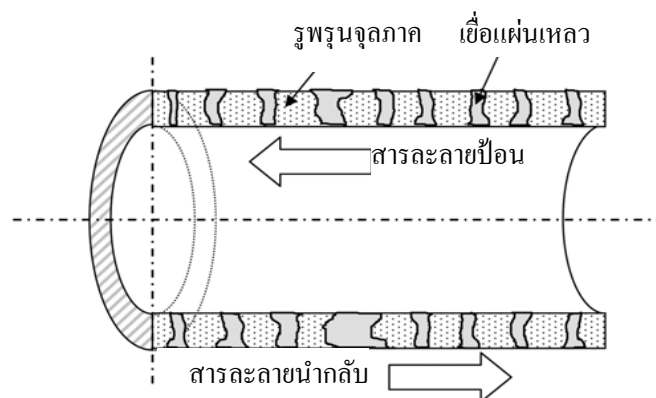


### 2.2.2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเหมาะสมในการใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงจำนวนมากถูกจัดเรียงในแนวขนานในมอดูลรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของมอดูลด้วยเรซิน (resin) สารสกัดที่ละลายในสารละลายอินทรีย์จะอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวซึ่งฝังอยู่ภายในรูพรุนของเส้นใยกลวง ทิศทางการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับอาจเป็นแบบทางเดียวกันหรือสวนทางกัน ส่วนใหญ่งานที่ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง นิยมให้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบสวนทางกัน ดังรูปที่ 2.5 เนื่องจากมีความแตกต่างของความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการในวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับ (concentration gradient) สูงกว่าการไหลแบบไปทางเดียวกัน ทำให้มีการถ่ายเทมวลสูงกว่า รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในเส้นใยกลวงหนึ่งเส้น



รูปที่ 2.5 มอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Gabelman and Hwang, 1999: 64)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับแบบสวนทางกันในเส้นใยกลวงหนึ่งเส้น (Prapasawat et al., 2008)

## 2.3 ชนิดของสารสกัด

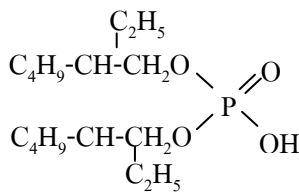
สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการแยกแผ่นเหลวต้องละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด ดังนี้

### 2.3.1 สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant)

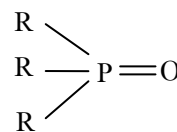
สารสกัดกลุ่มนี้แบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท คือ สารสกัดชนิดกรด (acidic acid) และสารสกัดชนิดคีเลต (chelate extractant) สารสกัดชนิดกรดประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น  $\text{COOH}$ ,  $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$  และ  $-\text{SO}_3\text{H}$  ไอออนโลหะหรือไอออนเชิงซ้อนของโลหะที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีผลรวมของประจุเป็นศูนย์และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ปฏิกิริยาการสกัดไอออนโลหะแสดงดังสมการที่ (2.1) รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างสารสกัดชนิดกรดที่ใช้สกัดไอออนโลหะ



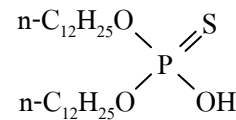
โดยที่  $\text{M}^{n+}$  คือ ไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อน  
 $\overline{\text{HR}}$  คือ สารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว  
 $\overline{\text{MR}}_n$  คือ สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะกับสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว



**D2EHPA**



**Cyanex® 923**



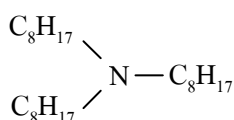
**DDTPA**

รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างสารสกัดชนิดกรด (Sastre et al., 1998: 218)

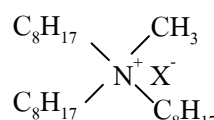
สารสกัดชนิดคีเลต (chelating extractant) เป็นสารสกัดที่มีกลุ่มดอนเนอร์ (donor group) ที่ให้อิออนลบ และสามารถเกิดปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) กับไอออนโลหะหรือไอออนเชิงซ้อนของโลหะที่มีประจุบวกแล้วได้สารประกอบเชิงซ้อนแบบไบเดนเตต (bidentate complex) หรือแบบพอลิเดนเตต (polydentate complex) ที่ละลายได้ดีในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สารประกอบเชิงซ้อนแบบไบเดนเตตมีลิแกนด์ที่มีอิเล็กตรอนคู่อิสระ 2 ตัว หรือประจุลบเท่ากับ 2 (ลิแกนด์ หมายถึง ไอออน หรือ โมเลกุลที่ล้อมรอบไอออนโลหะ)

### 2.3.2 สารสกัดชนิดเบส (basic extractant)

สารสกัดชนิดเบสเป็นสารสกัดอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยากับไอออนลบหรือไอออนเชิงซ้อนของโลหะที่มีประจุลบ เช่น  $\text{HgCl}_4^{2-}$  ได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีผลรวมของประจุเป็นศูนย์และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สารสกัดชนิดเบสที่ใช้เชิงพาณิชย์ เช่น เอมีน หรือสารละลายเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ ชนิดปฐมภูมิ (primary,  $\text{RNH}_2$ ) ชนิดทุติยภูมิ (secondary,  $\text{R}_2\text{NR}$ ) ชนิดตติยภูมิ (tertiary,  $\text{R}_3\text{N}$ ) และชนิดจตุภูมิ (quaternary,  $\text{R}_4\text{N}^+$ ) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นกับความสามารถในการทำปฏิกิริยากับไอออนลบหรือไอออนเชิงซ้อนของโลหะที่มีประจุลบในวัฏภาคสารละลายป้อน การสกัดด้วยสารสกัดเอมีนชนิดตติยภูมิ ( $\text{R}_3\text{N}$ ) สารสกัดต้องทำปฏิกิริยากับกรด (HA) ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเพื่อเปลี่ยนเป็นสารละลายเกลือเอมีน ( $\text{R}_3\text{N}^+\text{HA}^-$ ) อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ (2.2) หลังจากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับไอออนเชิงซ้อนของโลหะที่มีประจุลบ ดังสมการที่ (2.3) โครงสร้างเคมีของตัวอย่างสารสกัดชนิดเบส แสดงดังรูปที่ 2.8



TOA

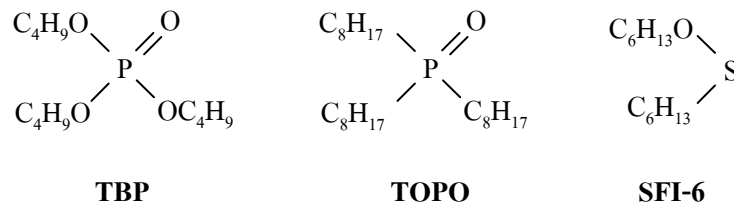


Aliquat 336

รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างสารสกัดชนิดเบส (Sastre et al., 1998: 218)

### 2.3.3 สารสกัดชนิดกลาง (neutral extractant)

สารสกัดชนิดกลางเป็นสารสกัดที่มีฤทธิ์เป็นกลางและไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนจะถูกสกัดและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีผลรวมของประจุเป็นศูนย์ ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดประเภทนี้ขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดเบส โครงสร้างเคมีของตัวอย่างสารสกัดชนิดกลาง แสดงดังรูปที่ 2.9



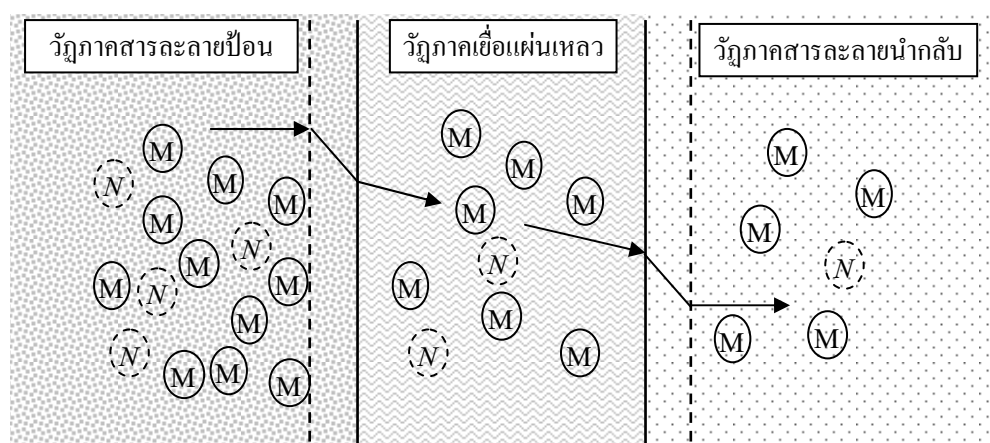
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของตัวอย่างสารสกัดชนิดกลาง (Sastre et al., 1998: 218)

## 2.4 กลไกการถ่ายเทมวล

กลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ (solution-diffusion) และการถ่ายเทมวลแบบใช้สารสกัดหรือตัวพา (carrier-mediated transport หรือ facilitated transport) (Bringas et al., 2009)

### 2.4.1 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่

เป็นการถ่ายเทมวลที่เกิดจากแรงขับ (driving force) ของผลต่างระหว่างความเข้มข้นของไอออนในวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ โดยไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ไอออนที่ต้องแยกต้องละลายได้ดีในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว การถ่ายเทมวลเริ่มจากไอออนที่ต้องการแยก (M) ในวัฏภาคสารละลายป้อนถ่ายเทมายังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ จากนั้นไอออนที่ต้องการแยกจึงแพร่ไปสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับ ดังรูปที่ 2.10



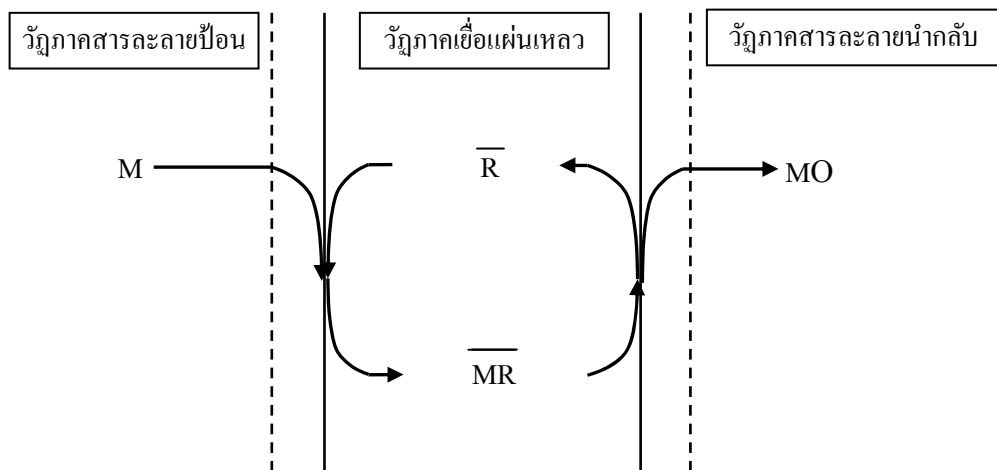
รูปที่ 2.10 การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ (Bringas et al., 2009)

### 2.4.2 การถ่ายเทมวลแบบใช้สารสกัดหรือตัวพา

สารสกัดที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำหน้าที่เป็นตัวพาไอออนที่ต้องการแยกจากผิวสัมผัสด้านวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังผิวสัมผัสด้านวัฏภาคสารละลายนำกลับ แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

### 2.4.2.1 การถ่ายเทมวลแบบง่าย (simple facilitated transport)

การถ่ายเทมวลแบบง่าย ดังรูปที่ 2.11 คือ การถ่ายเทของไอออนที่ต้องการแยก (M) เพียงชนิดเดียว ไม่มีการเคลื่อนที่ของไอออนไฮโดรเจนเกิดร่วมด้วย ไอออนที่ต้องการแยกที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อน จะทำปฏิกิริยากับสารสกัด  $\bar{R}$  ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็น สารประกอบเชิงซ้อน ( $\overline{MR}$ ) อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ (2.4) สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น จะแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจากผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยัง ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ โดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้นของ สารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับ ที่ผิวสัมผัสนี้ ไอออนที่ต้องการแยกที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน จะแพร่เข้าไปอยู่ในวัฏภาคสารละลายนำกลับโดยไม่เกิดปฏิกิริยาการนำกลับ (simple carrier transport) หรือเกิดปฏิกิริยาการนำกลับกับสารละลายนำกลับ (simple carrier transport with chemical reaction) ดัง สมการที่ (2.5) ส่วนสารสกัดจะแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกลับไปผิวสัมผัสด้านวัฏภาคสารละลาย ป้อนเพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกอีก



รูปที่ 2.11 ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกในการถ่ายเทมวลแบบง่าย

### 2.4.2.2 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (coupled facilitated transport)

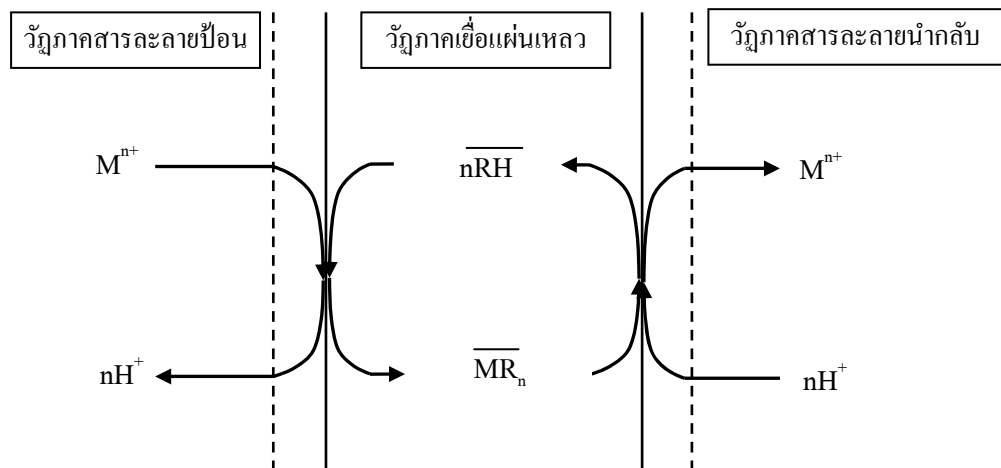
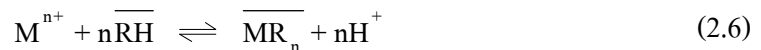
การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ คือ การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยก ( $M^{n+}$ ) จากวัฏภาค สารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่เกิดขึ้นพร้อมกับการถ่ายเทมวลของไอออนไฮโดรเจน ( $H^+$ ) จากวัฏภาค สารละลายป้อนหรือวัฏภาคสารละลายนำกลับ (ไอออนไฮโดรเจนเกิดจากการปรับสภาพความเป็นกรด- เบสของสารละลายป้อน และ/หรือ สารละลายนำกลับด้วยกรด) ไอออนที่ต้องการแยกจะถูกถ่ายเทจากด้าน

สารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนต่างของความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบสวนทาง (coupled facilitated counter-transport) และการถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบไปทางเดียวกัน (coupled facilitated co-transport) ขึ้นกับทิศทางของไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเจน

### ก. การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบสวนทาง

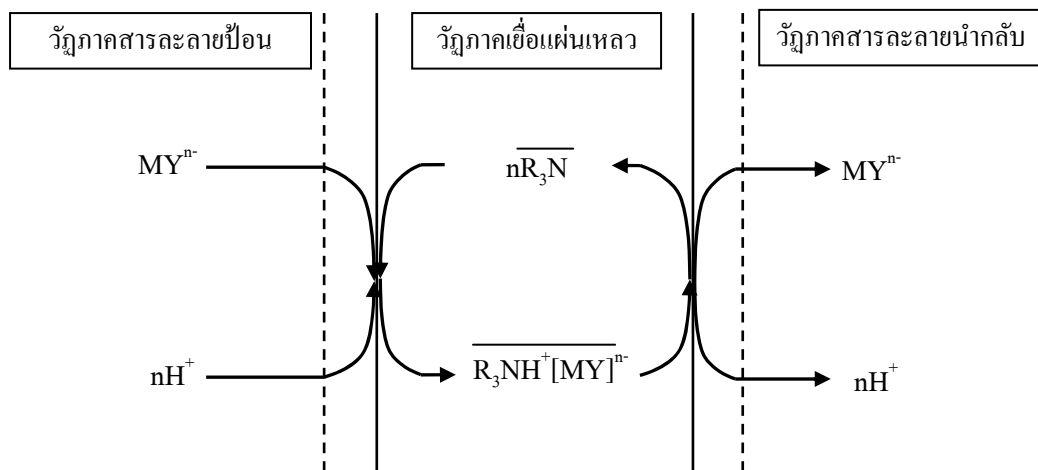
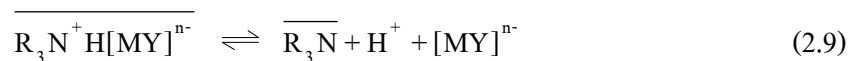
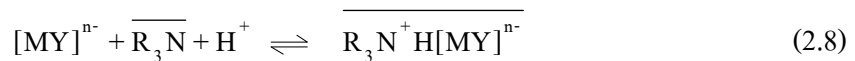
การถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยก ( $M^{n+}$ ) และไอออนไฮโดรเจน ( $H^+$ ) เคลื่อนที่สวนทางกันผ่านภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว การถ่ายเทมวลเริ่มจากไอออนที่ต้องการแยกที่อยู่ในภูมิภาคสารละลายป้อนจะเกิดปฏิกิริยากับสารสกัด ( $\overline{RH}$ ) ที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ( $\overline{MR}_n$ ) ในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ (2.6) สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวจากผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยาย้อนกลับและแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนไฮโดรเจนที่อยู่ในสารละลายนำกลับ ไอออนที่ต้องการแยกจึงละลายออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังสมการที่ (2.7) และได้สารสกัดอยู่ในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังผิวสัมผัสด้านภูมิภาคสารละลายป้อนเพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกในภูมิภาคสารละลายป้อนอีก วนในลักษณะเช่นนี้ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเจนในการถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบสวนทาง

### ข. การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบทางเดียวกัน

เป็นการถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของประจุลบ  $[MY]^{n-}$  กับไอออนไฮโดรเจน ( $H^+$ ) ไอออนทั้งสองอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนและเคลื่อนที่ไปทางเดียวกันผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ไอออนที่ต้องการแยกกับไอออนไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยาการสกัดกับสารสกัด  $\overline{R_3N}$  ที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน  $\overline{R_3N^+H[MY]^{n-}}$  อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ (2.8) สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ และเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเจนเข้าไปละลายในสารละลายนำกลับ และได้สารสกัดกลับมาในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ (2.9) เพื่อแพร่กลับไปยังด้านวัฏภาคสารละลายป้อนและไปทำปฏิกิริยากับไอออนที่ต้องการแยกที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนอีกครั้ง ดังรูปที่ 2.13



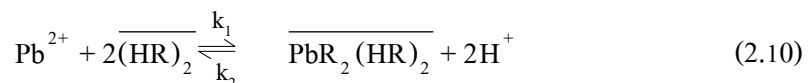
รูปที่ 2.13 ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนที่ต้องการแยกและไอออนไฮโดรเจนในการถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบทางเดียวกัน

### 2.5 กลไกการสกัดไอออนตะกั่ว

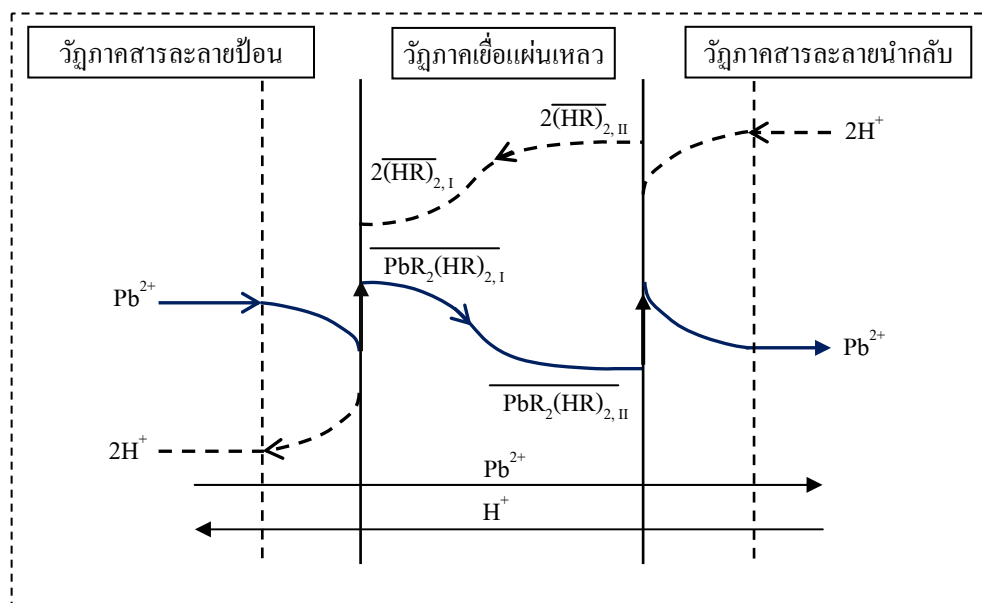
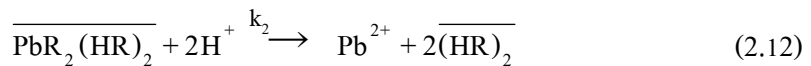
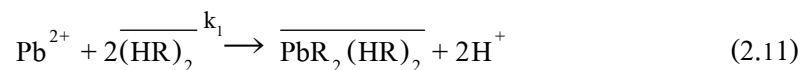
กลไกการถ่ายมวลของไอออนตะกั่วผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวเป็นการถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบบสวนทาง (Lamb et al., 1997) ด้วยการเติมสารละลายกรดในสารละลายนำกลับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

**ขั้นที่ 1** ไอออนตะกั่วที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

**ขั้นที่ 2** ไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัด (HR) ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวได้สารประกอบเชิงซ้อน  $\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}$  อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และไอออนไฮโดรเจน ( $\text{H}^+$ ) อยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อน ดังสมการที่ (2.10)



เมื่อ  $k_1$  และ  $k_2$  คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว สมการที่ (2.11) แสดงปฏิกิริยาไปข้างหน้าระหว่างไอออนตะกั่วกับสารสกัด สมการที่ (2.12) แสดงปฏิกิริยาย้อนกลับระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วกับไอออนไฮโดรเจน

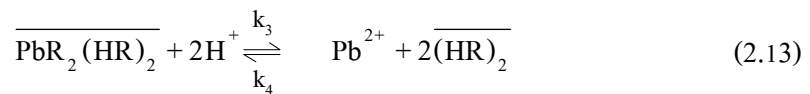


รูปที่ 2.14 กลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ของไอออนตะกั่วและไอออนไฮโดรเจนผ่านเยื่อแผ่นเหลว

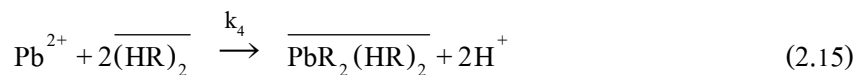
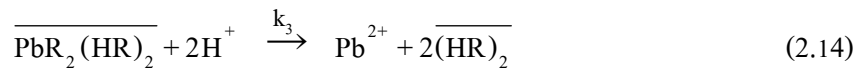


**ขั้นที่ 3** สารประกอบเชิงซ้อน  $\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}$  แพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยอาศัยผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ขณะเดียวกันไอออนไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะแพร่จากผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายป้อน ดังรูปที่ 2.14

**ขั้นที่ 4** สารประกอบเชิงซ้อน  $\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}$  ทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเจนที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ เกิดเป็นไอออนตะกั่วและสารสกัด ดังสมการที่ (2.13)



เมื่อ  $k_3$  และ  $k_4$  คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ สมการที่ (2.14) แสดงปฏิกิริยาไปข้างหน้าระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วกับไอออนไฮโดรเจน และสมการที่ (2.15) แสดงปฏิกิริยาย้อนกลับระหว่างไอออนตะกั่วกับสารสกัด



**ขั้นที่ 5** ไอออนตะกั่วจะแพร่ออกจากผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับไปยังสารละลายนำกลับ และสารสกัดที่กลับคืนสภาพจะทำปฏิกิริยากับไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสด้านวัฏภาคสารละลายป้อนอีกครั้ง เป็นวงจรเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ

## 2.6 ทฤษฎีการคำนวณและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่ว

### 2.6.1 ร้อยละการสกัด (percentage of extraction) และร้อยละการนำกลับ (percentage of stripping)

$$\% \text{ Extraction} = \frac{C_{f,\text{in}} - C_{f,\text{out}}}{C_{f,\text{in}}} \times 100 \quad (2.16)$$

$$\% \text{ Stripping} = \frac{C_{s,\text{out}}}{C_{f,\text{in}}} \times 100 \quad (2.17)$$

เมื่อ  $C_{f,\text{in}}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_{f,\text{out}}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_{s,\text{out}}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

### 2.6.2 การคำนวณค่าคงที่สมดุล (extraction equilibrium constant, $K_{ex}$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

ปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเมื่อใช้ D2EHPA ที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีนเป็นสารสกัด และสารละลายกรดไนตริกเป็นสารละลายนำกลับคั่งที่ได้กล่าวมาแล้วในสมการที่ (2.10) เขียนค่าคงที่สมดุลดังสมการที่ (2.18)

$$K_{ex} = \frac{[\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}][\text{H}^+]^2}{[\text{Pb}^{2+}][\overline{(\text{HR})_2}]^2} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $[\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}]$  = ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่สมดุล (โมลต่อลิตร)  
 $[\text{H}^+]^2$  = ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในวัฏภาคสารละลายป้อนที่สมดุล (โมลต่อลิตร)  
 $[\text{Pb}^{2+}]$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนที่สมดุล (โมลต่อลิตร)  
 $[\overline{(\text{HR})_2}]$  = ความเข้มข้นของสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวที่สมดุล (โมลต่อลิตร)

### 2.6.3 การคำนวณสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient, $D$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

สัมประสิทธิ์การกระจายหรืออัตราส่วนการกระจาย (distribution ratio) คือ อัตราส่วนความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่อยู่ในวัฏภาคสารละลาย (วัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับ) สัมประสิทธิ์การกระจายของการสกัดไอออนตะกั่วแสดงดังสมการที่ (2.19)

$$D = \frac{[\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}]}{[\text{Pb}^{2+}]} = \frac{K_{ex} [\overline{(\text{HR})_2}]^2}{[\text{H}^+]^2} \quad (2.19)$$

### 2.6.4 การคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient, $P$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านคำนวณได้จากสมมติฐานที่ว่า “สัมประสิทธิ์การกระจายของการสกัดไอออนตะกั่วด้านวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงกว่าด้านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับมาก” (Danesi, 1984) คำนวณได้จากสมการที่ (2.20) และสมการที่ (2.21)

$$-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f0}}\right) = AP \frac{\beta}{\beta+1} t \quad (2.20)$$

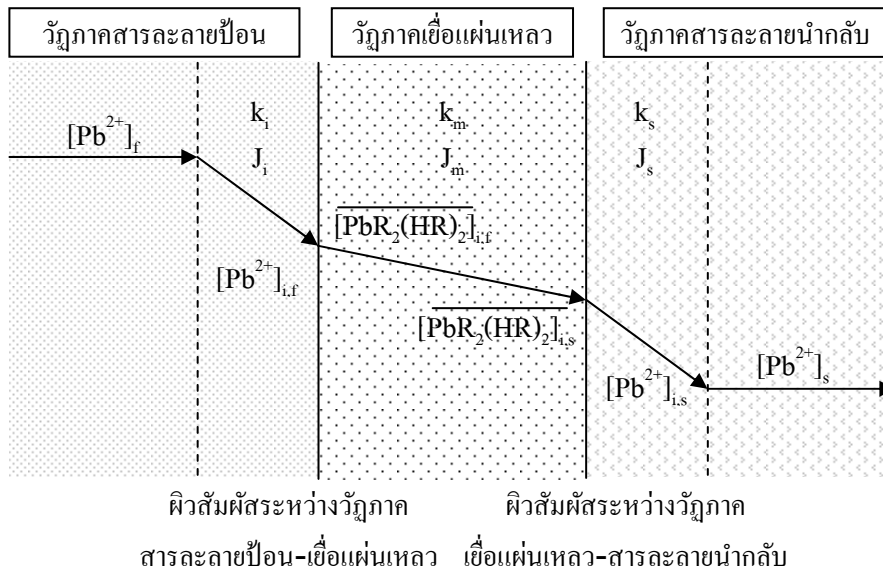
$$\beta = \frac{Q_f}{PLE\pi N r_i} \quad (2.21)$$

