

การแยกไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

นางสาวกฤติยา วิสุทธิเสน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
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.

ZINC ION SEPARATION FROM INDUSTRIAL WASTE WATER VIA HOLLOW FIBER
SUPPORTED LIQUID MEMBRANE

Miss Krittiya Wisutthisaen

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
โดย	นางสาวกฤติยา วิสุทธิเสน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

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

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

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

กฤติยา วิสุทธีเสน: การแยกไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. (ZINC ION SEPARATION FROM INDUSTRIAL WASTE WATER VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: รศ.ดร.อุรา ปานเจริญ, 126 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมของกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ผลของตัวทำละลายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ อายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ

ผลงานวิจัยพบว่า D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีนมีความเหมาะสมที่สุด ณ สภาวะที่ดีที่สุด ให้ผลร้อยละการสกัดที่ 91 และร้อยละการนำกลับที่ 56 ภายใต้อายุการใช้งานที่สามารถยอมรับได้ที่ 210 นาที ซึ่งสภาวะดังกล่าวประกอบด้วยค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกเท่ากับ 0.125 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที นอกจากนี้พบว่าชนิดของตัวทำละลายมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในสารละลายป้อน (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลว (k_m) ซึ่งค่าทั้งหมดนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความมีขี้ของตัวทำละลาย โดยตัวทำละลายทั้งหมดที่ทำการศึกษาพบว่าขั้นตอนควบคุมอัตราการถ่ายเทมวลคือ การแพร่ซึมของไอออนสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีและ D2EHPA ผ่านชั้นของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ผลลัพธ์ของสารละลายป้อนเมื่อผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีค่าความเข้มข้นของไอออนสังกะสีต่ำกว่าค่ามาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมประเทศไทย และผลลัพธ์ของสารละลายนำกลับที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นตัวเดิมในกระบวนการชุบโลหะ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิติติ.....
 สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2556.....

5271547221: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: HOLLOW FIBER / LIQUID MEMBRANE / ZINC / INDUSTRIAL WASTE WATER / SEPARATION

KRITTIYA WISUTTHISAEN: ZINC ION SEPARATION FROM INDUSTRIAL WASTE WATER VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, Ph. D., 126 pp.

This research studied the separation of zinc ions from industrial wastewater of zinc phosphate process via a hollow fiber supported liquid membrane. The studied parameters were obtained the type of extractant, the pH of feed solution, the concentration of extraction and stripping solution, the flow rate of feed and stripping solution, effect of diluent that affecting to efficiency of extraction and stripping, lifetime of liquid membrane, initial feed concentration and effect of temperature that affecting to efficiency of extraction and stripping.

The result was found D2EHPA in toluene is the most suitable. The optimum condition was achieved at 91% of the extraction and 56% of the stripping under an acceptable lifetime at 210 minutes. The best condition were obtained at 2.5 of a pH in feed solution, 8.3%(v/v) of D2EHPA in toluene, 0.125 molar of a sulfuric acid concentration as the stripping solution and 100 ml/min of volumetric flow rate of feed and stripping solution. Moreover, The diluent have effect to rate of mass transfer as significant that affecting to distribution ratio (D), permeability coefficient (P), mass transfer coefficient of zinc ions in the feed phase (k_f) and mass transfer coefficient of zinc ions in the membrane phase (k_m) which all values are relation with polarity of a diluent and all diluents were studied that found the mass transfer rate of the diffusion of the complex ions of zinc and D2EHPA across the liquid membrane is limiting step.

The results of feed solution that can refer to effluent of wastewater from industrial after treated by hollow fiber supported liquid membrane was found the concentration of zinc ions is lower than limited by regulation of Thailand and also the stripping solution can applied to the raw material of electroplating process.

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

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

Academic Year : 2013.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำสอนและความรู้การทำวิจัย และยังกรุณาหาเงินทุนวิจัยสนับสนุน ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประกร รามกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาคอุตสาหกรรม ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สมาชิกกลุ่มงานวิจัย Mass Separation ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาที่ดีตลอดมา และนายสุภัค ลาภอิทธิ หัวหน้าฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท ไทย เอ็นโอเค จำกัด ที่เอื้อเฟื้อหัวข้อวิจัยเพื่อการศึกษา เพื่อนำไปขยายผลสู่ภาคอุตสาหกรรมต่อไป

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวทุกท่าน โดยเฉพาะ บิดาและ มารดา ของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจให้ไปสู่ความสำเร็จเสมอมา

ประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากการทำงานวิจัยนี้ เกิดจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านอย่างสูงไว้ในโอกาสนี้ด้วย

	หน้า
1.9 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีบท.....	17
2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	17
2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	18
2.3 รูปแบบระบบปฏิบัติการผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	20
2.3.1 ระบบปฏิบัติการแบบกะ (Batch operation mode).....	20
2.3.2 ระบบปฏิบัติการแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous operation mode).....	20
2.3.3 ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-batch operation mode).....	21
2.4 สารสกัด.....	23
2.4.1 สารสกัดชนิดกรด.....	23
2.4.2 สารสกัดชนิดเบส.....	23
2.4.3 สารสกัดชนิดซอลเวท.....	24
2.5 กลไกการถ่ายเทมวล.....	25
2.5.1 การถ่ายเทแบบสวนทาง (Counter-Transport).....	25
2.5.2 การถ่ายเทแบบไปทางเดียว (Co-Transport).....	26
2.6 ขั้นตอนการถ่ายเทมวลของไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลว.....	27
2.7 ปฏิริยาการสกัดไอออนสังกะสี.....	30
2.7.1 สมการการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด D2EHPA.....	30
2.7.2 สมการการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด Cyanex 272.....	30
2.7.3 สมการการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด TBP.....	31
2.8 ทฤษฎีการคำนวณค่าคงที่การถ่ายเทมวลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	31
2.8.1 การคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ.....	31
2.8.2 การคำนวณค่าดัชนีการคัดเลือกต่อการสกัดไอออนสังกะสี (Selective index) และค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสี (Separation factor).....	31
2.8.3 ค่าคงที่สมดุลของปฏิริยาการสกัดของไอออนสังกะสี (Extraction equilibrium constant, K_{ex}).....	32
2.8.4 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient, D).....	32
2.8.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient, P).....	32
2.8.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient).....	34

2.8.7	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแยกไอออนสังกะสีด้วยระบบ เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	36
2.8.8	ค่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่ (Flux).....	38
2.8.9	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อ แผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	39
2.8.9.1	แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยา.....	39
2.8.9.2	แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของการพา.....	40
2.8.9.3	แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาและ การพา.....	40
บทที่ 3	สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	47
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.3	วิธีการทดลอง.....	50
3.3.1	ผลของชนิดสารสกัด.....	50
3.3.2	ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่มีผลต่อการสกัดไอออน สังกะสี.....	50
3.3.3	ความเข้มข้นของสารสกัดที่มีผลต่อการสกัดไอออนสังกะสี.....	51
3.3.4	ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่มีผลต่อการนำกลับไอออน สังกะสี.....	51
3.3.5	อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่มีผลต่อ การสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสี.....	52
3.3.6	ชนิดของตัวทำละลายที่มีผลต่อร้อยละการสกัด ร้อยละการนำกลับและ อายุการใช้งาน.....	53
3.3.7	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ ไอออนสังกะสี.....	53
3.3.8	ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสี.....	54
3.4	ขั้นตอนการเตรียมวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว.....	55
3.5	ขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลวง.....	55

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	56
4.1 ผลการทดลอง.....	56
4.1.1 ผลของชนิดสารสกัด.....	56
4.1.2 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออน โลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	58
4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อประสิทธิภาพการสกัด ไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	59
4.1.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกต่อประสิทธิภาพ การสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	61
4.1.5 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อ ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่น เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	62
4.1.6 ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ ของไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลวงและอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว.....	64
4.1.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนต่อ ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วย เส้นใยกลวง โดยใช้ตัวทำละลายโทลูอิน.....	67
4.1.8 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสี ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	68
4.2 การประยุกต์แบบจำลองการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลว พุงด้วยเส้นใยกลวงกับผลการทดลอง.....	70
4.2.1 การคำนวณค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยา การสกัดไอออนสังกะสี.....	70
4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออน สังกะสี.....	72
4.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในสาร สารละลายป้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อน ของสังกะสีในเยื่อแผ่นเหลวของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี.....	75

	หน้า
4.2.4 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่.....	78
4.2.5 อุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่.....	79
4.2.6 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการแยกไอออนสังกะสีด้วยระบบเชื้อ แผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	80
4.2.6.1 แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยา.....	80
4.2.6.2 แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของการพา.....	82
4.2.6.3 แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยา และการพา.....	84
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ.....	100
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบและผลการทดลอง.....	111
ภาคผนวก ค ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2.....	124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	126

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	แสดงคุณสมบัติทั่วไปของสังกะสี..... 3
ตารางที่ 1.2	เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งของ กระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต..... 7
ตารางที่ 1.3	เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสี..... 13
ตารางที่ 3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 47
ตารางที่ 3.2	สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลางพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง..... 49
ตารางที่ 4.1	ผลของชนิดของสารสกัดต่อการแยกไอออนสังกะสี..... 58
ตารางที่ 4.2	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) ของ ปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ใน สารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลางเท่ากับร้อยละ 8.3 โดย ปริมาตรของตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ..... 75
ตารางที่ 4.3	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อน (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อ แผ่นเหลว (k_m) ของตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ..... 78
ตารางที่ 4.4	อันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา..... 84
ตารางที่ 4.5	เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการสกัดของไอออนสังกะสี โดยใช้สารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโทลูอิน..... 86
ตารางที่ 5.1	ผลลัพธ์จากการทดลองเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมไทย..... 90
ตารางที่ 5.2	ค่าองค์ประกอบของไอออนโลหะในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร..... 90
ตารางที่ ข-1	ผลของชนิดของสารสกัดที่มีต่อร้อยละการสกัดไอออน โลหะด้วยเยื่อแผ่น เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง..... 111
ตารางที่ ข-2	ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อร้อยละการสกัด ไอออน โลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง..... 112
ตารางที่ ข-3	ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อประสิทธิภาพการสกัด ไอออน โลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง..... 113

ตารางที่ ข-4	ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกต่อประสิทธิภาพการสกัด ไอออน โลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	114
ตารางที่ ข-5	ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	115
ตารางที่ ข-6	ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละการนำกลับด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง.....	116
ตารางที่ ข-7	ผลของชนิดของตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนต่ออายุการใช้งาน.....	117
ตารางที่ ข-8	ผลของชนิดของตัวทำละลายโทลูอีนต่ออายุการใช้งาน.....	118
ตารางที่ ข-9	ผลของชนิดของตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนต่ออายุการใช้งาน.....	119
ตารางที่ ข-10	ผลของชนิดของตัวทำละลายเฮปแทนต่ออายุการใช้งาน.....	120
ตารางที่ ข-11	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ.....	121
ตารางที่ ข-12	ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ.....	122
ตารางที่ ข-13	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในช่วงร้อยละ 1.7-8.3 โดยปริมาตร.....	123

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 มอดูลของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและลักษณะการไหลแบบ สวนทางของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ	19
ภาพที่ 2.2 ระบบปฏิบัติการแบบกะ สำหรับการไหลของสารละลายป้อนและสารละลาย นำกลับสวนทางกัน	20
ภาพที่ 2.3 ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง สำหรับการไหลของสารละลายป้อนและ สารละลายนำกลับสวนทางกัน	21
ภาพที่ 2.4 ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง สำหรับการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับสวนทางกัน	22
ภาพที่ 2.5 แผนผังทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมของ การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง	26
ภาพที่ 2.6 แผนผังทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมของ การถ่ายเทมวลแบบทางเดียวกัน	27
ภาพที่ 2.7 กลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียม ผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลว	28
ภาพที่ 2.8 กลไกการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สาร สกัด D2EHPA	30
ภาพที่ 2.9 แสดงการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในฝั่งท่อของมอดูลเส้นใยกลวง	41
ภาพที่ 2.10 แสดงการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในฝั่งเปลือกของมอดูลเส้นใยกลวง	44
ภาพที่ 3.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารสกัด D2EHPA	47
ภาพที่ 3.2 Liqui-Cel [®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของ บริษัท Hoechst Celanese Corporation	48
ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส EUTECH instrument รุ่น cyberscan pH310	48
ภาพที่ 3.4 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280FS	49
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสี ไอออนนิกเกิล และ ไอออนแมงกานีสกับชนิดของสารสกัด	57

ภาพที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบส ของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของไอออน โลหะในช่วงความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1.0-5.0.....	59
ภาพที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวกับร้อยละการสกัดของไอออน โลหะ ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ ร้อยละ 1.7-10.0 โดยปริมาตร.....	60
ภาพที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกกับร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะ ในช่วงความเข้มข้น 0.05-0.15 โมลต่อลิตร.....	61
ภาพที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสีกับอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ.....	63
ภาพที่ 4.6	ผลการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ....	66
ภาพที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด D2EHPA ในตัวละลายชนิดต่างๆ กับเวลา.....	66
ภาพที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสีกับชนิดของตัวทำละลายและอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวกับชนิดของตัวทำละลาย.....	67
ภาพที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะ.....	68
ภาพที่ 4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะ.....	69
ภาพที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[Zn^{2+}][(RH)_2]^{3/2}$ และ $[ZnR_2RH][H^+]^2$ ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวร้อยละ 1.7-10.0 โดยปริมาตรที่ตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	72
ภาพที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln(C_f / C_{f0})$ กับเวลา ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในช่วงร้อยละ 1.7-8.3 โดยปริมาตร ที่ตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	74
ภาพที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/P$ และ $1/([(RH)_2]^{3/2}/[H^+]^2)$ สำหรับตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	77
ภาพที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่และความเข้มข้นเริ่มต้น.....	79

ภาพที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่กับอุณหภูมิที่มีผลต่อการสกัด.....	80
ภาพที่ 4.16	กราฟความสัมพันธ์ $1/C_e$ และ $1/q_e$ ของแบบจำลองแลงเมียร์เพื่อหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของแลงเมียร์ (K_L) และค่าการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (Q_0).....	81
ภาพที่ 4.17	กราฟความสัมพันธ์ $\log C_e$ และ $\log q_e$ ของแบบจำลองฟรุนดริชเพื่อหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของฟรุนดริช (K_F) และ ค่าคงที่ของฟรุนดริช (n_F).....	81
ภาพที่ 4.18	เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของแลงเมียร์และแบบจำลองของฟรุนดริช.....	82
ภาพที่ 4.19	กราฟความสัมพันธ์ $\ln(C/C_{f,0})$ และเวลาของแบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของการพา.....	83
ภาพที่ 4.20	เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของการพาของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา.....	83
ภาพที่ 4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนสังกะสีต่อเวลาของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี.....	85
ภาพที่ 4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนสังกะสีต่อเวลาของปฏิกิริยาการนำกลับไอออนสังกะสี.....	85
ภาพที่ 4.23	เปรียบเทียบร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสีระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันค่าต่างๆ.....	86

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	ค่าแฟกเตอร์ความถี่
A	พื้นที่การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว
A_{cf}	พื้นที่หน้าตัดขวางของฝัองสารละลายป้อน
A_{cs}	พื้นที่หน้าตัดขวางของฝัองสารละลายนำกลับ
C	ความเข้มข้นของไอออนโลหะใดๆ
C_f^*	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
C_s^*	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว
C_{Af}	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ต้องการในสารละลายป้อน
C_{As}	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ต้องการในสารละลายนำกลับ
C_e	ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของไอออนโลหะ
C_f	ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่เวลาใดๆ
$C_{f,0}$	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน
$C_{f,out}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาออก
$C_{i,s}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ
$C_{s,0}$	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ
$C_{s,out}$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับขาออก
D	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย
D^*	สัมประสิทธิ์การแพร่
d_0	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางภายนอกของเส้นใยกลวง
D_e	Effective diffusivity ในวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว
E_a	พลังงานก่อกัมมันต์
Ex	การสกัด
H^+	ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเนียม
HR	ความเข้มข้นของสารสกัด

สัญลักษณ์ **ความหมาย**

J	ค่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่ (Flux)
k'_f	ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาการสกัด
k'_{-f}	ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาการสกัด
k'_s	ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาการนำกลับ
k'_{-s}	ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาการนำกลับ
k_B	ค่าคงที่ของ Boltzman
K_{ex}	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัด
K_F	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของฟรุนดริช
k_f	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในสารละลายป้อน
K_L	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของแลงเมียร์
k_m	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออน โลหะในเยื่อแผ่นเหลว
k_s	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในสารละลายนำกลับ
L	ความยาวของเส้นใยกลวง
l_{if}	ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
l_{is}	ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว
M	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ
m	อันดับปฏิกิริยาของปฏิกิริยาการนำกลับ
MR	ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน
N	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล
n	อันดับปฏิกิริยาของปฏิกิริยาการสกัด
n_F	ค่าคงที่ของฟรุนดริช
P	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน
P_c	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนโลหะที่ถูกดึงออกจากสารละลายป้อน
P_m	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว
Q_0	การดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว

สัญลักษณ์ **ความหมาย**

q_e	จำนวนของไอออนโลหะที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารสกัดที่ความเข้มข้นสมดุล
q_f	อัตราการไหลของสารละลายป้อน
q_s	อัตราการไหลของสารละลายนำกลับ
R	ค่าคงที่ของก๊าซเท่ากับ 8.314 จูลต่อโมลต่อเคลวิน
r	รัศมีโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน
r_o	รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง
r_i	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง
r_{lm}	รัศมี log-mean ของเส้นใยกลวง
St	การนำกลับ
T	อุณหภูมิ
t	เวลา
V_f	ปริมาตรของสารละลายป้อน
V_s	ปริมาตรของสารละลายนำกลับ

อักษรกรีก

η	ความหนืดของสารละลายในเชื้อแผ่นเหลว
π	ค่าคงที่ในสมการ Stokes และ Einstein เท่ากับ 3.1416
\mathcal{E}	ความพรุนของเส้นใยกลวง
τ	เวลาในเทอมไร้นหน่วย

ตัวห้อย

A	ไอออนโลหะที่ต้องการ
aq	สารละลายน้ำ
$Expt.$	การทดลอง
F	ฟรอนตริช
f	สารละลายป้อน

สัญลักษณ์ **ความหมาย**

<i>if</i>	ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเชื้อแผ่นเหลว
<i>is</i>	ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเชื้อแผ่นเหลว
<i>L</i>	แลงเมียร์
<i>lm</i>	log-mean
<i>m</i>	สารละลายเชื้อแผ่นเหลว
<i>Mn</i>	ไอออนแมงกานีส
<i>Ni</i>	ไอออนนิกเกิล
<i>s</i>	สารละลายนำกลับ
<i>st</i>	การนำกลับ
<i>Theo.</i>	ทฤษฎี
<i>org</i>	สารละลายอินทรีย์
<i>Zn</i>	ไอออนสังกะสี

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

สังกะสีเป็นหนึ่งในโลหะหนักมีพิษ ที่มีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม จากการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ว่า มลภาวะจากการปนเปื้อนสังกะสีอันเกิดจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรม กำลังสร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและอาชีวอนามัยของมนุษย์เนื่องจากสังกะสีนั้นไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถถูกดูดซับได้โดยพืชทำให้สังกะสีนั้นเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารเกิดการสะสมในร่างกายมนุษย์ส่งผลให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ อาทิเช่น การส่งสัญญาณของระบบประสาท สมองชา คลื่นไส้ และภาวะโลหิตจาง หากได้รับในปริมาณที่มากเกินไป (Baraket, 2011) ประกอบกับอุตสาหกรรมที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศยังคงต้องการโลหะ อีกทั้งมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปริมาณสินแร่ในธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดลดลงไปทุกขณะทำให้การปนเปื้อนสังกะสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมกลายเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อทรัพยากรและเศรษฐกิจของชาติ