เมื่อ	P	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
	$C_{f0}$	=	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เวลาเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)
	$C_f$	=	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เวลาใดๆ (โมลต่อลิตร)
	A	=	พื้นที่การถ่ายเทมวล (ตารางเซนติเมตร)
	$V_f$	=	ปริมาตรของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	t	=	เวลา (วินาที)
	$Q_f$	=	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
	L	=	ความยาวของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	$\epsilon$	=	ความพรุนของเส้นใยกลวง
	N	=	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล
	$r_i$	=	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง
	$\pi$	=	3.1416

### 2.6.5 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านเยื่อแผ่นเหลวประกอบด้วย 3 ส่วน (Kumar et al., 2000) และแสดงดังรูปที่ 2.15

1. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_f$ )
2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่ทำปฏิกิริยากับสารสกัด และถ่ายเทมวลผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจากด้านผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมายังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ( $k_m$ )
3. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ( $k_b$ )



**รูปที่ 2.15** การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

- เมื่อ
- $[Pb^{2+}]_f$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในภูมิภาคสารละลายป้อน (โมลต่อลิตร)
  - $[Pb^{2+}]_{i,f}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว (โมลต่อลิตร)
  - $[PbR_2(HR)_2]_{i,f}$  = ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว (โมลต่อลิตร)
  - $[PbR_2(HR)_2]_{i,s}$  = ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายนำกลับ (โมลต่อลิตร)
  - $[Pb^{2+}]_s$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในภูมิภาคสารละลายนำกลับ (โมลต่อลิตร)
  - $[Pb^{2+}]_{i,s}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายนำกลับ (โมลต่อลิตร)
  - $J_i$  = ฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่วในภูมิภาคสารละลายป้อน (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
  - $J_m$  = ฟลักซ์เชิงโมลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
  - $J_s$  = ฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่วในภูมิภาคสารละลายนำกลับ (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
  - $k_i$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)
  - $k_m$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)

$k_s$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่าง  
 ภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายนำกลับ (เช่นติเมตรต่อวินาที)

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ดังสมการที่ (2.22)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_m} \frac{1}{P_m} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{k_s} \quad (2.22)$$

$$r_{lm} = \frac{r_o - r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $r_{lm}$  = รัศมี log-mean ของเส้นใยกลวง (เช่นติเมตร)  
 $r_o$  = รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เช่นติเมตร)  
 $r_i$  = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เช่นติเมตร)  
 $P_m$  = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $P_m$ ) กับสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) (Rathore et al., 2000) ดังสมการที่ (2.24)

$$P_m = Dk_m \quad (2.24)$$

เมื่อ  $P_m$  = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว  
 $D$  = สัมประสิทธิ์การกระจาย

เมื่อรวมสมการที่ (2.19) สมการที่ (2.22) และสมการที่ (2.24) ได้สมการที่ (2.25)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_m k_m K_{ex}} \frac{[H^+]^2}{[(HR)_2]^2} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{k_s} \quad (2.25)$$

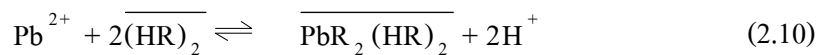
ภายใต้สมมติฐาน “การเกิดปฏิกิริยานำกลับเกิดขึ้นเร็วมากเมื่อเทียบกับปฏิกิริยาการสกัด” หมายความว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วในภูมิภาคสารละลายนำกลับ ( $k_s$ ) มีค่ามากกว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วในภูมิภาคสารละลายป้อน ( $k_i$ ) มาก จนสามารถตัดพจน์สุดท้ายของสมการที่ (2.25) ได้ (Kumar and Satre, 2009) ดังนั้นจะลดสมการได้

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm} k_m K_{ex}} \frac{[H^+]^2}{[(HR)_2]^2} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.26) เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์  $1/P$  กับ  $[H^+]^2/[(HR)_2]^2$  จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเท่ากับ  $r_i/r_{lm} k_m K_{ex}$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_i$  ความชันของกราฟสามารถนำไปคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ส่วนจุดตัดแกน  $y$  สามารถนำไปคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคสารละลายป้อน ( $k_i$ )

### 2.6.6 แบบจำลองการถ่ายเทมวลและการทำนายเวลาการสกัดไอออนตะกั่ว

การคำนวณความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เวลาใดๆ อาศัยสมการปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว ดังสมการที่ (2.10) และฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่ว และค่าคงที่ต่างๆ



จากสมการที่ (2.18) จัดพจน์ใหม่จะได้

$$\overline{[PbR_2(HR)_2]_{i,f}} = \frac{K_{ex} [\overline{(HR)_2}]^2}{[H^+]^2} [Pb^{2+}]_{i,f} \quad (2.27)$$

คำนวณฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มด้านผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และฟลักซ์เชิงโมลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่แพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวโดยอาศัย Fick's First Law ดังสมการต่อไปนี้

$$J_i R_i = [Pb^{2+}]_f - [Pb^{2+}]_{i,f} \quad (2.28)$$

$$J_m R_m = \overline{[PbR_2(HR)_2]_{i,f}} - \overline{[PbR_2(HR)_2]_{i,s}} \quad (2.29)$$

จากสมมติฐาน: ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วด้านวัฏภาคสารละลายนำกลับยังไม่มากพอและสามารถตัดทิ้งได้ (Amrania et al., 1999) ดังนั้นจากสมการที่ (2.29) เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.30)

$$J_m R_m = \overline{[PbR_2(HR)_2]_{i,f}} \quad (2.30)$$

แทนสมการที่ (2.30) ในสมการที่ (2.27) ได้  $[Pb^{2+}]_{i,f}$  ดังสมการที่ (2.31)

$$[Pb^{2+}]_{i,f} = \frac{J_m R_m [H^+]^2}{K_{ex} [(\overline{HR})_2]^2} \quad (2.31)$$

แทนสมการที่ (2.31) ลงในสมการที่ (2.28) จะได้

$$[Pb^{2+}]_f = J_i R_i + \frac{J_m R_m [H^+]^2}{K_{ex} [(\overline{HR})_2]^2} = J \left( \frac{R_i K_{ex} [(\overline{HR})_2]^2 + R_m [H^+]^2}{K_{ex} [(\overline{HR})_2]^2} \right) \quad (2.32)$$

สมมติให้ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว (steady state)  $J_m = J_i = J$  จะได้สมการฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่ว ดังสมการที่ (2.33)

$$J = \frac{K_{ex} [(\overline{HR})_2]^2}{R_m [H^+]^2 + R_i K_{ex} [(\overline{HR})_2]^2} [Pb^{2+}]_f \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.10) การสกัดไอออนตะกั่ว เมื่อพิจารณาสารสกัดซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการสกัดไอออนตะกั่วได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่ว พบว่าอัตราส่วนโมลของสารสกัดต่อโมลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วดังนี้

$$\frac{[(\overline{HR})_2]}{[PbR_2(HR)_2]_{i,f}} = \frac{2}{1} \quad (2.34)$$

ที่เวลาเริ่มต้นในการสกัดไอออนตะกั่ว สารสกัด D2EHPA มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ  $[(\overline{HR})_2]_0$  ซึ่งเป็นความเข้มข้นเริ่มต้นที่ทราบค่า

$$[(\overline{HR})_2]_0 = 2[PbR_2(HR)_2]_{i,f} \quad (2.35)$$

แทนสมการที่ (2.35) ในสมการที่ (2.27) ได้

$$[PbR_2(HR)_2]_{i,f} = \frac{[(\overline{HR})_2]_0}{2} = \frac{K_{ex} [(\overline{HR})_2]^2}{[H^+]^2} [Pb^{2+}]_{i,f} \quad (2.36)$$

$$\overline{[(HR)_2]}^2 = \frac{\overline{[(HR)_2]}_0 [H^+]_2}{2K_{ex} [Pb^{2+}]_{f,i}} \quad (2.37)$$

แทนสมการที่ (2.37) ในสมการที่ (2.33) จะได้ว่า

$$J = \frac{\overline{[(HR)_2]}_0}{2R_m [Pb^{2+}]_{f,i} + R_i \overline{[(HR)_2]}_0} [Pb^{2+}]_f \quad (2.38)$$

เนื่องจากไม่สามารถหาค่าความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลาย ป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $[Pb^{2+}]_{i,f}$ ) ได้ ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยน  $[Pb^{2+}]_{i,f}$  ให้อยู่ในรูปตัวแปรอื่นโดยแทนสมการที่ (2.28) ในสมการที่ (2.38) ได้

$$2R_m J ([R_i J_i - [Pb^{2+}]_f] + JR_i \overline{[(HR)_2]}_0) = \overline{[(HR)_2]}_0 [Pb^{2+}]_f \quad (2.39)$$

ที่ภาวะสมดุล  $J_m = J_i = J$  และจัดสมการที่ (2.39) ให้อยู่ในรูปกำลังสองสมบูรณ์ ดังสมการที่ (2.40)

$$2R_i R_m J^2 - (2R_m [Pb^{2+}]_f + R_i \overline{[(HR)_2]}_0) J + \overline{[(HR)_2]}_0 [Pb^{2+}]_f = 0 \quad (2.40)$$

สมการกำลังสองสมบูรณ์รูปทั่วไป ดังสมการที่ (2.41) และผลเฉลยของกำลังสองสมบูรณ์ ดังสมการที่ (2.42)

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2.41)$$

$$x_1, x_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.42)$$

เมื่อเปรียบเทียบพจน์ของสมการที่ (2.40) กับสมการที่ (2.41) จะได้ว่า

$$x = J \quad b = -(2R_m [Pb^{2+}]_f + R_i \overline{[(HR)_2]}_0) \quad \text{และ} \quad c = \overline{[(HR)_2]}_0 [Pb^{2+}]_f$$

ดังนั้น ผลเฉลยของสมการฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่วในสมการที่ (2.40) จะได้ว่า



$$J_1, J_2 = \frac{(2R_m [Pb^{2+}]_f + R_i [\overline{(HR)}_2]_0) \pm \sqrt{(2R_m R_i [Pb^{2+}]_f)^2 - 8R_m R_i [\overline{(HR)}_2]_0 [Pb^{2+}]_f}}{4R_m R_i} \quad (2.43)$$

เนื่องจาก

$$\sqrt{(2R_m R_i [Pb^{2+}]_f)^2 - 8R_m R_i [\overline{(HR)}_2]_0 [Pb^{2+}]_f} \ll (2R_m [Pb^{2+}]_f + R_i [\overline{(HR)}_2]_0)$$

ดังนั้นจึงสามารถตัดพจน์ที่อยู่ในรากที่สองได้ และสมการฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่วในสมการที่ (2.43) จะลดรูปได้สมการที่ (2.44)

$$J = \frac{R_m [Pb^{2+}]_f}{2R_i} + \frac{[\overline{(HR)}_2]_0}{4R_m} \quad (2.44)$$

สมการฟลักซ์เชิงโมลของไอออนตะกั่วด้านวิทยาศาสตร์ละลายป้อนสามารถหาได้จากสมการที่ (2.45) (He et al., 2006)

$$J = - \frac{d[Pb^{2+}]_f}{dt} \cdot \frac{V_f}{A} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $V_f$  = ปริมาตรของสารละลายป้อน ( $cm^3$ )

$A$  = พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพของเยื่อแผ่น ( $cm^2$ )

รวมสมการที่ (2.44) และสมการที่ (2.45) ได้ดังสมการที่ (2.46)

$$- \frac{d[Pb^{2+}]_f}{dt} \cdot \frac{V_f}{A} = \frac{R_m [Pb^{2+}]_f}{2R_i} + \frac{[\overline{(HR)}_2]_0}{4R_m} \quad (2.46)$$

$$\frac{d[Pb^{2+}]_f}{dt} + \frac{R_m [Pb^{2+}]_f}{2R_i} \frac{A}{V_f} = - \frac{[\overline{(HR)}_2]_0}{4R_m} \frac{A}{V_f} \quad (2.47)$$

สมการอยู่ในรูป linear 1<sup>st</sup> order ODE, non-homogeneous รูปทั่วไป ดังสมการที่ (2.48)

$$\frac{dy}{dx} + P(x) = Q(x) \quad (2.48)$$

เมื่อเปรียบเทียบพจน์ของสมการที่ (2.47) กับสมการที่ (2.48) จะได้ว่า

$$y = [\text{Pb}^{2+}]_f; \quad x = t; \quad P(x) = \frac{A}{2R_i V_f}; \quad Q(x) = -\frac{[(\text{HR})_2]_0}{4R_m} \frac{A}{V_f}$$

ผลเฉลยของสมการ ที่ (2.47) ดังสมการที่ (2.49)

$$y = \frac{1}{e^{\int(x)dx}} \int [Q(x) \cdot e^{\int(x)dx}] dx + \frac{c}{e^{\int(x)dx}} \quad (2.49)$$

จากการแก้สมการที่ (2.47) โดยใช้เงื่อนไข ที่เวลา  $t = 0$  ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนเท่ากับ  $[\text{Pb}^{2+}]_{f,0}$  ได้สมการทำนายความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เวลาใดๆ ดังสมการที่ (2.50)

$$[\text{Pb}^{2+}]_f = -\frac{[(\text{HR})_2]_0 R_i}{2R_m} + ([\text{Pb}^{2+}]_{f,0} + \frac{[(\text{HR})_2]_0 R_i}{2R_m}) \exp\left(-\frac{A}{2R_i V_f} \cdot t\right) \quad (2.50)$$

จัดพจน์สมการที่ (2.50) ใหม่ ได้สมการทำนายเวลาการสกัดไอออนตะกั่ว เมื่อทราบความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วในน้ำเสีย และความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการสกัด

$$t = -\frac{2R_i V_f}{A} \ln\left( \frac{[\text{Pb}^{2+}]_f + \frac{[(\text{HR})_2]_0 R_i}{2R_m}}{[\text{Pb}^{2+}]_{f,0} + \frac{[(\text{HR})_2]_0 R_i}{2R_m}} \right) \quad (2.51)$$

### บทที่ 3

## สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

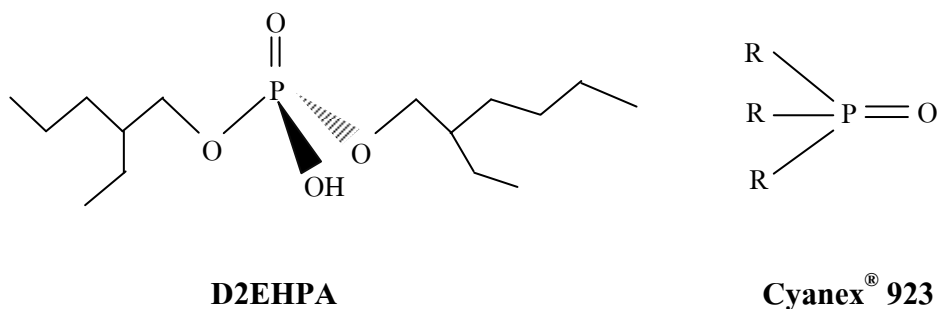
เนื้อหาส่วนของการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การสกัดด้วยตัวทำละลายเพื่อเลือกสารสกัดและตัวทำละลายในการสกัดไอออนตะกั่ว และการนำผลที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายไปใช้ศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ ต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง กำหนดรูปแบบปฏิบัติการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงแบบไหลวน และสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทาง

### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	บริษัท
น้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงานที่เป็นกรณีศึกษา		$Pb^{2+}$	บริษัท น้ำมันปิโตรเลียมไทย จำกัด
สารสกัด	D2EHPA Cyanex <sup>®</sup> 923	$C_{16}H_{35}O_4P$	Merck Ltd. CYTEC
ตัวทำละลายอินทรีย์	เคโรซีน โทลูอิน ไซลีน	- $C_7H_8$ $C_8H_{10}$	S. R. LAB Co., Ltd. Merck Ltd. Merck Ltd.
สารละลายนำกลับ	กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก	$H_2SO_4$ HCl $HNO_3$	S. R. LAB Co., Ltd. S. R. LAB Co., Ltd. S. R. LAB Co., Ltd.

โครงสร้างทางเคมีของสารสกัด D2EHPA และ Cyanex<sup>®</sup> 923 ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดที่ใช้ในการทดลอง (Lothongkum et al., 2009)

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องปั่นกวน และแท่งแม่เหล็ก 4 ชุด
2. กรวยกรอง และกระดาษกรองเบอร์ 42
3. กรวยแยกขนาด 100 มิลลิลิตร
4. บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร และ 250 มิลลิลิตร
5. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
6. กระจกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร
7. ชุดทดลอง Liqui-Cel<sup>®</sup> Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ประกอบด้วย
  - เครื่องสูบลuft 2 ชุด ที่มีอัตราไหล 1 ลิตรต่อนาที
  - มาตรวัดอัตราการไหล 2 ชุด
8. มอดูลเชื่อมต่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ตัวรองรับ คือ เส้นใยกลวงพอลิโพรพิลีน ชนิดมีรูพรุน Celgard<sup>®</sup> X-30 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นมอดูล และมีสมบัติ ดังตารางที่ 3.2
9. เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS แสดงดังรูปที่ 3.2 ภาวะที่วิเคราะห์ดังนี้
  - ประเภทเครื่องวัด: flame ชนิดอากาศ/อะเซทิลีน
  - ความยาวคลื่น: 217.0 นาโนเมตร
  - อัตราการไหลของอากาศ: 13.50 ลิตร/นาที
  - อัตราการไหลของอะเซทิลีน: 2.00 ลิตร/นาที



รูปที่ 3.2 เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS  
(ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2555: ออนไลน์)

ตารางที่ 3.2 สมบัติของมอดูลเส้นใยกลาง

คุณสมบัติ	ชนิด/ขนาด
วัสดุเส้นใยกลาง	พอลิโพรพิลีน (polypropylene)
ความพรุนของเส้นใยกลาง	25 %
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลาง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลาง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 ตารางเมตร
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 ตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
มิติของชุดเส้นใยกลาง (เส้นผ่านศูนย์กลาง x ความยาว)	2.5 x 8 นิ้ว
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
อุณหภูมิในการปฏิบัติการ	1 – 60 องศาเซลเซียส
เส้นผ่านศูนย์กลางของมอดูล	6.3 เซนติเมตร
ความยาวของมอดูล	15.0 เซนติเมตร
จำนวนเส้นใยกลาง	10,000 เส้น

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลายป้อน

1. กรองน้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงานเบตเตอร์ที่เป็นกรณีศึกษาก่อนการตกตะกอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42
2. วัดความเป็นกรด-เบสของน้ำเสียหลังผ่านการกรอง
3. วัดความเข้มข้นเริ่มต้นไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

#### 3.3.2 ศึกษาชนิดของสารสกัดด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

Rosell และคณะ (Rosell et al., 1998), Gumi และคณะ (Gumi et al., 2000), German และคณะ (German et al., 2004), Belkhoche และคณะ (Belkhoche et al., 2006) พบว่า D2EHPA สามารถสกัดไอออนตะกั่วได้ดี แต่ Kozłowska และคณะ (Kozłowska et al., 2007) พบว่า Cyanex<sup>®</sup> 302 สกัดไอออนตะกั่วได้ดีกว่า D2EHPA แต่เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตไม่ผลิต Cyanex<sup>®</sup> 302 แล้ว งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ Cyanex<sup>®</sup> 923 เพื่อเปรียบเทียบกับ D2EHPA และใช้ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้สารละลายกรดไนตริก 0.10 โมลาร์ เป็นสารละลายนำกลับตาม Rosell และคณะ (Rosell et al., 1998) วิธีการทดลองดังนี้

1. ใช้น้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงาน 50 มิลลิลิตร เป็นสารละลายป้อน และปรับความเป็นกรด-เบส ให้มีความเป็นกรดประมาณ 3 เนื่องจากตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนที่ความเป็นกรด-เบสสูงกว่า 7.0 (Belkhouche et al., 2006)
2. เตรียมสารสกัด D2EHPA ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในตัวทำละลายเคโรซีน
3. ผสมสารละลายป้อนกับสารสกัดในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร บั่นกวนที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที 40 นาที จากนั้นทิ้งไว้อีก 40 นาที ให้แยกชั้นในกรวยแยก ชั้นบนเป็นสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีนเนื่องจากเป็นส่วนน้ำมัน เก็บตัวอย่างสารละลายที่อยู่ส่วนล่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS
4. นำส่วนของสารละลายที่อยู่ส่วนล่างในกรวยแยกออก ให้เหลือไว้แต่ส่วนชั้นบน
5. เตรียมสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เพื่อใช้เป็นสารละลายนำกลับ
6. ผสมสารละลายนำกลับที่เตรียมไว้ในข้อ 5 กับสารละลายชั้นบน แล้วบั่นกวนที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที 40 นาที ทิ้งไว้อีก 40 นาที ให้แยกชั้นในกรวยแยก จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายที่อยู่ส่วนล่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS
7. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 6 แต่เปลี่ยนสารสกัดเป็น Cyanex<sup>®</sup> 923

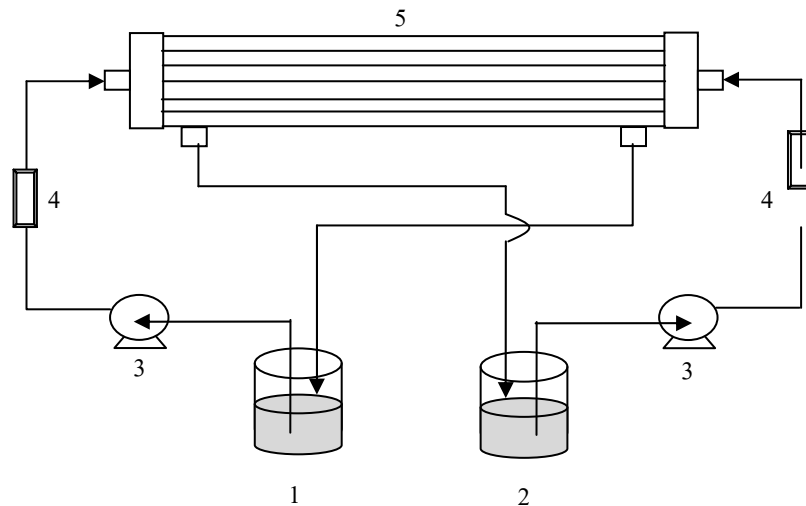
### 3.3.3 ศึกษาชนิดของตัวทำละลายด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

1. เตรียมสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเช่นเดียวกับการศึกษาชนิดของสารสกัดด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย
2. เลือกสารสกัดที่สกัดไอออนตะกั่วได้ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.3.2 ใช้ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในตัวทำละลายเคโรซีน
3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.2 ในข้อ 4 - 6
4. ทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนตัวทำละลายเป็นไซลีน และโทลูอีน

### 3.3.4 ศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1. เตรียมสารละลายป้อน 5 ลิตร และปรับความเป็นกรด-เบสในช่วงที่ศึกษาเริ่มต้นที่ 1.0
2. ใช้สารสกัดที่สกัดไอออนตะกั่วได้ดีที่สุดจากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในตัวทำละลายที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดไอออนตะกั่วได้ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.3.3
3. ยึดตรึงสารสกัดในตัวทำละลายจากข้อ 2 ในรูพรุนของเส้นใยกลวงเพื่อใช้เป็นเยื่อแผ่นเหลว โดยให้ไหลวนในท่อและเปลือกของมอดูลประมาณ 40 นาที หลังจากสังเกตระดับของสารสกัดในตัวทำ

- ละลายในบีกเกอร์เริ่มคงที่ จากนั้นป้อนน้ำที่ปราศจากไอออน (de-mineralized water หรือ de-ionized water, DI water) เข้าในท่อและเปลือกของมอดูลเพื่อไล่สารสกัดที่ค้างออก
4. ใช้สารละลายกรดไนตริก 5 ลิตร เป็นสารละลายนำกลับเช่นเดียวกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย
  5. ป้อนสารละลายป้อนเข้าในท่อและสารละลายนำกลับเข้าในเปลือกของมอดูลเส้นใยกลวง กำหนดรูปแบบปฏิบัติการแบบไหลวน และลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบสวนทาง ดังรูปที่ 3.3 และปรับอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกทุก 10 นาที
  6. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน เป็น 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 ตามลำดับ



**รูปที่ 3.3** รูปแบบปฏิบัติการแบบไหลวน และสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทาง หมายเลข 1 คือ สารละลายป้อน หมายเลข 2 คือ สารละลายนำกลับ หมายเลข 3 คือ ปั๊ม หมายเลข 4 คือ มาตรวัดอัตราการไหล หมายเลข 5 คือ มอดูลเส้นใยกลวง

### 3.3.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1. ทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.4 แต่ใช้ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ทำให้ประสิทธิภาพการสกัดไอออนตะกั่วได้ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.3.4
2. ใช้สารสกัดที่สกัดไอออนตะกั่วได้ดีที่สุดจากการสกัดด้วยตัวทำละลาย ความเข้มข้น 0.003, 0.015, 0.030, 0.060, 0.090 และ 0.120 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
3. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกทุก 10 นาที ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

### 3.3.6 ศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1. ทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.5 และใช้ความเข้มข้นของสารสกัดที่มีค่าการสกัดไอออนตะกั่วดีที่สุดจากหัวข้อ 3.3.5
2. เตรียมสารละลายนำกลับ คือ สารละลายกรดไนตริก 5 ลิตร ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์
3. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกทุก 10 นาที ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS
4. ทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง ข้อ 3 ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ
5. ทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนสารละลายนำกลับเป็นสารละลายกรดซัลฟิวริก และสารละลายไฮโดรคลอริก

### 3.3.7 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัดและการนำกลับ ไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

1. ทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.3.6 โดยใช้ชนิดของสารละลายนำกลับและความเข้มข้นที่ให้ค่าการนำกลับไอออนตะกั่วดีที่สุดจากหัวข้อ 3.3.6
2. ใช้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
3. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกทุก 10 นาที ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 3 แต่เปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเป็น 200, 300 และ 400 ตามลำดับ

### 3.3.8 ศึกษาผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ได้ศึกษาผลของตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ เคาโรซีน ไชลีน และโทลูอิน ต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ในหัวข้อ 3.3.3 แล้ว จึงทดสอบเปรียบเทียบกับระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงดังนี้

1. เตรียมสารละลายป้อน 5 ลิตร ปรับความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดไอออนตะกั่วได้ดีที่สุดจากหัวข้อ 3.3.4
2. ใช้สารสกัดที่สกัดไอออนตะกั่วได้ดีที่สุดจากการสกัดด้วยตัวทำละลาย ที่ความเข้มข้นที่มีค่าการสกัด ไอออนตะกั่วดีที่สุดจากหัวข้อ 3.3.5 ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน
3. ใช้ชนิดของสารละลายนำกลับและความเข้มข้นที่ให้ค่าการนำกลับไอออนตะกั่วดีที่สุดจากหัวข้อ 3.3.6



4. ปรับอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันตามค่าที่ให้ค่าการสกัดไอออนตะกั่วดีที่สุดจากหัวข้อ 3.3.7
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับขาออกทุก 10 นาที ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS
6. ทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง 4 โดยใช้ตัวทำละลายไซลีน และโทลูอีน ตามลำดับ

### 3.3.9 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่ว

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่ว และทดสอบความน่าเชื่อถือโดยเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับผลการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้แสดงผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัดและสารละลายนำกลับ ชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพการสกัด ไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางซึ่งพิจารณาจากร้อยละการสกัด (percentage of extraction) และร้อยละการนำกลับ (percentage of stripping) ดังสมการที่ (2.16) และ (2.17) ในบทที่ 2

$$\% \text{ Extraction} = \frac{C_{f,\text{in}} - C_{f,\text{out}}}{C_{f,\text{in}}} \times 100$$
$$\% \text{ Stripping} = \frac{C_{s,\text{out}}}{C_{f,\text{in}}} \times 100$$

เมื่อ  $C_{f,\text{in}}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

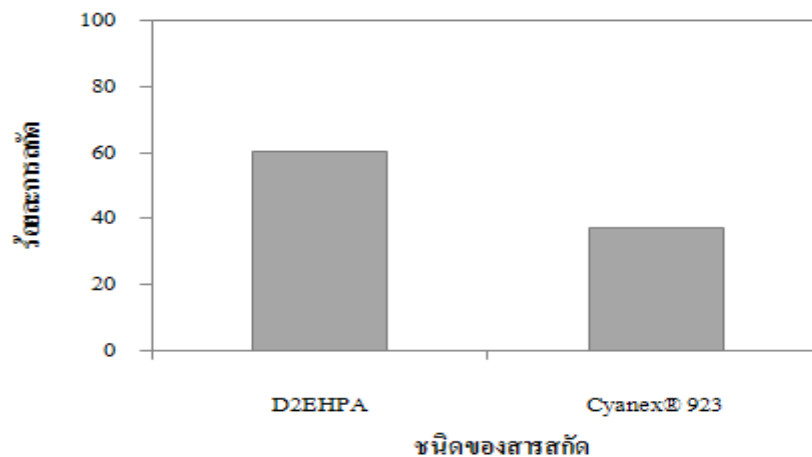
$C_{f,\text{out}}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{s,\text{out}}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากการวิเคราะห์น้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงานที่เป็นกรณีศึกษา (ก่อนการตกตะกอนด้วยสารเคมีและกรองด้วยกระดาษกรอง) ด้วยเครื่อง AAS พบว่ามีความเข้มข้นของไอออนตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 4.1 ชนิดของสารสกัดต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