สังกะสีในรูปของสารประกอบฟอสเฟต ($Zn_3(PO_4)_2$) คือผลิตภัณฑ์เคลือบอยู่บนผิวโลหะ เป็นผลจากกระบวนการที่เรียกว่า การเคลือบผิวด้วยสังกะสีฟอสเฟต (zinc phosphate coating) ซึ่งไอออนโลหะที่นำมาใช้จะอยู่ในสภาพสารละลายกรดแล้วทำให้เจือจางในน้ำ หัวใจหลักในการเคลือบผิวโลหะด้วยสังกะสีฟอสเฟตคือ เพิ่มคุณสมบัติด้านการยึดเกาะเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนและความชื้น (Jegannathan และคณะ, 2006) ดังนั้นกระบวนการเคลือบผิวด้วยสังกะสีฟอสเฟต จึงถูกใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์และงานใช้ภายนอก โดยน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยสังกะสีฟอสเฟตมาจากขั้นตอนการล้างน้ำเพื่อชะเอาเคมีที่คงค้างอยู่บนผิวโลหะออกและเป็นการช่วยยุติปฏิกิริยาเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายหรือปล่อยน้ำล้างในสันออกตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีปริมาณน้ำทิ้งจำนวนมากและพบว่ามีค่าความเข้มข้นของไอออนสังกะสีอยู่ที่ประมาณ 15-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกินค่ามาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมประเทศไทยที่กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของไอออนสังกะสีในน้ำทิ้งมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2539) จาก

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยอันเนื่องมาจากการได้รับสังกะสีในอาหารและแหล่งน้ำธรรมชาติที่มากเกินไป จึงได้มีการคิดค้นพัฒนาและวิจัยเพื่อหาวิธีการต่างๆ ในการกำจัดไอออนสังกะสี ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้ การตกตะกอนด้วยสารเคมี การทำให้ลอย การดูดซับ การแลกเปลี่ยนประจุ การรีเวอร์สออสโมซิส และการกรองผ่านเยื่อแผ่นเป็นต้น ซึ่งในประเทศไทยนิยมบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีมากที่สุด (Charerntanyarak, 1999) เนื่องจากต้นทุนการลงทุนต่ำและปฏิบัติงานได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังคงมีข้อเสียอยู่มากคือ มีค่าการเลือกสกัดต่ำ สิ้นเปลืองสารเคมี ก่อให้เกิดกากตะกอนจำนวนมาก ทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนมาก (Bose และคณะ, 2002)

จากเหตุผลข้างต้น เพื่อรองรับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทย สนับสนุนการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดควบคู่กับการรักษาสภาพแวดล้อม และลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพของประชากรไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการแยกไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมยานยนต์ด้วยผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นในกลาง (hollow fiber supported liquid membrane) ซึ่งเป็นเทคนิคการแยกที่มีประสิทธิภาพสูง ผน ความเข้มข้นต่ำ (He และคณะ, 2006; Valenzuela และคณะ, 1999) ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน ซึ่งระบบนี้เหมาะสมต่อการรองรับปริมาณน้ำทิ้งเป็นจำนวนมาก อีกทั้งผลิตผลทางอ้อม (by product) คือสารละลายนำกลับที่สามารถทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ โดยงานวิจัยนี้เลือกกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) เป็นสารละลายนำกลับ ซึ่งผลิตผลทางอ้อมที่ได้จะเป็นสารละลายไอออนสังกะสีในกรดซัลฟูริก ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นของกระบวนการชุบโลหะได้ เพื่อให้งานวิจัยนี้เป็นแรงจูงใจต่อการขยายผลต่อภาคอุตสาหกรรม จึงเลือกศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ต้นทุนที่สามารถยอมรับได้ นั่นคือเลือกสารเคมีที่หาง่าย ราคาถูก ประสิทธิภาพสูง มาเป็นวัตถุดิบ และศึกษาอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวภายใต้ความแตกต่างของชนิดตัวทำละลาย โดยปัจจัยที่มีผลต่อการแยกไอออนสังกะสีที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะเป็นพื้นฐานอันสำคัญยิ่งต่อการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อสนับสนุนต่อการลงทุนต่อไป

1.2 ประวัติความเป็นมา

มีการค้นพบแร่สังกะสีเมื่อหลายร้อยปีก่อนในรูปของโลหะ เพื่อประโยชน์ในการนำไปเป็นส่วนผสมของทองเหลืองและทองแดง ต่อมา มีการค้นพบว่าแร่สังกะสีนั้นมีประโยชน์ต่อการรักษาอาการปวดและระคายเคืองตา มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต อันด้วยประโยชน์ดังกล่าว ทำให้สังกะสีเป็นแร่ที่มีความสำคัญสืบเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน โดยคุณสมบัติทั่วไปของสังกะสีแสดงได้ดังตารางที่ 1.1 (Othmer, 2005)

ตารางที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของสังกะสี

หัวข้อ	คุณสมบัติ
ชื่อ, สัญลักษณ์	สังกะสี (Zinc), Zn
เลขอะตอม	30
มวลอะตอม	65.38
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน

1.3 ประโยชน์ของสังกะสี

แร่สังกะสี (zinc mineral) เป็นแร่โลหะชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ประกอบด้วยธาตุต่างๆ โดยมีธาตุสังกะสีเป็นหลักธาตุซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต ทั้งคน สัตว์ และพืช เมื่อนำแร่สังกะสีมาถลุงจะได้โลหะที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย จึงนับเป็นแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจที่สำคัญ โดยประโยชน์ของแร่สังกะสีสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ

1.3.1 ประโยชน์ของสังกะสีต่อสิ่งมีชีวิต

สังกะสีมีคุณสมบัติช่วยสร้างระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายให้อยู่ในระดับปกติสร้างเซลล์ผิวหนังที่ตายแล้วให้เกิดขึ้นใหม่ ช่วยป้องกันแสงอุลตราไวโอเล็ต ถนอมผิวมิให้เหี่ยวย่นง่าย ทำให้แผลหายเร็ว และช่วยกระตุ้นสมองให้ทำงานดีขึ้น เด็กที่ได้รับธาตุสังกะสีอย่างพอเพียงจะช่วยให้มีความจำดี โตเร็ว สุขภาพแข็งแรง สำหรับพืชธาตุสังกะสีจะช่วยให้การเจริญเติบโตและเสริมสร้างชีวเคมีให้กับพืชทำให้ติดโรคได้ยาก (Johnson และคณะ, 2007)

1.3.2 ประโยชน์ของสังกะสีต่อด้านอุตสาหกรรม

สังกะสีเป็นโลหะที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างหลากหลาย โดยร้อยละ 59 ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมชุบสังกะสี เพื่อช่วยชะลอเหล็กให้มีอายุการใช้งานยาวนานออกไป ร้อยละ 16 ใช้ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ และอีกร้อยละ 25 ถูกนำไปใช้อย่างหลากหลาย เช่น นำไปใช้ผสมโลหะ และทำแบตเตอรี่ เป็นต้น

1.3.2.1 บทบาทของสังกะสีต่อการเตรียมผิวเหล็กในอุตสาหกรรมยานยนต์

กระบวนการเตรียมผิวเหล็กเรียกโดยทั่วไปเรียกว่ากระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนลักษณะของโลหะให้มีคุณสมบัติเป็นโลหะ เพื่อให้ไม่นำไฟฟ้า และเป็น การเคลือบผิวขั้นต้น โดยมีวัตถุประสงค์หลักสำคัญ 4 ประการ คือ

1. เพื่อเตรียมผิวสำหรับการเคลือบพลาสติก
2. เพื่อปรับสภาพผิวสำหรับกระบวนการต่อไปนี้ คือ ขึ้นรูปเย็น (cold extrusion) การลดแรงเสียดทานของลูกปืน และการหล่อขึ้น
3. เพื่อปรับปรุงความทนทานต่อการผุกร่อน โดยฟิล์มฟอสเฟตจะเป็นร่องพื้นที่ดีสำหรับ จี๊สและน้ำมันกันสนิม
4. เพื่อปรับสภาพผิวของโลหะให้พร้อมที่จะรับการเคลือบสี และเพื่อป้องกันการผุกร่อน ให้ฟิล์มสี

1.3.2.2 บทบาทของสังกะสีต่อการชุบผิวเหล็กในอุตสาหกรรมยานยนต์

กระบวนการเตรียมชุบผิวเหล็กด้วยไฟฟ้า เรียกโดยทั่วไปว่า กระบวนการอิเล็กโทรเพลตติ้ง (electroplating) เป็นการเคลือบผิวโลหะชนิดหนึ่งลงบนโลหะอีกชนิดหนึ่ง โดยอาศัยกระแสไฟฟ้าเป็นตัวบังคับ ให้ประจุโลหะเคลื่อนที่ผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ไปยังโลหะเป้าหมายอีกชนิด เพื่อทำการเคลือบ โดยมีวัตถุประสงค์หลักสำคัญ 3 ประการ คือ

1. เพื่อความสวยงาม
2. เพื่อป้องกันการผุกร่อน
3. เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของผิวชิ้นงาน

1.4 ความเป็นพิษของสังกะสี

อดีตความเป็นพิษจากสังกะสีสู่ร่างกายมนุษย์ไม่เคยปรากฏในทางการแพทย์ จนกระทั่งได้มีการปรากฏอาการผิดปกติทางร่างกายของแรงงานที่ประกอบอาชีพในอุตสาหกรรมการเชื่อมหลอมหรืออุตสาหกรรมหลอมเหลวโลหะ ซึ่งได้รับสังกะสีจากการสูดดมในรูปของโลหะออกไซด์ทำให้เกิดโรคจากการทำงานที่รู้จักกันในนาม ไซค์วันโลหะ ลักษณะอาการจะเกิดหลังจากการได้รับสารพิษไปแล้วหลายชั่วโมง โดยจะมีลักษณะมีไข้หนาวสั่น เหงื่อออกมาก หายใจลำบากและปวดหน้าอก ซึ่งอาการเหล่านี้จะหายไปขึ้นอยู่กับภูมิคุ้มกันร่างกายของแต่ละคน โดยอาการถาวรเมื่อได้รับสารพิษจากสังกะสีเป็นเวลานานก็คือค่าการทำงานของปอดจะต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่าพิษของสังกะสีสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ทางอาหารและเครื่องดื่ม ซึ่งอาการจะปรากฏเมื่อได้รับสังกะสีที่มากเกินไปโดยมีอาการต่างๆ ดังต่อไปนี้ (Baraket, 2011)

1. ภูมิคุ้มกันร่างกายเสื่อมเพราะสังกะสี ขัดขวางไม่ให้ร่างกายใช้ธาตุทองแดงได้เต็มที่ เป็นผลให้ระดับทองแดงในเลือดต่ำทำให้เกิดอาการเม็ดเลือดขาวต่ำ
2. ถ้าร่างกายได้รับสังกะสีเกินกว่า 2 กรัมขึ้นไป จะเกิดอาการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหารแบบเฉียบพลันทำให้ปวดท้องและอาเจียนได้
3. ในกรณีที่บริโภคมากกว่าวันละ 100 มิลลิกรัม เป็นเวลานานจะทำให้ระดับไขมัน HDL (high-density lipoprotein) ซึ่งเป็นไขมันชนิดดีลดลง

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งของกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต

Bockholt และ Schuster

ได้ทำการศึกษาการแยกไอออนสังกะสี ไอออนนิกเกิล และไอออนแมงกานีส ออกจากน้ำทิ้งของกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมของประเทศเยอรมัน โดยใช้วิธีวิทยาของเหลวบนตัวรองรับพอลิเมอร์ (liquid-phase polymer-based retention) วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองคือพอลิเอทีอีเอ็ม (polyethylenimine) ผลลัพธ์คือสามารถแยกไอออนโลหะได้มากกว่าร้อยละ 99 ทำให้สามารถนำสารละลายกรดฟอสฟอริกกลับไปใช้ในกระบวนการได้ (Bockholt และ Schuster, 2008)

Kobyia และคณะ

ได้ศึกษาการแยกไอออนโลหะออกจากน้ำทิ้งของกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต โดยองค์ประกอบของน้ำทิ้งในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ไอออนสังกะสี ไอออนนิกเกิล ไอออนทองแดง และไอออนโครเมียม เนื่องจากมีโลหะหนักเป็นพิษผสมอยู่มากจึงเลือกใช้วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (electrocoagulation หรือ EC) ผลลัพธ์คือสามารถแยกไอออนโลหะทั้งหมดได้มากกว่าร้อยละ 95 ภายในเวลา 25 นาที ทำให้สามารถนำเอาสารละลายกรดฟอสฟอริกกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตได้จากนั้นนำโลหะไปละลายในกรดซัลฟูริก แล้วทำการแยกโดยไฟฟ้าอีกครั้ง ทำให้ได้ไอออนสังกะสีกลับคืนมา ภายในเวลา 15 นาที เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต (Kobyia และคณะ, 2010)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งของกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟตสามารถแสดงการเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ดังตารางที่ 1.2

1.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสี

Kunungo และ Mohapatra

ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การแพร่ซึมของไอออนสังกะสี (Zn^{2+}) ผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพุงเป็นแบบชนิดแผ่น (supported liquid membrane หรือ SLM) ซึ่งประกอบด้วย Bis(2,4-trimethyl penthyl) phosphoric acid หรือ cyanex 272 เป็นสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีน ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่ (flux) ของการข้ามผ่านเยื่อแผ่นเหลวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนสังกะสีและไอออนไฮโดรเจน ในสารละลายป้อนและความเข้มข้นของสารสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวพบว่าที่ความเข้มข้นของสารสกัดสูงและค่าความเป็นกรด-เบสสูง ค่าอัตราการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีสามารถอธิบายได้โดยการแพร่ของอนุพันธ์ $ZnL_2(HL)$ และ $ZnL_2(HL)_2$ ที่ความเข้มข้นของสารสกัดและค่าความเป็นกรด-เบสต่ำ ขึ้นกำหนดอัตราจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสของอนุพันธ์ ZnL_2 และ $ZnL_2(HL)$ (Kunungo และ Mohapatra, 1995)

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งของกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต

ปี	ชื่อผู้วิจัย	วิธีการ	วัตถุประสงค์	ข้อดี	ข้อเสีย
2008	Bockholt และ Schuster	วิฤภาคของเหลวบน ตัวรองรับพอลิเมอร์	- นำกลับสารละลาย กรดฟอสฟอริก	- ลดปริมาณน้ำทิ้งอุตสาหกรรม - ลดต้นทุนด้านวัตถุดิบ - ค่าการสกัดแยกไอออนโลหะสูง - ต้นทุนด้านการปฏิบัติการต่ำ	- ค่าการคัดเลือกสกัดต่ำ - ใช้เวลานาน - ใช้อุปกรณ์จำนวนมาก
2010	Kobyta และคณะ	แยกด้วยไฟฟ้า	- นำกลับสารละลาย กรดฟอสฟอริก - ต้องการนำไอออน สังกะสีไปใช้ประโยชน์	- ลดปริมาณน้ำทิ้งอุตสาหกรรม - ลดต้นทุนด้านวัตถุดิบ - ค่าการสกัดแยกไอออนโลหะสูง	- ไม่มีค่าการคัดเลือกสกัด - ปฏิบัติการหลายขั้นตอน - ต้นทุนการปฏิบัติการสูง
2013 (งานวิจัยนี้)	กฤติยา	เยื่อแผ่นเหลวที่พอง ด้วยเส้นใยกลาง	- นำกลับสารละลาย กรดฟอสฟอริก - นำสารละลายนำกลับ ในรูปไอออนสังกะสีใน กรดซัลฟูริก ไปเป็นสาร ตั้งต้นของกระบวนการ ชุบโลหะ	- ลดปริมาณน้ำทิ้งอุตสาหกรรม - ลดต้นทุนด้านวัตถุดิบ - ค่าการสกัดและการคัดเลือก ไอออนโลหะสูง - ปฏิบัติการเสร็จสิ้นในขั้นตอนเดียว - อุปกรณ์ติดตั้งง่ายใช้พื้นที่น้อย - ต้นทุนการปฏิบัติการต่ำ	- ไม่พบข้อมูลด้านอายุการ ใช้งานอย่างชัดเจน - สารสกัดมีราคาแพง

Bart และ Rasselle

ได้ศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การสกัดของ $ZnSO_4/D2EHPA/isododecane$ ภายใต้วิธีการสกัดด้วยของเหลว ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเพื่อรักษาสภาพของแรงตึงผิว จากนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรอื่น เช่น ความหนาแน่นและความหนืดโดยวัดผลผ่านสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์มีผลน้อยมากที่ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีต่ำ แต่จะมีผลอย่างมากในการที่ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีสูง เนื่องจากส่งผลต่อความต้านทานต่อการแพร่ของสารประกอบอินทรีย์ (Bart และ Rausselle, 1999)

Mansur และคณะ

ได้ศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การสกัดของ $ZnSO_4/D2EHPA/n-heptane$ ภายใต้วิธีการสกัดด้วยของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งผู้วิจัยได้มุ่งเน้นด้านการหาแบบจำลองของค่าคงที่สมดุล โดยค่าสัมประสิทธิ์สมดุลมวล (stoichiometric coefficient) ของเฮปเทนมีค่าเท่ากับ 1.5 แต่ในกรณีของโคเคเคนจะมีค่าเท่ากับ 2.0 โดยโมเดลที่ผู้วิจัยค้นพบมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 11 (Mansour และคณะ, 2002)

Ata และคณะ

ได้ศึกษาปัจจัยที่มีต่อการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีผ่านเยื่อแผ่นเหลวซึ่งสารละลายที่นำมาศึกษานั้นประกอบด้วยไอออนสังกะสี ไอออนเหล็ก ไอออนแคลเซียม และไอออนแมกนีเซียม โดยใช้ D2EHPA เป็นสารสกัด ผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะ โดยให้สารละลายป้อนมีค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 0.5-3.0 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดไฮโดรคลอริกอยู่ที่ 0.5-3.5 โมลต่อลิตร ช่วงของอุณหภูมิอยู่ที่ 283-328 เคลวิน ความเข้มข้นของสารสกัดในช่วงร้อยละ 16-32 โดยปริมาตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดเท่ากับ 1-7 ลิตรต่อนาที โดยผู้วิจัยพบว่าในช่วงความเป็นกรด-เบส ที่ทำการศึกษาจะไม่มีถ่ายเทมวลของไอออนแมกนีเซียม และไอออนแคลเซียม แต่จะมีการถ่ายเทมวลของไอออนเหล็กในทิศทางร่วมกับไอออนสังกะสี นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของสารสกัดไม่มีผลต่อการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีเมื่อเทียบกับไอออนของแมกนีเซียม ไอออนแคลเซียม และไอออนเหล็ก ในขณะที่อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบสของวัฏภาคสารละลายป้อน อัตราการไหลของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ มีผลต่อการถ่ายเท

มวลของไอออนสังกะสี โดยผู้วิจัยกล่าวว่าว่าสารสกัดชนิด D2EHPA มีความจำเพาะในการถ่ายเท ไอออนสังกะสีผ่านเยื่อแผ่นเหลว (Ata และคณะ, 2004)

He และคณะ

ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทมวลและการแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลว โดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดดังนี้ พื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นเหลว อัตราการถ่ายเทมวลองค์ประกอบของเยื่อแผ่นเหลว และความเป็นกรด-เบส ในวัฏภาคสารละลายป้อน ซึ่งพบว่าการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีเป็นการถ่ายเทมวลแบบคู่ควบสวนทางกันกับไอออนไฮโดรเนียมและไอออนสังกะสีสามารถแยกตัวได้เร็วจากไอออนทองแดง โดยการสกัดของ D2EHPA ในวัฏภาคเยื่อแผ่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อ ความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 2.0-2.5 (He และคณะ, 2006)

Mellah และ Benachour

ศึกษาการสกัดไอออนสังกะสี และไอออนแคดเมียม จากสารละลายกรดฟอสฟอริก โดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามีดังนี้ ความเข้มข้นของสารสกัด อัตราส่วนระหว่างสารอินทรีย์ต่อสารละลาย (O/A) และค่าความเป็นกรด-เบสที่สมดุล โดยผู้วิจัยพบว่าทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อการสกัดไอออนสังกะสี โดยที่ความเข้มข้นของสารสกัด 0.1-0.3 โมลต่อลิตร จะให้ค่าการสกัดของไอออนสังกะสีอยู่ที่ร้อยละ 62.8-94.9 ที่อัตราส่วนระหว่างสารอินทรีย์ต่อสารละลาย (O/A) ระหว่าง 1/8 ถึง 1/1 จะให้ค่าการสกัดของไอออนสังกะสีอยู่ที่ร้อยละ 53-95 และค่าความเป็นกรด-เบสที่สมดุลอยู่ในช่วง 0.5-2.0 จะให้ค่าการสกัดของไอออนสังกะสีอยู่ที่ร้อยละ 20.50-95.25 (Mellah และ Benachour, 2006)