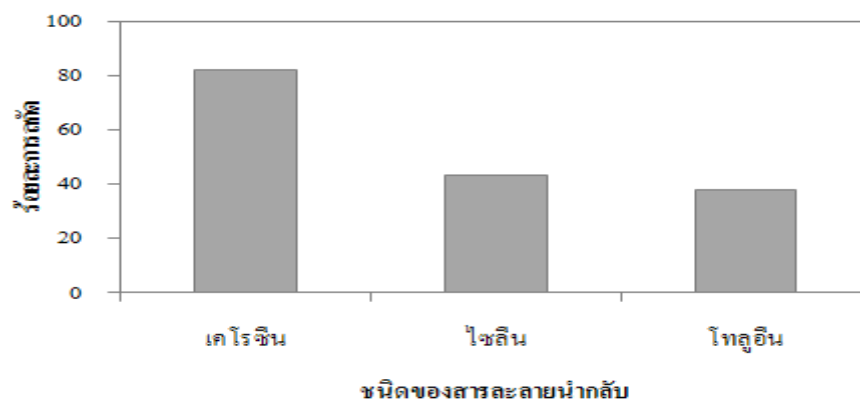
ที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3 ความเข้มข้นของสารสกัดเท่ากับ 0.10 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.10 โมลาร์ การปั่นกววนที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที เวลา 40 นาที พบว่า D2EHPA สกัดไอออนตะกั่วได้ดีกว่า Cyanex<sup>®</sup> 923 ดังรูปที่ 4.1 อธิบายได้ว่า เพราะ D2EHPA มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) หรือหมอกอิเล็กตรอน (electron cloud) มากกว่า Cyanex<sup>®</sup> 923 (Lawrance, 2010) จึงเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนตะกั่วได้ดี ดังนั้น D2EHPA จึงเป็นสารสกัดที่เหมาะสมใช้สกัดไอออนตะกั่วเช่นเดียวกับผลที่พบในงานวิจัยอื่นๆ (Rosell et al., 1998, Gumi et al., 2000, German et al., 2004, และ Belkhoche et al., 2006)



รูปที่ 4.1 ร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

#### 4.2 ผลของตัวทำละลายต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

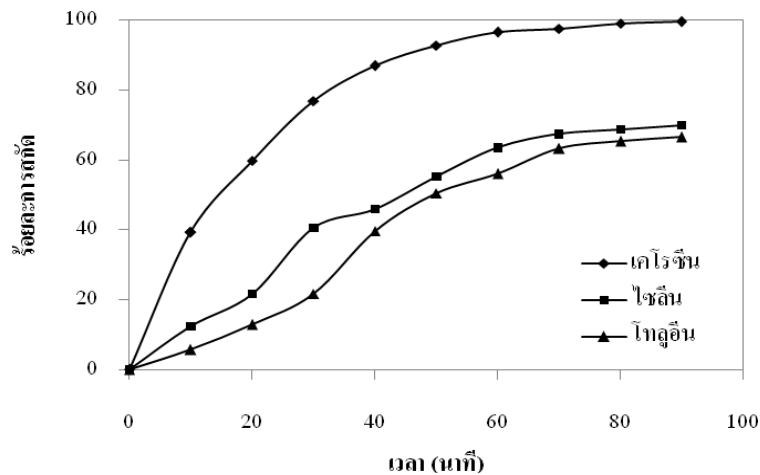
จากรูปที่ 4.2 ตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับสารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ในการสกัดไอออนตะกั่ว คือ เกลโรซีน > ไชลีน > โทลูอิน



รูปที่ 4.2 ผลของตัวทำละลายกับร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

รูปที่ 4.3 แสดงผลของตัวทำละลายเกลโรซีน ไชลีน และโทลูอิน ต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.10 โมลาร์ ใช้สารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.10 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ในเวลา 90 นาที พบว่าร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเกลโรซีนสูงกว่าไชลีนและโทลูอิน เนื่องจากค่า dielectric constant ของเกลโรซีนต่ำกว่าไชลีนและโทลูอิน คือ 1.80, 2.30, และ 2.38 ตามลำดับ (dielectric constant คือ ค่าที่แสดงความสามารถในการละลายของตัวทำละลายในน้ำ หากมีค่าสูงแสดงว่า

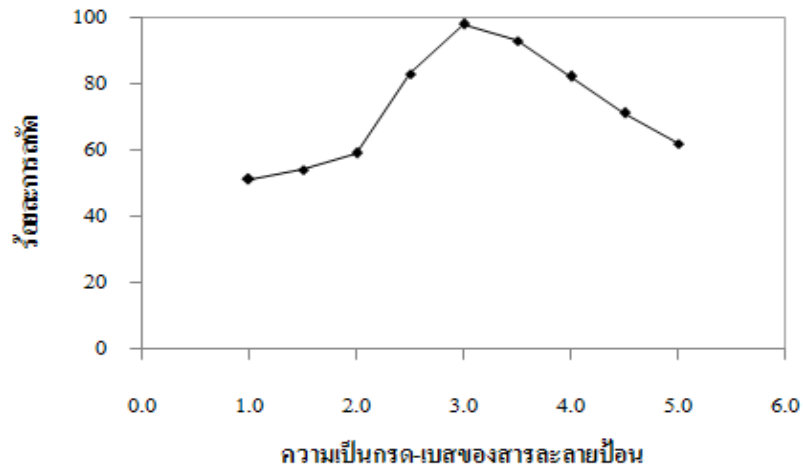
ละลายในน้ำได้มาก) (Chandrashekar and Mansing, 2008) สำหรับระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง วิทยาศาสตร์ละลายป้อนและวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวต้องไม่ละลายเข้ากัน ดังนั้นตัวทำละลายที่มีค่า dielectric constant สูง จะละลายเข้าไปในส่วนของสารละลายป้อนได้ดี ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวเพิ่มขึ้นและด้านทานการถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่ว ดังนั้นประสิทธิภาพการสกัดไอออนตะกั่วด้วยตัวทำละลายไซลีนและโทลูอีนจึงต่ำกว่าเคโรซีน ซึ่งได้ผลในลักษณะเดียวกับวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย



รูปที่ 4.3 ผลของตัวทำละลายกับร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

#### 4.3 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

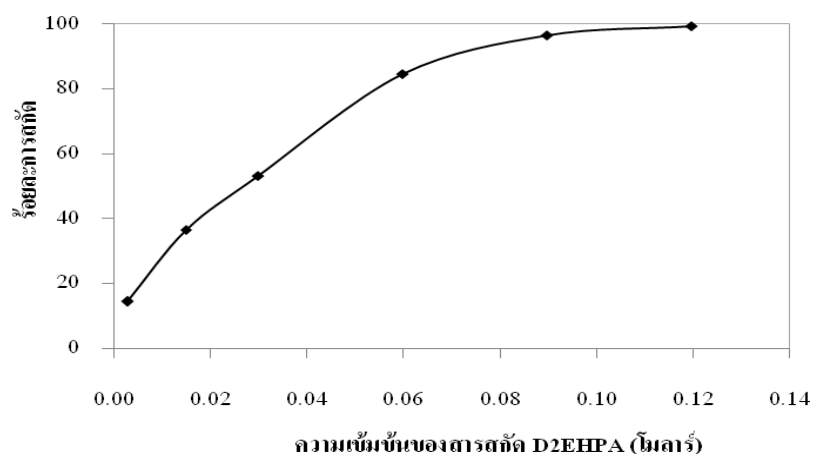
ผลของความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายป้อนซึ่งคือน้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงานต่อการสกัดไอออนตะกั่ว แสดงดังรูปที่ 4.4 เมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 1.0-5.0 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.10 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.10 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ในเวลา 90 นาที พบว่าร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้นในช่วงความเป็นกรด-เบส 1.0-3.0 เนื่องจากสารสกัด D2EHPA เป็นสารสกัดประเภทกรดจะช่วยให้ตะกั่วแตกตัวได้ดีขึ้น จึงเหมาะสำหรับสกัดไอออนตะกั่ว แต่เมื่อความเป็นกรด-เบสสูงกว่า 3.0 (ไอออนไฮโดรเจนและความเป็นกรด (acidity) ลดลง) เห็นได้ชัดว่าร้อยละการสกัดลดลงเนื่องจากสารสกัด D2EHPA เป็นสารสกัดประเภทกรดที่ทำปฏิกิริยากับไอออนตะกั่วได้ดีในช่วงที่สารละลายมีความเป็นกรดสูง สอดคล้องกับที่ Belkhouche และคณะ (Belkhouche et al., 2006) พบว่าไอออนตะกั่วเริ่มตกตะกอนเมื่อความเป็นกรด-เบสสูงกว่า 7.0 ดังนั้นสรุปว่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ 3.0 เหมาะสมที่สุด จึงใช้ค่านี้สำหรับการวิเคราะห์ผลของตัวแปรอื่นๆ ต่อการสกัดไอออนตะกั่ว



รูปที่ 4.4 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัด ไอออนตะกั่ว

#### 4.4 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

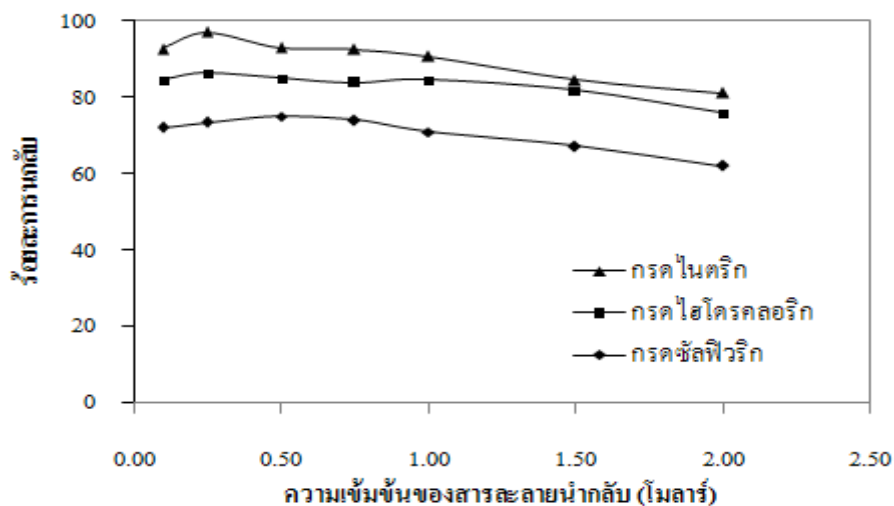
รูปที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีนในการสกัดไอออนตะกั่ว ความเข้มข้นที่ศึกษา 0.003-0.120 โมลาร์ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.10 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที เวลา 90 นาที พบว่าร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด ได้ร้อยละการสกัดไอออนตะกั่วสูงสุด 99 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ อธิบายได้ตามทฤษฎีของ เฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น ทำให้สามารถสกัดไอออนตะกั่วจากสารละลายป้อนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมากขึ้น (Pancharoenet al., 2010)



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีนกับร้อยละการสกัดไอออนตะกั่ว

#### 4.5 ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ผลของสารละลายนำกลับต่างๆ ได้แก่ สารละลายกรดไนตริก สารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.1-2.0 โมลาร์ ในการนำกลับไอออนตะกั่ว แสดงดังรูปที่ 4.6 ที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 90 นาที พบว่าสารละลายกรดไนตริก 0.25 โมลาร์ นำกลับไอออนตะกั่วได้มากกว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายกรดซัลฟิวริก (97, 86 และ 68 % ตามลำดับ) เนื่องจากสารละลายกรดไนตริก สารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายกรดซัลฟิวริกมีค่า pKa เท่ากับ 1.3, 7 และ 10 ตามลำดับ (pKa คือ ค่าการแตกตัวของกรดให้ไอออนไฮโดรเจน ถ้าค่า pKa ต่ำจะมีความเป็นกรดสูง และแตกตัวได้ไอออนไฮโดรเจนมาก) (ประเสริฐ ศรีไพโรจน์, 2554) ดังนั้นสารละลายกรดไนตริกจึงเป็นสารละลายนำกลับที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามถ้าสารละลายนำกลับแตกตัวให้ไอออนไฮโดรเจนมากเกินไป มีโอกาสเกิดปรากฏการณ์ concentration polarization คือทำให้เกิดฟิล์มที่ผิวสัมผัสระหว่างภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวกับภูมิภาคสารละลายนำกลับ จึงดำเนินการถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วและลดการนำกลับไอออนตะกั่ว

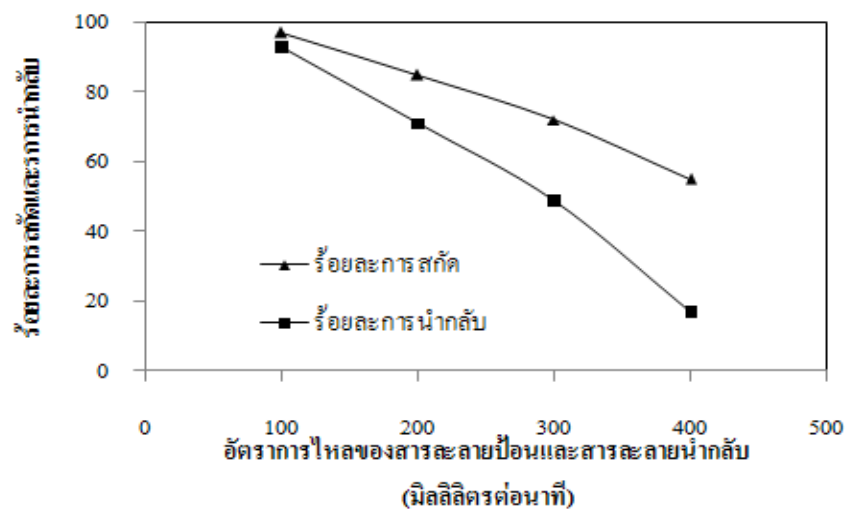


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับไอออนตะกั่วกับชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ

#### 4.6 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัดและการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับในการสกัดและการนำกลับไอออนตะกั่ว แสดงดังรูปที่ 4.7 ที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3 ความเข้มข้นของ