Pereira และคณะ

ได้ศึกษาการนำกลับไอออนสังกะสีจากสารละลายกรดซัลฟูริกของอุตสาหกรรมกระดาษ โดยการใช้การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) โดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน ซึ่งงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือการทดลองการสกัดและการนำกลับในห้องปฏิบัติการ และพัฒนาสู่ระบบที่สามารถใช้งานได้จริงในภาคอุตสาหกรรม โดยใช้รูปแบบระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง ในการวิจัยในห้องปฏิบัติการผู้วิจัยได้ปรับค่าสถานะต่างๆ ในการสกัดไอออนสังกะสีดังนี้ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนในช่วง 0.5-5.0 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ร้อยละ 5-50 โดยน้ำหนักและสัดส่วน โดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อน

กับสารสกัดในช่วง 1/5–5/1 สำหรับกระบวนการนำกลับสกัดส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลาย นำกลับกับสารสกัดในช่วง 1/1–10/1 โดยผู้วิจัยพบว่าที่สถานะความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1.5 ความสามารถในการสกัดของไอออนเป็นดังนี้ $Zn >> Ca > Fe \sim Mg \sim Ni \sim Pb > Cd \sim Co \sim Mn$ และที่ 2.5 ความสามารถในการสกัดของไอออนเป็นดังนี้ $Zn >> Fe > Pb \sim Ca \sim Mn \sim Cd > Mg \sim Co \sim Ni$ แล้วได้นำค่าของสถานะต่างๆ ที่กำหนดไว้ทั้งหมด เข้าสู่กระบวนการจริงในภาคอุตสาหกรรม พบว่าเมื่อนำสารละลายจากอุตสาหกรรมซึ่งมีไอออนสังกะสีเป็นองค์ประกอบจะมีความจำเพาะต่อการสกัดอยู่ที่ร้อยละ 98 โดยการผ่านการสกัด 3 ครั้งๆ ที่สถานะความเป็นกรด-เบสที่ 2.5 ความเข้มข้นของสารสกัดเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและ A/O=1 และผ่านการนำกลับ 3 ครั้งๆ ที่ A/O เท่ากับ 4 สุดท้ายแล้วในสารละลายนำกลับจะประกอบด้วยไอออนสังกะสี 125.7 กรัมต่อลิตร (Pereira และคณะ, 2007)

Mellah และ Benachour

ได้ทำการศึกษาการสกัดของไอออนสังกะสี ไอออนแคดเมียม และไอออนโครเมียม จากสารละลายกรดฟอสฟอริก โดยเลือกใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย เลือกใช้สารสกัด TBP ในตัวทำละลายเคโรซีนเป็นสารสกัดพบว่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (distribution coefficient) จะมีค่าสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกอยู่ที่ 5.5 โมลต่อลิตร และมีค่าต่ำสุดที่ 1.0 โมลต่อลิตร จากนั้นได้ทำการเชื่อมโยงสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือ เอนทัลปีเอนโทรปี และค่าพลังงานของกิปลส์ ของการสกัดมาอยู่ในรูปแบบของการคำนวณภายใต้การทำนายผลของค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Mellah และ Benachour, 2007)

Vatidi และคณะ

ได้ศึกษาการนำกลับไอออนสังกะสีจากสารตกค้างหลังการกรองในอุตสาหกรรม โดยเลือกใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายเคโรซีน ซึ่งสารละลายตกค้างนั้นจะอยู่ในรูปของสารละลายกรดซัลฟูริก โดยผู้วิจัยได้ทำการปรับค่าสถานะต่างๆ ดังนี้ความเป็นกรด-เบสความเข้มข้นของสารสกัดอุณหภูมิสกัดส่วนสารสกัดกับสารอินทรีย์ (A/O) ความเข้มข้นของ TBP และ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งผู้วิจัยพบว่าไอออนสังกะสีจะถูกสกัดที่สารละลายป้อนมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2.5 ที่ความเข้มข้นของสารสกัดเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และค่าการสกัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ TBP อยู่ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือ ความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร โดยไอออนสังกะสีจะถูกสกัดที่สัดส่วนสารละลายกับสารอินทรีย์ A/O อยู่ที่ 1/1 (Vahidi และคณะ, 2009)

Avila และคณะ

ได้ทำการศึกษาการนำกลับของไอออนสังกะสี โดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้ Ionquest 290 เป็นสารสกัด สารละลายที่ผู้วิจัยได้นำมาศึกษานั้นมาจากน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมถลุงแร่ ซึ่งประกอบด้วยไอออนสังกะสี ไอออนเหล็ก และไอออนโลหะอื่นๆ โดยหลักนั้นองค์ประกอบอื่นๆ จะถูกกำจัดออกโดยวิธีการตกตะกอน จากนั้นจึงเอาสารละลายไอออนสังกะสีซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักเข้าสู่กระบวนการแยกด้วยตัวทำละลาย โดยผู้วิจัยพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3 เมื่อผ่านสารสกัด Ionquest 290 ที่ละลายในเคโรซีน และที่ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 3 โมลต่อลิตรของกรดซัลฟูริกจะให้ค่าการสกัดสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 95 (Avila และคณะ, 2011)

Vellaichamy และ Palanivelu

ได้ศึกษาการแยกไอออนคอปเปอร์ ไอออนนิกเกิล และไอออนสังกะสี ในรูปสารละลาย โดยวิธีการสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็ง (solid-phase extraction) แบบผนังท่อนานคาร์บอนหลายชั้น (multiwalled carbon nanotubes) ที่อิมมัลชันด้วยสารสกัดผสมระหว่าง D2EHPA และ TOPO โดยผู้วิจัยได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดดังต่อไปนี้ ความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน จำนวนตัวดูดซับอัตราการไหลของสารชะซึ่งในที่นี้คือ 2 โมลต่อลิตรของกรดไนตริก และความเข้มข้นของ D2EHPA-TOPO โดยผู้วิจัยพบว่าสภาวะที่ทำให้เกิดการการดูดซับสูงสุดของ ไอออนคอปเปอร์ ไอออนนิกเกิล และไอออนสังกะสี อยู่ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5.0 ต่อ 500 มิลลิกรัมของตัวดูดซับ และแสดงความสามารถในการดูดซับของ multiwalled carbon nanotubes-D2EHPA-TOPO คือ 4.9 มิลลิกรัมต่อลิตรของไอออนคอปเปอร์ 4.78 มิลลิกรัมต่อลิตรของไอออนนิกเกิลและ 4.82 มิลลิกรัมต่อลิตรของไอออนสังกะสี (Vellaichamy และ Palanivelu, 2011)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสีสามารถแสดงการเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ได้ดังตารางที่ 1.3

1.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

Mortaga และ Krishna

ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นไอออนสังกะสี (Zn^{2+}) ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการกระบวนการชุบโลหะ และพัฒนาส่วนผสมของสารละลายโดยใช้ไอออนโลหะร่วมคือ ไอออน

นิกเกิล (Ni^{2+}) ที่มีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็ก โดยผู้วิจัยพบว่าสารละลายไอออนสังกะสี (Zn^{2+}) ในกรดซัลฟูริกสำหรับเพื่อใช้ในการชุบโลหะ หากมีไอออนนิกเกิล (Ni^{2+}) ผสมลงไปเพียงเล็กน้อย ในสัดส่วนไอออนสังกะสีต่อไอออนนิกเกิลเท่ากับ 90:10 จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไอออนโลหะร่วมที่เป็นนิกเกิล ควรพิจารณาถึงความปลอดภัยควบคู่ เพราะไอออนนิกเกิลเป็นไอออนโลหะที่มีความเป็นพิษสูง (Mortaga และ Krishna, 2005)

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสี พบว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้นยังมีผู้ศึกษาอยู่น้อยมากสำหรับการแยกไอออนสังกะสีจากสารละลายกรดฟอสฟอริก โดยมีการเปรียบเทียบระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับกับเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ (Aguilar และคณะ, 2001) พบว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวนั้นมีความสามารถในการเลือกผ่านและให้ค่าการซึมผ่านที่มากกว่าหมายความว่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลขั้นพื้นฐานระหว่างเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ พบว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมีความหนาแน่นของเยื่อแผ่นต่อหน่วยปริมาตรสูงที่สุด ซึ่งนั่นหมายความว่าไอออนสังกะสีจะมีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูงด้วยเช่นกันนอกจากนี้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงยังมีต้นทุนในการลงทุนที่ต่ำใช้พลังงานต่ำ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่ำ เนื่องจากมีส่วนเคลื่อนที่จำนวนน้อยส่วนสารสกัด และใช้ปริมาณสารสกัดน้อย (อูรา ปานเจริญ, 2551) ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์และด้านประสิทธิภาพการสกัด เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจึงเป็นระบบที่ผู้วิจัยได้เลือกนำมาศึกษาในการแยกไอออนสังกะสี

1.6 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะหลังการสกัดต้องผ่านค่ามาตรฐานกำหนดนำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมประเทศไทย สารละลายกรดฟอสฟอริกหลังการบำบัดต้องมีความเป็นไปได้สูงต่อการนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต และสารละลายนำกลับที่ได้ต้องมีความเป็นไปได้สูงต่อการนำไปพัฒนาเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการชุบโลหะต่อไป
2. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวเพื่อประกอบการพิจารณาด้านการลงทุนและข้อกำหนดการปฏิบัติงานต่อภาคอุตสาหกรรม