สารสกัด D2EHPA 0.12 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.25 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ใช้เท่ากัน คือ 100, 200, 300 และ 400 มิลลิลิตร ต่อนาที รูปแบบปฏิบัติการแบบไหลวน และลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบสวนทาง (ดังรูปที่ 3.3 ในบทที่ 3) ในเวลา 90 นาที พบว่าร้อยละการสกัดและการนำกลับที่ดีที่สุดเท่ากับ 97 และ 93 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อ นาที แต่เมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้น ร้อยละการสกัดและการนำกลับจะลดลงเนื่องจากเมื่ออัตราการไหลสูง residence time จะลดลง นอกจากนี้ยังมีโอกาสทำให้สารสกัดหลุดออกจากตัวรองรับ (Sunsandee et al, 2012)

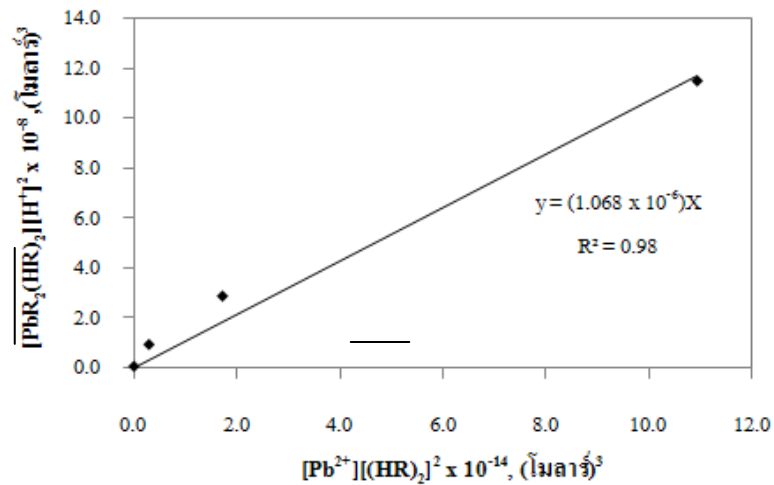


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนตะกั่วกับอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

#### 4.7 การประยุกต์ผลการทดลองกับทฤษฎี

##### 4.7.1 ผลการคำนวณค่าคงที่สมดุล (extraction equilibrium constant, $K_{ex}$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่วคำนวณได้จากสมการที่ (2.18) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.003-0.120 โมลาร์ ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อน 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 3.0 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.25 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{[PbR_2(HR)_2][H^+]^2}{[Pb^{2+}][(HR)_2]^2}$  ที่ได้เป็นเส้นตรง มีจุดตัดแกน y ที่ศูนย์ ค่า  $K_{ex}$  ได้จากความชันของกราฟ จากรูปที่ 4.8 พบว่า  $K_{ex}$  มีค่าเท่ากับ  $1.068 \times 10^{-6}$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $[Pb^{2+}][(HR)_2]^2$  กับ  $[PbR_2(HR)_2][H^+]^2$

#### 4.7.2 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient, D) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

การคำนวณสัมประสิทธิ์การกระจายในช่วงความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.003-0.120 โมลาร์ ตารางที่ 4.1 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.19)

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในช่วงความเข้มข้นของ D2EHPA 0.003-0.120 โมลาร์

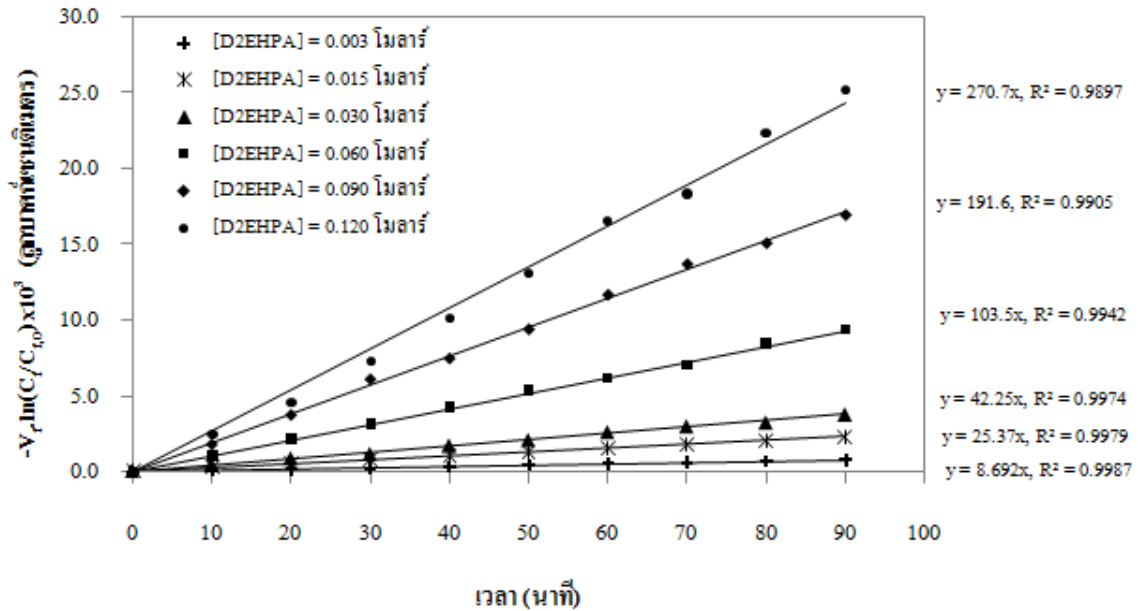
ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA (โมลาร์)	สัมประสิทธิ์การกระจาย (D)
0.003	0.086
0.015	0.338
0.030	0.639
0.060	1.016
0.090	1.755
0.120	2.956

#### 4.7.3 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient, P)

ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่ใช้ในช่วง 0.003-0.120 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อน 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 3.0 ความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก 0.25 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที สัมประสิทธิ์การซึมผ่านคำนวณได้จากสมการที่ (2.20) และ



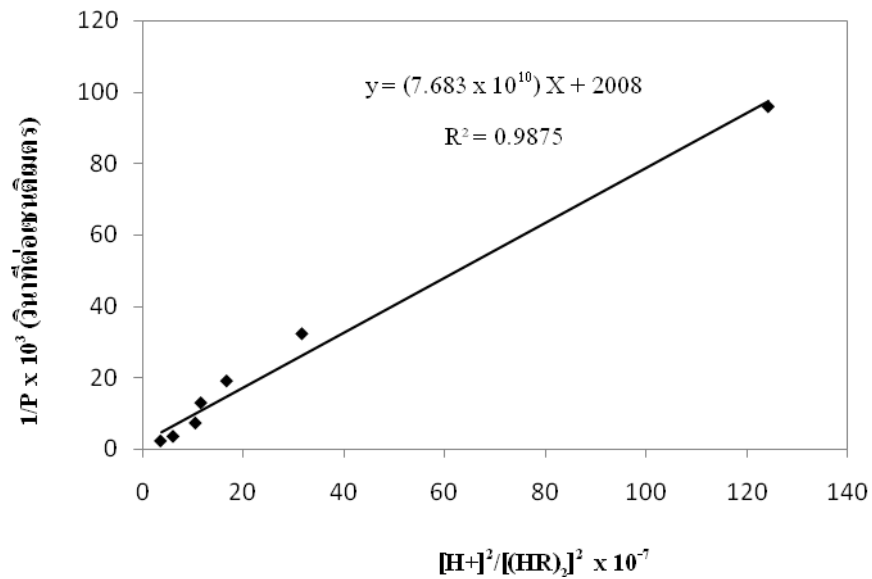
สมการที่ (2.21) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_r \ln(C_f/C_{f0})$  กับเวลา ดังรูปที่ 4.9 ความชันของกราฟ คือ  $APB/(\beta+1)$  และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคำนวณได้จากความชันในแต่ละความเข้มข้นของสารสกัด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_r \ln(C_f/C_{f0})$  กับเวลา

#### 4.7.4 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_f$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) หาได้จากสมการที่ (2.26) ที่ความเข้มข้นของ D2EHPA 0.003-0.120 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อน 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน 3.0 ความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก 0.25 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $[H^+]^2 / [(\overline{HR})_2]^2$  ในรูปที่ 4.10 มีความชันเท่ากับ  $r_f/r_{lm} k_m K_{ex}$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_f$  ความชันที่ได้นำไปคำนวณ  $k_m$  ส่วนจุดตัดแกน  $y$  นำไปคำนวณ  $k_f$  ผลการคำนวณแสดงในภาคผนวก (ก-5) ได้ค่า  $k_f$  และ  $k_m$  เท่ากับ  $4.980 \times 10^{-4}$  และ  $1.089 \times 10^{-5}$  เซนติเมตรต่อวินาที  $k_f$  สูงกว่า  $k_m$  แสดงว่าขั้นตอนการถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของตะกั่วผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนที่ควบคุมการถ่ายเทมวล ตารางที่ 4.2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $[H^+]^2 / [(HR)_2]^2$

ตารางที่ 4.2 สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของการสกัดไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้นของ D2EHPA 0.003-0.120 โมลาร์

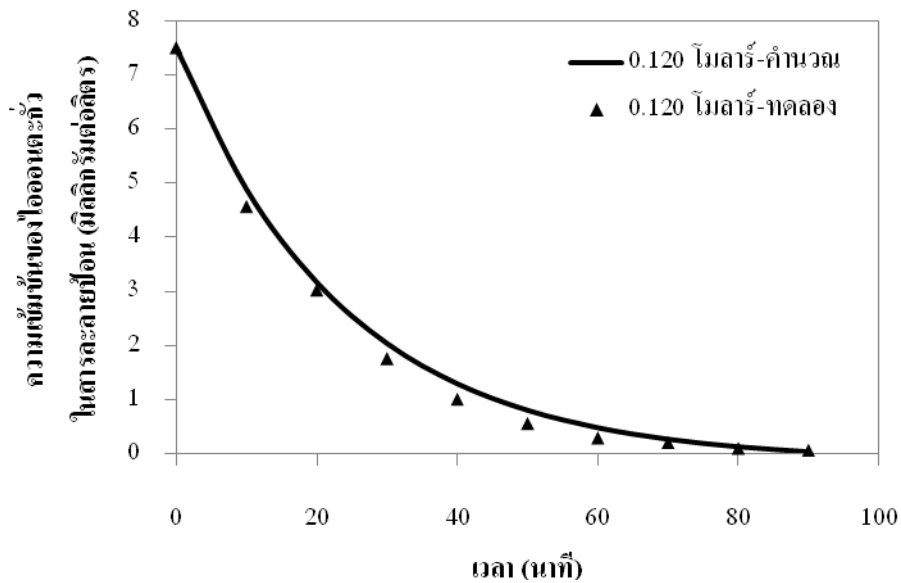
ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA (โมลาร์)	$P \times 10^4$ (เซนติเมตรต่อวินาที)
0.003	0.105
0.015	0.310
0.030	0.525
0.060	1.375
0.090	2.824
0.120	4.435

4.7.5 เปรียบเทียบผลคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลทดลองและการทำนายเวลาการสกัดไอออนตะกั่ว

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนหลังการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุ่งด้วยเส้นใยกลวงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (2.50) กับผลการทดลอง เมื่อความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อน 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3.0 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.120 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน สารละลายนำกลับกรดไนตริก 0.25 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบปฏิบัติการแบบไหลวน และลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลแบบ

สวนทาง พบว่าความเข้มข้นของไอออนตะกั่วจากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลอง มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 4.5 %

เวลาการสกัดไอออนตะกั่วคำนวณจากสมการที่ (2.51) เมื่อแทนความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่ว 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ในน้ำเสียจากบ่อบำบัดของโรงงานที่เป็นกรณีศึกษาก่อนการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์) และความเข้มข้นของไอออนตะกั่วหลังผ่านการบำบัดตามข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายไอออนหลังการสกัดจากผลคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ความเข้มข้นของ D2EHPA 0.120 โมลาร์

ตารางที่ 4.3 ผลคำนวณเวลาการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงของมอดูลที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลาการสกัด ( $V_r = 5$ ลิตร) (นาที)
7.5	0.2	65

ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นใน 1 วัน จากกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ของโรงงานที่เป็นกรณีศึกษา ประมาณ 150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือ  $1.5 \times 10^5$  ลิตร ดังนั้นจำนวนมอดูลที่ใช้สกัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียเมื่อใช้เวลาการสกัด 65 นาที (เวลาการสกัดในห้องปฏิบัติการ) คำนวณได้ดังนี้

$$\text{จำนวนมอดูล} = \frac{1.5 \times 10^5 \text{ ลิตร}}{5 \text{ ลิตร}} = 30,000 \text{ มอดูล}$$

สมมติให้มอดูลเส้นใยกลวงหนึ่งมอดูลสามารถสกัดไอออนตะกั่วได้อย่างต่อเนื่องและไม่เกิดฟาวลิง ดังนั้นคำนวณจำนวนมอดูลสำหรับใช้บำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นใน 1 วัน ได้ดังนี้

$$\text{จำนวนมอดูล} = 30,000 \text{ มอดูล} \div \frac{24 \text{ ชั่วโมง} \times 60 \text{ นาที}}{65 \text{ นาที}} = 1,354.2 \text{ มอดูล}$$

หรือประมาณ 1,355 มอดูล

มอดูลเส้นใยกลวงระดับห้องปฏิบัติการมีพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ 1.4 ตารางเมตร ดังนั้น 1,355 มอดูล มีพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ  $1.4 \times 1,354 = 1,895.6$  ตารางเมตร

มอดูลเส้นใยกลวงที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม รุ่น Degassers Liqui-Cel® Industrial 14" x 40" มีพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ 373 ตารางเมตร (Globalspec, 2012: online) หากต้องการใช้บำบัดน้ำเสีย 150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ต้องใช้จำนวนมอดูลเท่ากับ  $1,895.6/373 = 5.08$  มอดูล (ประมาณ 6 มอดูล)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การจัดการ ไอออนตะกั่วความเข้มข้น 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตรจากน้ำเสียในบ่อบำบัดของโรงงานผลิตแบตเตอรี่ก่อนตกตะกอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยการสกัดใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สรุปภาวะปฏิบัติการที่ใช้ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในน้ำเสียที่เหลือหลังการสกัดอยู่ภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมดังนี้

1. ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน (น้ำเสีย) เท่ากับ 3
2. สารสกัด D2EHPA 0.120 โมลาร์ ในตัวทำละลายเคโรซีน
3. สารละลายนำกลับ คือ สารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์
4. อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที
5. จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่ว
  - 7.1 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดของไอออนตะกั่ว ( $K_{ex}$ ) เท่ากับ  $1.068 \times 10^{-6}$
  - 7.2 สัมประสิทธิ์การกระจาย (D) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.120 โมลาร์ เท่ากับ 2.956
  - 7.3 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.120 โมลาร์ เท่ากับ  $4.435 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที
  - 7.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_f$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) เท่ากับ  $4.980 \times 10^{-4}$  และ  $1.089 \times 10^{-5}$  เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ  $k_f > k_m$  แสดงว่า การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนที่ควบคุมการถ่ายเทมวล (mass transfer controlling step)
  - 7.5 ในการบำบัดไอออนตะกั่วความเข้มข้น 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากน้ำเสียของโรงงานที่เกิดขึ้นใน 1 วัน (150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน) ให้เหลือปริมาณไอออนตะกั่วอยู่ภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมคือไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องใช้มอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงระดับอุตสาหกรรม รุ่น Degassers Liqui-Cel® Industrial 14" x 40" ประมาณ 6 มอดูล

ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถบำบัดไอออนตะกั่วจากน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่ให้ได้ตามข้อกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม แต่ต้องขยายส่วน (scale up)

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กุลธิดา ถาวรกิจการ และ กิจชัย ศิริวัฒน์. พิษจากโลหะตะกั่ว. [ออนไลน์]. 2544. แหล่งที่มา: [http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc\\_toxic/a\\_tx\\_1\\_001c.asp?info\\_id=41](http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=41) [2555, เมษายน 10]
- ประกร รามกุล. การแยกไอออนผสมของแกลตทานัมและนีโอติเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- ประเสริฐ ศรีไพโรจน์. เทคนิคเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. แร่ตะกั่วของไทย. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/science/TI2reshD.htm> [2555, เมษายน 10]
- รัตนา จิรรัตนานนท์. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี: 54 (2543)
- วีรวัฒน์ ปัทวิคคา. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสกัดแยกไอออนซีเรียมจากสารละลายผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. เครื่องมือที่ให้บริการทั้งหมด. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.strec.chula.ac.th> [2555, เมษายน 10]
- สวัสดิ์ภพ สมบูรณ์ปัญญา. การเพิ่มการนำกลับแบบคัดเลือกโปรตจากน้ำที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- สารานุกรมเสรี. ตะกั่ว. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/Lead> [10 เมษายน 2555]
- อุรา ปานเจริญ. กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551

### ภาษาอังกฤษ

- Aamrania, F.Z.E., Kumara, A., Beyerb, L., Floridao, A., and Sastrea, A.M. Mechanistic study of active transport of silver (I) using sulphur containing novel carriers across liquid membrane. Journal of Membrane Science 152 (1999): 263–275.

- Aguilar J.C., Sánchez-Castellanos M., Rodríguez de San Miguel E., and de Gyves J. Cd(II) and Pb(II) extraction and transport modeling in SLM and PIM systems using Kelex 100 as carrier. Journal of Membrane Science 190 (2001): 107–118.
- Belkhouche, N.E., Didi, M.A., Romerob, R., Jonsson, J.A., and Villemin, D. Study of new organophosphorus derivatives carriers on the selective recovery of M (II) and M (III) metals, using supported liquid membrane extraction. Journal of Membrane Science 284 (2006): 398–405.
- Bringas, E., Roman, M.F.S., Irabien, J.A., and Ortiz, I. An overview of the mathematical modelling of liquid membrane separation processes in hollow fibre contactors. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 84 (11) (2009): 1583-1614.
- Bukhari, N. Study of metal ions separation by using coupled transport liquid membrane systems. Doctoral Dissertation, Department of Chemistry Inorganic/Analytical Chemistry Quaid-i-Azam University, 2007.
- Cacaval, D. Separation of p-aminobenzoic acid by reactive extraction. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly 14 (3) (2008): 159-165.
- Chandrashekhar, P.M. and Mansing, A.A. Extraction behaviour of 2-octylaminopyridine towards lead (II) from succinate media and its separation from other toxic metals. Journal of Hazardous Materials 152 (2008): 1146–1154.
- Clooney, G. Who Discovered Lead? [Online]. 2011. Available from: <http://wanttoknowit.com/who-discovered-lead/> [2012, April 10]
- Danesi, P.R. A simplified model for the coupled transport of metal ions through hollow fiber supported liquid membrane. Journal of Membrane Science 20 (1984): 231.
- Gabelman, A. and Hwang, S.T. Hollow fiber membrane contactors. Journal of Membrane Science 159 (1999): 61-106.
- German, S.A., Ana, N.B.F., Eduardo, R.S.M., Mamoun, M., and Josefina, G. Transport characterisation of a PIM system used for the extraction of Pb(II) using D2EHPA as carrier. Journal of Membrane Science 250 (2004): 247– 257.
- Globalspec. Product News for Hollow Fiber Membrane Module [Online]. 2012. Available from: [http://beta.globalspec.com/industrial-directory/hollow\\_fiber\\_membrane\\_module](http://beta.globalspec.com/industrial-directory/hollow_fiber_membrane_module) [2012, September 30]

- Gumi, T., Oleinikova, M., Palet, C., Valiente, M., and Muñoz, M. Facilitated transport of lead(II) and cadmium(II) through novel activated composite membranes containing di- (2-ethyl-hexyl) phosphoric acid as carrier. Analytica Chimica Acta 408 (2000): 65–74.
- He, D., Luo, X., Yang, C., Ma, M., and Wan, Y. Study of transport and separation of Zn(II) by a combined supported liquid membrane/strip dispersion process containing D2EHPA in kerosene as the carrier. Desalination 194 (2006): 40-51.
- Kislik, V.S. Liquid Membranes: Principles and Applications in Chemical Separations and Wastewater Treatment. 1<sup>st</sup> ed. The Netherlands: Elsevier, 2010.
- Kozłowska, J., Kozłowski, C. A., and Kozioł, J. J. Transport of Zn(II), Cd(II), and Pb(II) across CTA plasticized membranes containing organophosphorous acids as an ion carriers. Separation and Purification Technology 57 (2007): 430–434.
- Kumar, A., Haddad, R., Benzal, G., Ninou, R., and Satre, A.M. Use of modified membrane carrier system for recovery of gold cyanide from alkaline cyanide media using hollow fiber supported liquid membranes: feasibility studies and mass transfer modeling. Journal of Membrane Science 174 (2000): 17-30.
- Kumar, A. and Satre, A.M. Hollow fiber supported liquid membrane for the separation/concentration of gold (I) from aqueous cyanide media: modeling and mass transfer evaluation. Ind. Eng. Chem. Res. 39 (1) (2009): 146-154.
- Lamb, J.D. and Nazarenko, A.Y. Lead (II) ion sorption and transport using polymer inclusion membranes containing tri-octylphosphine oxide. Journal of Membrane Science 134 (2) (1997): 255-259.
- Lawrance, A.G. Introduction to Coordination Chemistry. 1<sup>st</sup> ed. The United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd., 2010.
- Lothongkum, A.W., Ramakul, P., Sasomsub, W., Laoharochanapan, S., and Pancharoen U. Enhancement of uranium ion flux by consecutive extraction via hollow fiber supported liquid membrane. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 40 (2009): 518–523.
- Marr, R. and Kopp, A. Liquid membrane technology a survey of phenomena, mechanism and models. International Chemical Engineering 22 (1) (1982): 44-59.
- Pancharoen, P., Somboonpanya, S., Chaturabul, S., and Lothongkum, A.W. Selective removal of mercury as  $\text{HgCl}_4^{2-}$  from natural gas well produced water by TOA via HSLM. Journal of Alloys and Compounds 489 (1) (2010): 72-79.



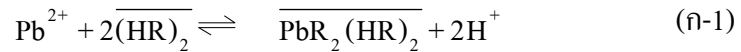
- Prapasawat, T., Ramakul, P., Satayaprasert, C., Pancharoen, U., and Lothongkum, A.W. Separation of As(III) and As(V) by hollow fiber supported liquid membrane based on the mass transfer theory, Korean J. Chem. Eng. 25 (2008): 158.
- Ramakul, P. and Pancharoen, U. Synergistic extraction and separation of mixture of lanthanum and neodymium by hollow fiber supported liquid membrane, Korean J. Chem. Eng. 20 (2003): 724.
- Rathore, N.S., Sonawane, J.V., Kumar, A., Venugopalan, A.K., Sigh, R.K., Bajpai, D.D., and Shukla, J.P. Hollow fiber supported liquid membrane: a novel technique for separation and recovery of plutonium from aqueous acidic wastes. Journal of Membrane Science 189 (1) (2000): 119-128.
- Rensselaer Polytechnic Institute (RPI). 2012. Available from: <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/patillo/membrane.biochem/mem.types.html> [2012, April 10]
- Rosell A., Palet C., and Valiente, M. Solvent impregnated hollow fibre for a selective preconcentration of Pb(II) in an on-line determination by flame atomic absorption spectrometry. Analytica Chimica Acta 370 (1998): 141-149.
- Sastre, A. M., Kumar, A., Shukla, J. P., and Singh, R. K. Improved techniques in liquid membrane separations: an overview. Separation and Purification Methods 27 (2) (1998): 218.
- Shilimkar, T.N. and Anuse, M.A. Rapid extraction of lead (II) from succinate media with n-octylaniline in toluene. Separation and Purification Technology 26 (2002): 185–193.
- Sunsandee, N., Leepipatpiboon, N., Ramakul, P., and Pancharoen, U. The selective separation of (S)-amlodipine via a hollow fiber supported liquid membrane: Modeling and experimental verification. Chemical Engineering Journal 180 (2012): 302.
- Ulewicz, M., Szczygelska-Tao, J., and Biernat, J. F. Selectivity of Pb(II) transport across polymer inclusion membranes doped with imidazole azothiacrown ethers. Journal of Membrane Science 344 (2009): 32–38.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ

ก-1 ปฏิิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว



ก-2 ร้อยละการสกัดไอออนตะกั่ว (percentage of extraction)

$$\% \text{ Extraction} = \frac{C_{f,\text{in}} - C_{f,\text{out}}}{C_{f,\text{in}}} \times 100 \quad (\text{ก-2})$$

ก-3 ร้อยละการนำกลับไอออนตะกั่ว (percentage of stripping)

$$\% \text{ Stripping} = \frac{C_{s,\text{out}}}{C_{f,\text{in}}} \times 100 \quad (\text{ก-3})$$

ก-4 ค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant,  $K_{\text{ex}}$ ) ของปฏิิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

$$K_{\text{ex}} = \frac{[\overline{\text{PbR}_2}(\overline{\text{HR}})_2][\text{H}^+]^2}{[\text{Pb}^{2+}][(\overline{\text{HR}})_2]^2} \quad (\text{ก-4})$$

ก-5 สัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient, D) ของปฏิิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

$$D = \frac{[\overline{\text{PbR}_2}(\overline{\text{HR}})_2]}{[\text{Pb}^{2+}]} = \frac{K_{\text{ex}} [\overline{(\text{HR})}_2]^2}{[\text{H}^+]^2} \quad (\text{ก-5})$$

ก-6 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient, P) ของปฏิิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

$$-V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f0}} \right) = AP \frac{\beta}{\beta + 1} t \quad (\text{ก-6})$$

$$\beta = \frac{Q_f}{PLE\pi N_f} \quad (\text{ก-7})$$

เมื่อ	$P$	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว (เซนติเมตรต่อวินาที)
	$C_{r,o}$	=	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เวลาเริ่มต้น (โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$C_r$	=	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่เวลา $t$ (โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$A$	=	พื้นที่การถ่ายเทมวล (ตารางเซนติเมตร)
	$V_r$	=	ปริมาตรของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	$t$	=	เวลา (วินาที)
	$Q_r$	=	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
	$L$	=	ความยาวของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	$N$	=	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล (เส้น)
	$r_i$	=	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	$\varepsilon$	=	ความพรุนของเส้นใยกลวง
	$\pi$	=	3.1416

ก-7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่ว (mass transfer coefficient) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_m} \frac{1}{P_m} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{k_s} \quad (\text{ก-8})$$

$$r_m = \frac{r_o r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (\text{ก-9})$$

เมื่อ	$r_m$	=	รัศมี log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	$r_i$	=	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	$r_o$	=	รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	$k_i$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)
	$k_m$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)
	$k_s$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ (เซนติเมตรต่อวินาที)

**ภาคผนวก ข**  
**ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ**

**ตารางที่ ข-1** ข้อมูลการศึกษาชนิดของสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ชนิดสารสกัด	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด
	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นหลังการสกัด	
D2EHPA	7.501	2.975	60.34
Cyanex <sup>®</sup> 923	7.501	4.708	37.23

**ตารางที่ ข-2** ข้อมูลการศึกษาชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ชนิดของ ตัวทำละลาย	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด
	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ความเข้มข้นหลังการสกัด	
เคโรซีน	7.501	1.340	82.13
ไซลีน	7.501	4.260	43.21
โทลูอีน	7.501	4.612	38.52

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลจากการศึกษาผลความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนตะกั่ว ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด
	สารละลายป้อน ขาเข้า	สารละลายป้อน ขาออก	
1.0	7.501	3.671	51.1
1.5	7.501	3.450	54.0
2.0	7.501	3.071	59.1
2.5	7.501	1.275	83.0
3.0	7.501	0.155	97.9
3.5	7.501	0.525	93.0
4.0	7.501	1.350	82.0
4.5	7.501	2.169	71.1
5.0	7.501	2.850	62.0

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ชนิดของสารสกัด	ความเข้มข้นของสารสกัด (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการสกัด
		สารละลายป้อน ขาเข้า	สารละลายป้อน ขาออก	
D2EHPA	0.003	7.501	6.415	14.48
	0.015	7.501	4.751	36.66
	0.030	7.501	3.501	53.33
	0.060	7.501	1.151	84.66
	0.090	7.501	0.251	96.65
	0.120	7.501	0.045	99.40

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลจากการศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับ  
ไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ชนิดของสารละลาย นำกลับ	ความเข้มข้น ของสารสกัด D2EHPA (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละ การนำกลับ
		สารละลายป้อน ขาเข้า	สารละลายนำกลับ ขาออก	
กรดไนตริก (HNO <sub>3</sub> )	0.10	7.501	6.951	92.68
	0.25	7.501	7.286	97.15
	0.50	7.501	6.975	93.00
	0.75	7.501	6.946	92.62
	1.00	7.501	6.800	90.66
	1.50	7.501	6.338	84.51
	2.00	7.501	6.083	81.11
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	0.10	7.501	6.335	84.47
	0.25	7.501	6.482	86.42
	0.50	7.501	6.370	84.94
	0.75	7.501	6.292	83.90
	1.00	7.501	6.348	84.64
	1.50	7.501	6.138	81.84
	2.00	7.501	5.701	76.01
กรดซัลฟิวริก (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0.10	7.501	5.413	72.16
	0.25	7.501	5.502	73.35
	0.50	7.501	5.626	75.01
	0.75	7.501	5.551	74.01
	1.00	7.501	5.326	71.01
	1.50	7.501	5.041	67.21
	2.00	7.501	4.651	62.01