ตารางที่ 1.3 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสี

ปี	ชื่อผู้ทำวิจัย	วิธีการ	องค์ประกอบวัฏภาค สารละลายป้อน	วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว		วัฏภาคสารละลาย นำกลับ	ร้อยละ การสกัด	ร้อยละ การนำกลับ
				สารสกัด	ตัวทำละลาย			
1999	Bart และ Rassel	SX	Zn ²⁺	D2EHPA	Iso-Decane	-	-	-
2002	Mansur และคณะ	SX	Zn ²⁺	D2EHPA	n-Heptane	-	-	-
2004	Ata และคณะ	SLM	Zn ²⁺ , Fe ²⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	D2EHPA	Kerosene	HCl	96.8%	-
2006	He และคณะ	SX	Zn ²⁺ , Cd ²⁺	D2EHPA	Kerosene	-	98.0%	>99.0%
2006	Mellah และ Benachour	LLE	Zn ²⁺	D2EHPA	Kerosene	-	>90.0%	-
2007	Pereira และคณะ	LLE	Zn ²⁺ , Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Fe ²⁺ , Pb ²⁺ , Mn ²⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Ni ²⁺ , Cu ²⁺	D2EHPA	Kerosene	H ₂ SO ₄	98.0%	42.0%
2007	Mellah และ Benachour	SX	Zn ²⁺	TBP	Kerosene	-	-	-
2009	Vatidi และคณะ	LLE	Zn ²⁺ , Pb ²⁺ , Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , Ni ²⁺ , Co ²⁺ , Ca ²⁺	D2EHPA +TBP	Kerosene	NaSO ₄	99.0%	-
2011	Avila และคณะ	SX	Zn ²⁺ , Fe ²⁺ , Ca ²⁺ , Mn ²⁺ , Cu ²⁺	Ionquest 290	Kerosene	H ₂ SO ₄	95.0%	-
2011	Vellaichamyetval และ Palanivelu	SPE	Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Ni ²⁺	D2EHPA+ TOPO	Hexane	HNO ₃	>90.0%	-

ตารางที่ 1.3 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสี (ต่อ)

ปี	ชื่อผู้ทำวิจัย	วิธีการ	องค์ประกอบในวัฏภาค สารละลายป้อน	วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว		วัฏภาคสารละลาย นำกลับ	ร้อยละ การสกัด	ร้อยละ การนำกลับ
				สารสกัด	ตัวทำละลาย			
2013 (งานวิจัยนี้)	กฤติยา	HFSLM	Zn ²⁺ , Ni ²⁺ , Mn ²⁺	D2EHPA Cyanex 272 TBP	Dichloromethane Toluene Cyclohexane Heptane	H ₂ SO ₄	-	-

หมายเหตุ

SLM	=	supported liquid membrane	Cyanex 272	=	bis(2,4,4-trimethyl pentyl) phosphinic acid
SX	=	solvent extraction	D2EHPA	=	di-2-ethylhexyl phosphoric acid
LLE	=	liquid-liquid extraction	TBP	=	tri-butyl phosphate
SPE	=	solid phase extraction	Ionquest 290	=	bis(2,4,4-trimethyl pentyl) phosphinic acid
HFSLM	=	hollow fiber supported liquid membrane	TOPO	=	tri-n-octylphospine oxide

1.7 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการสกัดไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง โดยเลือกรูปแบบระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน ให้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน

2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดไอออนสังกะสีดังนี้

- หาชนิดของสารสกัดที่เหมาะสม
- ความเป็นกรด-เบสที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีจากสารละลายโลหะผสมของไอออนนิกเกิลและไอออนแมงกานีสในช่วง 1.0-5.0
- ความเข้มข้นของสารสกัดที่มีผลต่อการสกัดไอออนสังกะสีในช่วงความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 1.7-10.0 โดยปริมาตร
- ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกที่มีผลต่อการร้อยละการสกัดในช่วงความเข้มข้นเท่ากับ 0.05-0.15 โมลต่อลิตร
- ผลของอัตราการไหลของฝั่งสารละลายป้อนและฝั่งสารละลายนำกลับแบบไหลสวนทางกันในช่วงอัตราการไหลเท่ากับ 75-200 มิลลิลิตรต่อนาที
- ศึกษาชนิดของตัวทำละลายที่มีผลต่อระยะเวลาการใช้งาน ได้แก่ ไดคลอโรมีเทน โทลูอีน ไซโคลเฮกเซน และเฮปเทน
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนในช่วงความเข้มข้น 15-65 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ ในช่วงอุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส

3. ศึกษากลไกการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีผ่านแบบจำลองคณิตศาสตร์

1.8 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสีด้วยวิธีการต่างๆ และวิธีการสกัดไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง

2. ศึกษาวิธีการทดลองเตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลอง

3. ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัด ได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ
4. ศึกษาชนิดของตัวทำละลายที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและระยะเวลาการใช้งานซึ่งได้แก่ ไดคลอโรมีเทน โทลูอิน ไซโคลเฮกเซน และเฮปเทน
5. ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนส่งผลต่อร้อยละการสกัด
6. ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับ
7. วิเคราะห์และสรุปผล

1.9 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย

1. องค์ความรู้ในการสกัดไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงสำหรับระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน
2. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานและประสิทธิภาพต่อการสกัด
3. เป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้สู่ภาคอุตสาหกรรม เพื่อดำเนินการพัฒนาในระดับกระบวนการผลิตต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีบท

กระบวนการแยกไอออนโลหะจากสารละลายกำลังเป็นที่สนใจและศึกษาอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange process) การแยกไอออนด้วยไฟฟ้า (metal ions electrolysis process) กระบวนการตกตะกอนไอออนโลหะ (metal ions precipitation process) กระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction process) และกระบวนการแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลว (membrane process) เป็นต้น โดยในแต่ละกระบวนการมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การนำไปใช้จึงควรพิจารณาถึงความเหมาะสมของกระบวนการเป็นสำคัญ สำหรับกระบวนการแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในด้านสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่เกี่ยวกับโลหะหนักที่มีความเป็นพิษเนื่องมาจากกระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการสกัดแยกไอออนโลหะออกจากสารละลาย (Kittisupakorn และคณะ, 2007) เนื่องจากมีราคาถูกมีความหนาแน่นของเยื่อแผ่นต่อหน่วยปริมาตรสูงที่สุด นั่นหมายความว่า ไอออนสังกะสีจะมีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีข้อสรุปเพิ่มเติมเกี่ยวกับข้อดีของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงอีกว่าระบบดังกล่าวมีต้นทุนในการลงทุนที่ต่ำ ใช้พลังงานต่ำค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่ำ เนื่องจากมีส่วนเคลื่อนที่จำนวนน้อยส่วนสารสกัดและตัวทำละลายถึงแม้จะมีราคาค่อนข้างสูงแต่ปริมาณที่นำมาใช้ในการเติมรูพรุนของเยื่อแผ่นเหลวนั้นน้อยมากซึ่งในเชิงเศรษฐศาสตร์ถือว่าคุ้มค่าอย่างมากสำหรับการใช้งานเพื่อการแยกไอออนโลหะ

2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane process) ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

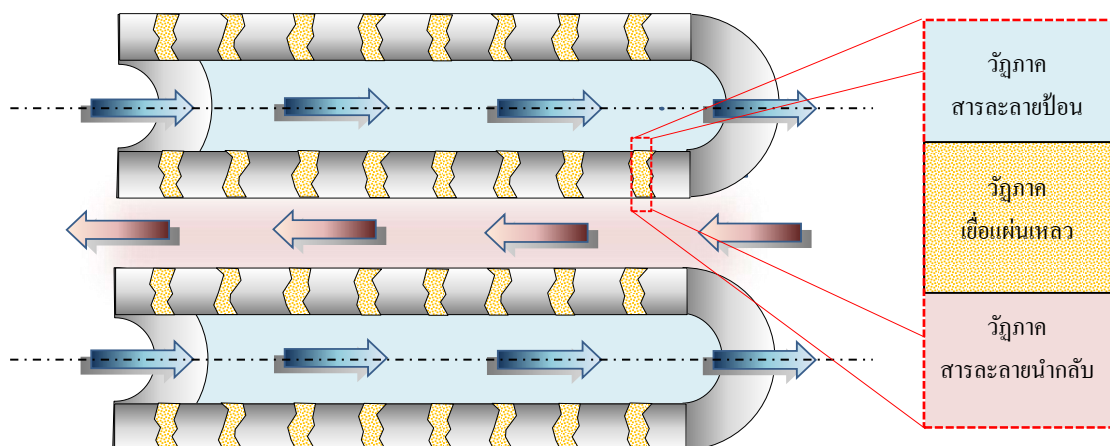
1. ส่วนของสารละลายป้อน (feed phase) ส่วนนี้อยู่ในวัฏภาคสารละลาย ซึ่งเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่
2. ส่วนเยื่อแผ่นเหลว (liquid membrane phase) ส่วนนี้ประกอบด้วยสารสกัด (extraction) ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลาย ซึ่งเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับวัฏภาคสารละลาย
3. ส่วนของสารละลายนำกลับ (strip phase) ส่วนนี้อยู่ในวัฏภาคสารละลายเช่นเดียวกับสารละลายป้อน ทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งถ่ายเทมาจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาสู่สารละลายนำกลับ

องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว ที่กั้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับและแยกตัวออกมาในสารละลายนำกลับ

2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

เยื่อแผ่นที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยกลวงจำนวนมากเรียงในแนวนานซึ่งถูกบรรจุลงในมอดูลรูปทรงกระบอก โดยที่เส้นใยกลวงนั้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีรูพรุน ซึ่งรูพรุนนี้เป็นตัวยึดเยื่อแผ่นเหลวเอาไว้ด้วยแรงแคปิลลารี (Marr และ Kopp, 1982; Schultz, 1998) ประเภทของตัวรองรับแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่ผ่านหรือยึดติดในรูพรุน และชนิดไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคซึ่งมีสารอินทรีย์เป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่ผ่านหรือยึดติดในรูพรุน โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวรองรับชนิดไม่ชอบน้ำที่ผลิตมาจากพอลิโพรพิลีน (polypropylene) เลือกใช้ระบบปฏิบัติการไหลเป็นแบบสวนทางกัน โดยให้สารละลายป้อนไหลภายในฝั่งท่อ (tube side) และสารละลายนำกลับไหลในฝั่งเปลือก (shell side) แสดงมอดูลเส้นใยกลวงและการไหลแบบสวนทางกันของวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับดังภาพที่ 2.1