ตารางที่ ข-6 ข้อมูลจากการศึกษาผลของชนิดของตัวทำละลายต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ชนิดของตัวทำละลาย		โทลูอีน		ไซลีน		สไตรีน	
เวลา (นาที)	$C_{f,0}$	$C_{f,out}$	% E	$C_{f,out}$	% E	$C_{f,out}$	% E
0	7.501	7.501	0.00	7.501	0.00	7.501	0.00
10	7.501	4.562	39.18	6.574	12.36	7.078	5.64
20	7.501	3.017	59.78	5.878	21.64	6.536	12.87
30	7.501	1.747	76.71	4.460	40.54	5.878	21.64
40	7.501	0.995	86.74	4.053	45.97	4.528	39.64
50	7.501	0.547	92.71	3.363	55.16	3.724	50.35
60	7.501	0.276	96.31	2.741	63.46	3.303	55.97
70	7.501	0.192	97.43	2.450	67.34	2.764	63.15
80	7.501	0.086	98.85	2.346	68.73	2.607	65.24
90	7.501	0.049	99.35	2.257	69.91	2.514	66.49

- เมื่อ  $C_{f,0}$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วในวัฏภาคสารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_{f,in}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_{f,out}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ข-7 ข้อมูลจากการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ชนิดของสารละลายนำกลับ	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (มิลลิลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการนำกลับ
		สารละลายป้อนขาเข้า	สารละลายป้อนขาออก	
สารละลายป้อน	100	7.501	0.182	97.57
	200	7.501	1.125	85.00
	300	7.501	2.100	72.00
	400	7.501	3.375	55.00

ตารางที่ ข-8 ข้อมูลจากการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายนำกลับกรดไนตริกต่อการนำกลับไอออนตะกั่วด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

สารละลายนำกลับ	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นของตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการนำกลับ
		สารละลายป้อนขาเข้า	สารละลายนำกลับขาออก	
สารละลายกรดไนตริก	100	7.501	6.976	93.00
	200	7.501	5.326	71.00
	300	7.501	3.675	49.00
	400	7.501	1.275	17.00

ตารางที่ ข-9 ข้อมูลเปรียบเทียบผลความเข้มข้นของไอออนตะกั่วจากการคำนวณ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของ D2EHPA 0.120 โมลาร์

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ทดลอง	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
0	7.501	7.501
10	4.561	4.880
20	3.016	3.156
30	1.747	2.021
40	0.995	1.275
50	0.547	0.783
60	0.276	0.460
70	0.192	0.247
80	0.086	0.107
90	0.045	0.025

### ภาคผนวก ค

#### ตัวอย่างการคำนวณ

##### ค-1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัดของไอออนตะกั่ว

จากข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-4 ที่ความเข้มข้นของของสารสกัด D2EHPA = 0.12 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาเข้า = 7.501 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาออก = 0.045 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการสกัด} &= (7.501 - 0.045) / 7.501 \times 100 \\ &= 99.40 \text{ (ดังตารางที่ ข-4)} \end{aligned}$$

##### ค-2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับของไอออนตะกั่ว

จากข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-5 ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก = 0.25 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาเข้า = 7.501 มิลลิกรัมต่อลิตร

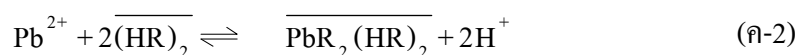
ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายนำกลับขาออก = 7.286 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการสกัด} &= (7.286 / 7.501) \times 100 \\ &= 97.15 \text{ (ดังตารางที่ ข-5)} \end{aligned}$$

##### ค-3 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant, $K_{ex}$ )

$$K_{ex} = \frac{[\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}][\text{H}^+]^2}{[\text{Pb}^{2+}][\overline{(\text{HR})_2}]^2} \quad (\text{ค-1})$$

การคำนวณความเข้มข้นของไอออนตะกั่ว สารสกัด สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วและไอออนไฮโดรเจน (ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-4) จากปฏิกิริยาการสกัดของไอออนตะกั่วโดยใช้ข้อมูลที่ภาวะความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับ 0.12 โมลต่อลิตร มีรายละเอียดดังนี้



ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาเข้า = 7.501 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$= 3.620 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร}$$

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาออก = 0.045 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$= 2.172 \times 10^{-7} \text{ โมลต่อลิตร}$$

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนที่เกิดปฏิกิริยาการสกัด

$$= 3.620 \times 10^{-5} - 2.172 \times 10^{-7} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$= 3.598 \times 10^{-5} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนที่ทำปฏิกิริยา หรือความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่ว  $[\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}]$  ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่วจึงเท่ากับ  $3.598 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อน และสารสกัดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าดังนี้

$[\text{Pb}^{2+}]$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาเข้า

$$= 3.620 \times 10^{-5} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$[(\text{HR})_2]$  = ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA = 0.12 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อน และสารสกัดที่สมดุลมีค่าดังนี้

$[\text{Pb}^{2+}]$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในสารละลายป้อนขาออก

$$= 0.045 \quad \text{มิลลิกรัมต่อลิตร}$$

$$= 2.172 \times 10^{-7} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$[(\text{HR})_2]$  =  $0.12 - 2 \times 3.598 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร

$$= 1.197 \times 10^{-1} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วที่สมดุล มีค่าดังนี้

$[\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}] = 3.598 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร

$[\text{H}^+]$  =  $2 \times 3.598 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร

$$= 7.196 \times 10^{-5} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

ดังนั้น  $[\overline{\text{PbR}_2(\text{HR})_2}][\text{H}^+]^2 = (3.598 \times 10^{-5}) \times (7.196 \times 10^{-5})^2$  โมลต่อลิตร

$$= 1.863 \times 10^{-13} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

และ  $[\text{Pb}^{2+}][(\text{HR})_2]^2 = (2.172 \times 10^{-7}) \times (1.197 \times 10^{-1})^2$  โมลาร์

$$= 5.151 \times 10^{-7} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว ( $K_{ex}$ ) ได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.8 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.068 \times 10^{-6}$

## 2. การคำนวณสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

$$D = \frac{[\overline{PbR_2(HR)_2}]}{[Pb^{2+}]} = \frac{K_{ex} [(\overline{HR})_2]^2}{[H^+]^2} \quad (ค-3)$$

เมื่อ  $K_{ex}$  = ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว  
 $= 1.069 \times 10^{-6}$   
 $[(\overline{HR})_2]$  = ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA  
 $= 0.12$  โมลต่อลิตร  
 $[H^+]$  = ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในสารละลายป้อนขาออก  
 $= 7.196 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร

แทนค่าในสมการ (ค-3)

$$D = \frac{(1.068 \times 10^{-6}) \times (0.12)^2}{(7.196 \times 10^{-5})^2}$$

$$D = 2.956$$

## ค-4 ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient, P) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว

จากสมการ  $-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right) = AP \frac{\beta}{\beta+1} t$  (ค-4)

$$\beta = \frac{Q_f}{PLE\pi N r_1} \quad (ค-5)$$

เมื่อ  $p$  = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว  
 (เซนติเมตรต่อวินาที)

$C_{f,0}$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่เวลาเริ่มต้น  
 (โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_f$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่เวลา  $t$  (โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)

- $A$  = พื้นที่การถ่ายเทมวล (ตารางเซนติเมตร)  
 $V_f$  = ปริมาตรของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)  
 $t$  = เวลา (วินาที)  
 $Q_f$  = อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)  
 $L$  = ความยาวของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)  
 $N$  = จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล (เส้น)  
 $r_i$  = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)  
 $\varepsilon$  = ความพรุนของเส้นใยกลวง  
 $\pi$  = 3.1416

สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้คำนวณจากความชัน คือ  $AP\beta/(\beta+1)$  ของกราฟระหว่าง  $-V_f \ln(C_f/C_{f0})$  กับเวลา (t)

พิจารณาข้อมูลของไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับ 0.12 โมลต่อลิตร

- โดยที่
- $C_{f0}$  =  $3.620 \times 10^{-5}$  โมลต่อลิตร  
 $C_f$  = ความเข้มข้นของไอออนตะกั่วที่เวลา t (โมลต่อลิตร)  
 $A$  =  $1.40 \times 10^4$  ตารางเซนติเมตร  
 $V_f$  = 5000 ลูกบาศก์เซนติเมตร  
 $Q_f$  = 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที  
 $L$  = 15 เซนติเมตร  
 $N$  = 10,000 เส้น  
 $r_i$  =  $120 \times 10^{-4}$  เซนติเมตร  
 $\varepsilon$  = 0.25  
 $\pi$  = 3.1416

จากรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาความชันที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA 0.12 โมลต่อลิตร พบว่า  $AP\beta/(\beta+1)$  เท่ากับ 270.7 เซนติเมตรต่อวินาที หรือ 4.512 เซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้นจากสมการที่ (ค-5) สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ดังนี้

$$\beta = \frac{Q_f}{PLE\pi N r_i}$$

$$\beta = \frac{100/60 \text{ cm}^3/\text{s}}{P \times (15 \text{ cm}) \times (0.25) \times (3.1416) \times (10,000) \times (120 \times 10^{-4} \text{ cm})}$$

$$\beta = \frac{0.00118}{P} \quad (\text{ค-6})$$

แทนค่า  $\beta$  จากสมการที่ (ค-6) ลงในเทอม  $AP\beta/(\beta+1)$  จะได้ความชัน =  $4.512 \text{ cm/s} = AP\beta/(\beta+1)$

$$4.512 \text{ cm/s} = (1.4 \times 10^4) \times P \times \frac{\frac{0.00118}{P}}{\frac{0.00118}{P} + 1}$$

$$P = 4.435 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

ค-5 ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_i$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

$$\text{จากสมการ} \quad \frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_m k_m K_{ex}} \frac{[H^+]^2}{[(HR)_2]^2} \quad (\text{ค-7})$$

$$r_{lm} = \frac{r_o - r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (\text{ค-8})$$

- เมื่อ
- $r_{lm}$  = รัศมี log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
  - $r_i$  = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
  - $r_o$  = รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
  - $k_i$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)
  - $k_m$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)
  - $k_s$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ (เซนติเมตรต่อวินาที)
  - $P$  = สัมประสิทธิ์การซึมผ่านปฏิกิริยาการสกัดไอออนตะกั่ว (เซนติเมตรต่อวินาที)
  - $[(HR)_2]$  = ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA (โมลต่อลิตร)
  - $[H^+]$  = ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในสารละลายป้อน (โมลต่อลิตร)



จากสมการ (ค-7) เมื่อสร้างกราฟความสัมพัทธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $[H^+]^2 / [(HR)_2]^2$  จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $r_i/r_{lm}k_mK_{ex}$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_i$  จากความชันของกราฟที่ได้ สามารถนำไปคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ส่วนจุดตัดแกน  $y$  สามารถนำไปคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวฏภาคสารละลายป้อนกับวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_i$ )

#### ค-5.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวฏภาคสารละลายป้อนกับวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_i$ )

$$\text{จากรูปที่ (4.10) จุดตัดแกน } y = \frac{1}{k_i} = 2.008 \times 10^3 \text{ วินาทีต่อเซนติเมตร}$$

$$k_i = 4.980 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนตะกั่วผ่านชั้นฟิล์มระหว่างวฏภาคสารละลายป้อนกับวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเท่ากับ  $4.980 \times 10^{-4}$  เซนติเมตรต่อวินาที

#### ค-5.2 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

$$\text{จากรูปที่ (ค-3) ได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชัน } = r_i/r_{lm}k_mK_{ex} = 7.683 \times 10^{10} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

$$\text{จากสมการ } r_{lm} = \frac{r_o - r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}$$

เมื่อ

$$r_o = \text{รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง} = 150 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร}$$

$$r_i = \text{รัศมีภายในของเส้นใยกลวง} = 120 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้น

$$r_{lm} = \frac{(150 \times 10^{-4}) - (120 \times 10^{-4})}{\ln\left(\frac{150 \times 10^{-4}}{120 \times 10^{-4}}\right)}$$

$$r_{lm} = 1.340 \times 10^{-2} \text{ เซนติเมตร}$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ในเทอม  $r_i/r_{lm}k_mK_{ex} = 7.683 \times 10^{10}$  เซนติเมตรต่อวินาทีจะได้ว่า

$$k_m = \frac{1}{7.683 \times 10^{10}} \frac{r_i}{r_{lm} K_{ex}}$$

$$k_m = \frac{1}{7.683 \times 10^{10}} \frac{120 \times 10^{-4}}{(1.340 \times 10^{-2})(1.069 \times 10^{-6})}$$

$$k_m = 1.089 \times 10^{-5} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

นั่นคือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนตะกั่วผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่น  
เหลว ( $k_m$ ) เท่ากับ  $1.089 \times 10^{-5}$  เซนติเมตรต่อวินาที

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

**ชื่อ** นายสุเมธ ขาวยา

**เกิด** วันที่ 8 ธันวาคม 2525 ที่จังหวัดบุรีรัมย์

### การศึกษา

- |           |   |
|-----------|---|
| พ.ศ. 2538 | สำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านทุ่งสว่าง ตำบลสูงเนิน อำเภอกระสัง จังหวัดบุรีรัมย์                           |
| พ.ศ. 2541 | สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสูงเนินพิทยาคม ตำบลสูงเนิน อำเภอกระสัง จังหวัดบุรีรัมย์                    |
| พ.ศ. 2544 | สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนกระสังพิทยาคม ตำบลสูงเนิน อำเภอกระสัง จังหวัดบุรีรัมย์                    |
| พ.ศ. 2549 | สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา |
| พ.ศ. 2551 | เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                        |

### ทุนวิจัย

- |                  |   |
|------------------|---|
| พ.ศ. 2553 – 2555 | สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิต กับงานวิจัย (ทุน สกว. – อุตสาหกรรม) ประจำปี 2553 |
|------------------|---|

### ผลงานทางวิชาการ

1. Sumeth Khaoya and Ura Pancharoen. Removal of Lead (II) from Battery Industry Wastewater by HFSLM. 2012 2<sup>nd</sup> Journal Conference on Chemical Engineering and Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, May 5-6, 2012
2. Sumeth Khaoya and Ura Pancharoen. Removal of Lead (II) from Battery Industry Wastewater by HFSLM. International Journal of Chemical Engineering and Applications 3 (2) (2012) : 98-103.