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงถูกเตรียมโดยการเคลือบเยื่อแผ่นเหลวไว้ที่ตัวรองรับเกิดเป็นชั้นฟิล์มกั้นระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ซึ่งข้อดีและข้อเสียของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบมีตัวรองรับ มีดังนี้



ภาพที่ 2.1 มอดูลของเชื้อเพลิงเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางและลักษณะการไหลแบบสวนทางของวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับ

ข้อดีของกระบวนการเชื้อเพลิงเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (ประกร รามกุล, 2544)

1. มีร้อยละการสกัดและการนำกลับที่สูง
2. มีอัตราการถ่ายเทมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
3. มีค่าการคัดเลือก (selectivity) สูง
4. สามารถเลือกความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ได้
5. ใช้สารสกัดปริมาณน้อย
6. มูลค่าการลงทุนและการดำเนินการต่ำ
7. สามารถขยายขนาดได้ง่าย เพื่อประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

ข้อเสียของกระบวนการเชื้อเพลิงเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (Szpakowka และ Nagy, 1997)

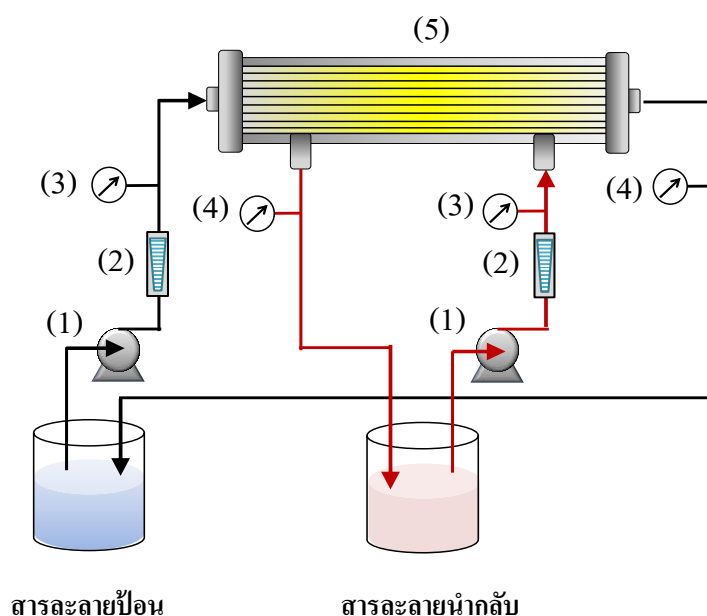
ความเสถียรภาพและอายุการใช้งานต่ำอันเนื่องมาจากหลายปัจจัย อาทิเช่น ความสามารถในการละลายของเชื้อเพลิงเหลวในวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ความสามารถในการระเหยของตัวทำละลาย แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาคสารละลายกับเชื้อเพลิงเหลว ชนิดของตัวรองรับ และขนาดของรูพรุน

2.3 รูปแบบระบบปฏิบัติการผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ระบบปฏิบัติการผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง สามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบ คือ

2.3.1 ระบบปฏิบัติการแบบกะ (Batch operation mode)

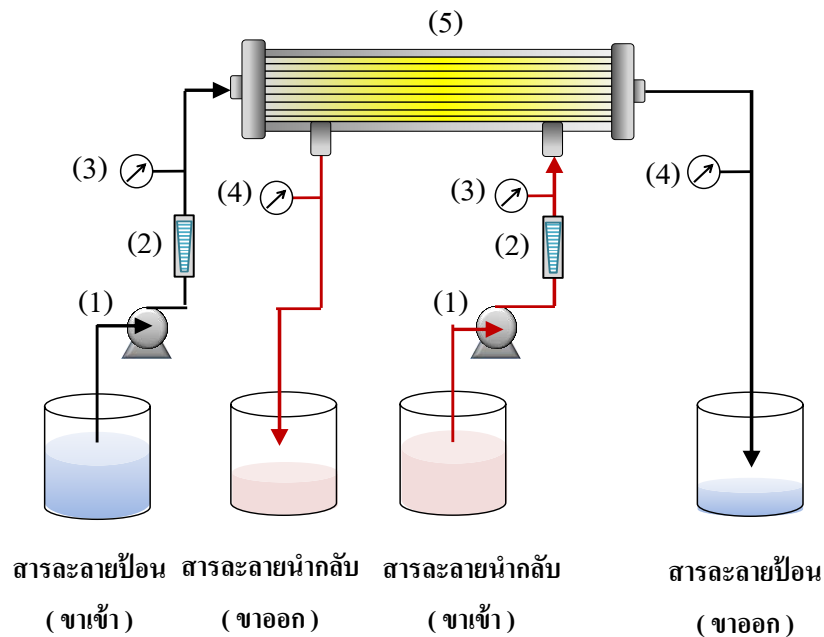
ใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับอย่างละ 1 ถัง โดยให้ไหลวนอยู่ในถังเดียวกัน ระบบปฏิบัติการนี้มักใช้ในกรณีที่สารละลายป้อนมีปริมาณน้อย ข้อดีคือสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายป้อนได้มาก ดังภาพที่ 2.2 แสดงระบบปฏิบัติการแบบกะที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน



ภาพที่ 2.2 ระบบปฏิบัติการแบบกะ สำหรับการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสวนทางกัน (1) ปั๊ม (2) มาตรวัดอัตราการไหล (3) มาตรวัดความดันขาเข้า (4) มาตรวัดความดันขาออก (5) มอดูลเส้นใยกลวง

2.3.2 ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง (Continuous operation mode)

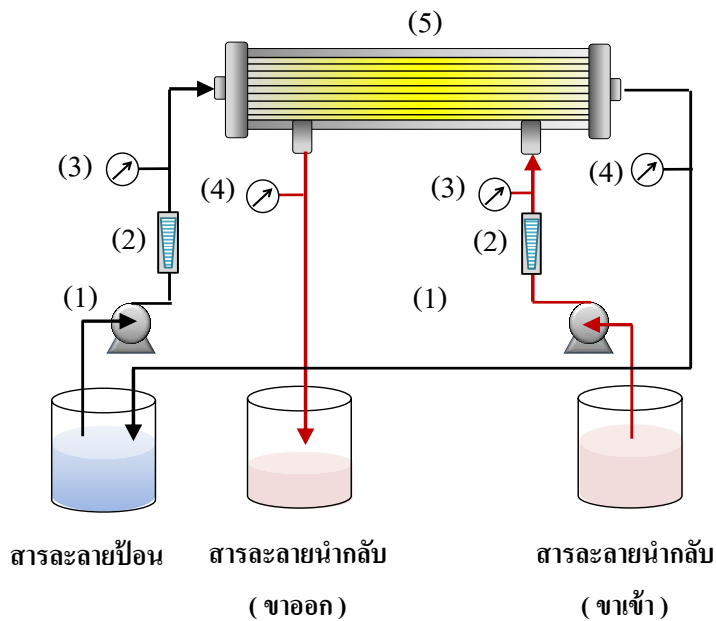
ใช้สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับอย่างละ 2 ถัง ซึ่งอยู่แยกเป็นฝั่งขาออกและฝั่งขาเข้า ระบบปฏิบัติการนี้ใช้เมื่อมีสารละลายป้อนในปริมาณมาก ดังภาพที่ 2.3 แสดงระบบปฏิบัติการแบบไหลต่อเนื่องที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลสวนทางกัน



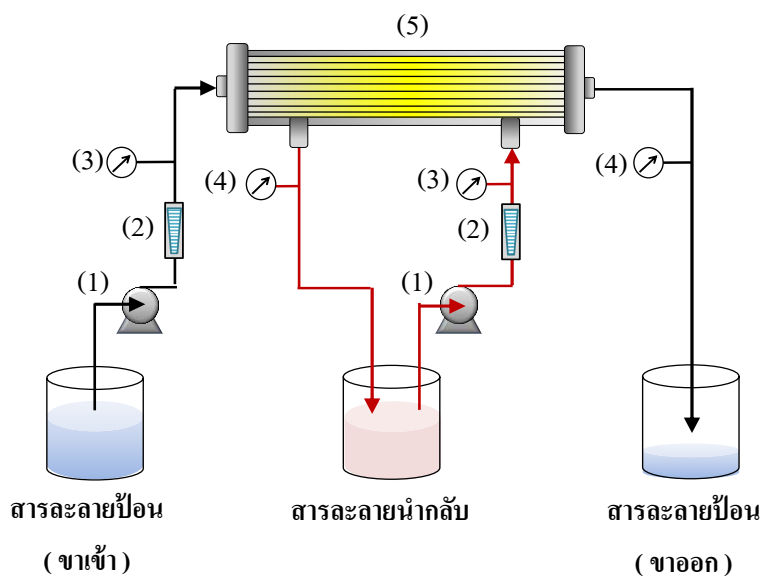
ภาพที่ 2.3 ระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่อง สำหรับการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสวนทางกัน (1) ปั๊ม (2) มาตรวัดอัตราการไหล (3) มาตรวัดความดันขาเข้า (4) มาตรวัดความดันขาออก (5) มอดูลเส้นใยกลวง

2.3.3 ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-batch operation mode)

แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายนำกลับและระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน การนำไปใช้ควรพิจารณาตามความเหมาะสม โดยระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายนำกลับ เป็นการไหลวนในถังเดียวของวัฏภาคสารละลายป้อน ถึงแม้จะสามารถแยกองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารละลายป้อนได้มาก แต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะต้องใช้ปริมาณของสารละลายนำกลับปริมาณมาก ทำให้ไม่เห็นประโยชน์อย่างชัดเจน ในขณะที่ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน เป็นรูปแบบที่เหมาะสมต่อการรองรับปริมาณสารละลายป้อนในปริมาณมาก อีกทั้งสามารถเพิ่มความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการในวัฏภาคของสารละลายนำกลับให้สูงขึ้นได้ ดังภาพที่ 2.4



(ก) ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายน้ำกลับ



(ข) ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน

ภาพที่ 2.4 ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง สำหรับการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับสวนทางกัน (1) ปั๊ม (2) มาตรวัดอัตราการไหล (3) มาตรวัดความดันขาเข้า (4) มาตรวัดความดันขาออก (5) มอดูลเส้นใยกลวง โดย (ก) ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายน้ำกลับ (ข) ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน

2.4 สารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัดคือ

2.4.1 สารสกัดชนิดกรด

สารสกัดชนิดนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารสกัดชนิดกรด (acidic extractant) และสารสกัดชนิดคีเลต (chelate extractant) ในส่วนของสารสกัดชนิดกรดจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-\text{COOH}$, $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ ส่วนสารสกัดชนิดคีเลตเป็นสารสกัดที่ทำปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) กับไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวก สารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะชนิดประจุบวกจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลางและสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ดังสมการ 2.1



สมการนี้แสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างไอออนไฮโดรเนียมกับไอออนโลหะ โดยความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบส ของวัฏภาคสารละลายอินทรีย์และธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ โดยความสามารถในการสกัดจะสูงขึ้นเมื่อไอออนโลหะมีประจุบวก (Tavlarides และคณะ, 1987)

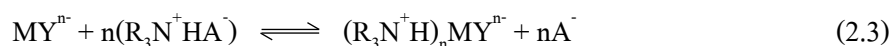
ตัวอย่างสารสกัดชนิดกรด เช่น Di-2-ethylhexyl phosphoric acid ใช้ชื่อทางการค้าว่า D2EHPA, Bis(2,4,4-trimethylpentyl) phosphoric acid ใช้ชื่อทางการค้าว่า Cyanex 272, Bis(2,4,4-trimethylpentyl) dithiophosphoric acid ใช้ชื่อทางการค้าว่า Cyanex 301 เป็นต้น

2.4.2 สารสกัดชนิดเบส

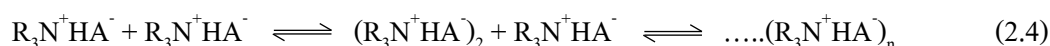
สารสกัดอินทรีย์ชนิดนี้มักมีโครงสร้างเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (quaternary ammonium halides) ทั้งนี้มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (primary: RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (secondary: R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (tertiary: R_3N) และชนิดจตุภูมิ (quaternary: R_4N^+) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับกรดเกิดเป็นรูปของเกลือดังสมการ 2.2



สมการนี้แสดงถึงเอมีนที่รวมตัวกับกรดในสารละลายป้อนเกิดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีชื่อ ($R_3N^+HA^-$) ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะ (MY^{n-}) ในสารละลายป้อนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายในสารละลายอินทรีย์ดังสมการ 2.3



โดยประสิทธิภาพของการสกัดขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะ ซึ่งมีความเหมาะสมในการสกัดไอออนโลหะประจุลบ (anionic species) ปัญหาสำคัญในการใช้สารสกัดชนิดนี้คือการรวมตัวของเกลือแอมโมเนียม เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งประจุบวกและประจุลบ (ammonium cation และ ammonium anion) ซึ่งการรวมตัวของเกลือเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการ 2.4



การเกิดวัฏภาคที่สามจะทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลงแต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (modifier) เช่น long-chain aliphatic alcohol (Tavlarides และคณะ, 1987)

ตัวอย่างสารสกัดชนิดเบส เช่น Tri-n-octylamine ชื่อทางการค้าว่า Almine 300 หรือ TOA, Methyltrioctyl ammonium chloride ชื่อทางการค้าว่า Aliquat 336, Ammonium salt ชื่อทางการค้าว่า Aliquat 100 เป็นต้น

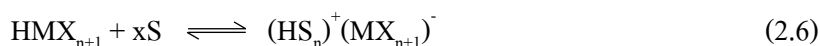
2.4.3 สารสกัดชนิดขอลเวท

สารสกัดชนิดขอลเวทหรือสารสกัดชนิดกลาง (neutral extractant) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะหมู่ที่ให้ไอออนลบเท่านั้น โดยไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนสภาพเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำเช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะ

ที่อยู่ตรงกลาง (central metal atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด ดังสมการ 2.5



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดกลาง ความสามารถในการละลายของสารอนินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดโซลเวทดังสมการ 2.6



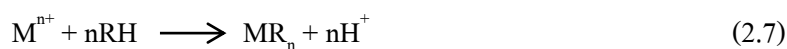
ตัวอย่างสารสกัดชนิดกลาง เช่น Trisobutyl phosphine sulphide ชื่อทางการค้าว่า Cyanex 471 และ Trioctyl phosphine oxide ชื่อทางการค้าว่า Cyanex 921 เป็นต้น

2.5 กลไกการถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวลในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายเทมวลแบบควบคู่คือ กระบวนการถ่ายเทมวลของไอออนสองชนิดพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว เพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ ซึ่งแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลคือผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการได้เรื่อยๆ แม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อน (อุรา ปานเจริญ, 2551) การถ่ายเทมวลแบบควบคู่แบ่งเป็น 2 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนไฮโดรเนียมในสารละลายป้อนและสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะในเยื่อแผ่นเหลว

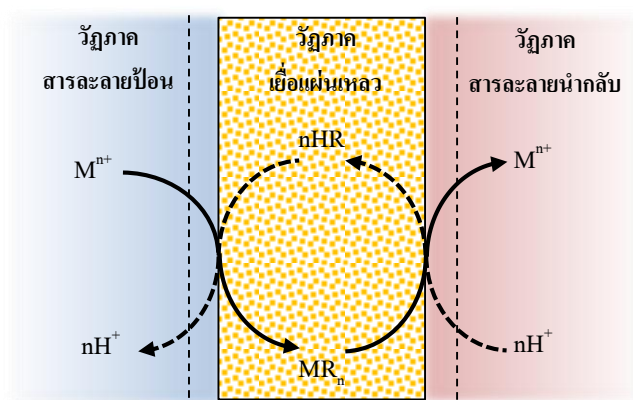
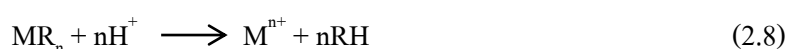
2.5.1 การถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (Counter-Transport)

การถ่ายเทมวลแบบสวนทางเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบบสวนทางของสารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) ที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลวจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนโลหะ (M^{n+}) ในสารละลายป้อนและสารสกัดชนิดกรด (RH) ในเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการ 2.7 กับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายป้อน



การแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นไปยังอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลาย

นำกลับที่บริเวณผิวสัมผัสนี้พบว่าสารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) จะทำปฏิกิริยาย้อนกลับกับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด (RH) กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้ง และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังสมการ 2.8 ทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมแบบสวนทาง แสดงภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แผนผังทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมของการถ่ายเทมวลแบบสวนทาง

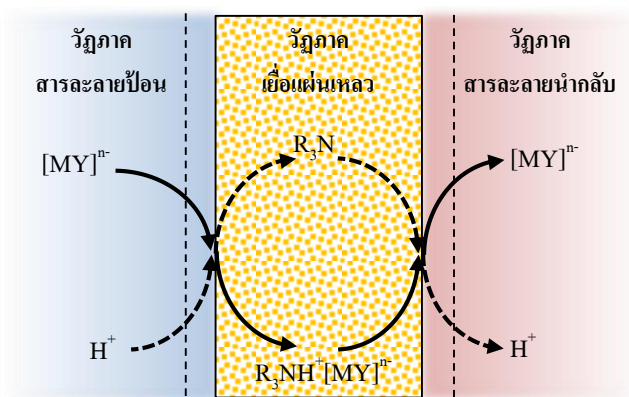
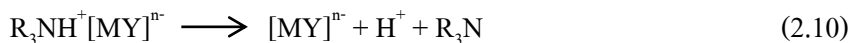
2.5.2 การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียว (Co-Transport)

การถ่ายเทมวลแบบไปทางเดียวเป็นการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวของไอออนโลหะประจุลบ $[MY]^{n-}$ และไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายป้อน ไอออนโลหะประจุลบและไอออนไฮโดรเนียมจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดเบส (R_3N) ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($R_3NH^+[MY]^{n-}$) ในเยื่อแผ่นเหลวดังสมการ 2.9



การแพร่ผ่านของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นไปยังอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออก

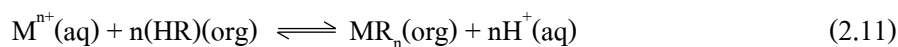
มาอยู่ในสารละลายนำกลับและได้สารสกัด (R_3N) กลับมาอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวอีกครั้ง และแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อนดังสมการ 2.10 และเกิดวนเวียนอย่างนี้เรื่อยไป ดังภาพที่ 2.6



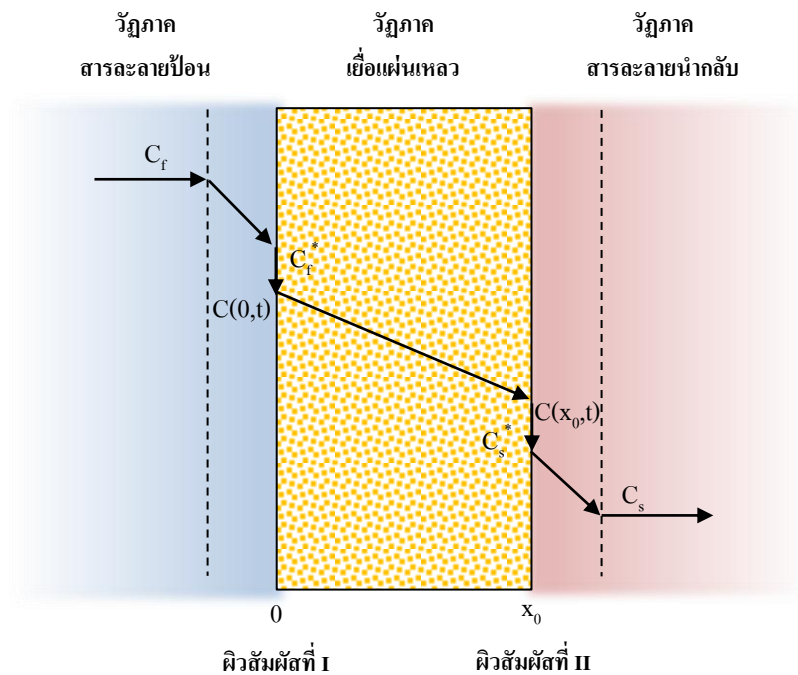
ภาพที่ 2.6 แผนผังทิศทางการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะและไอออนไฮดรอกไซด์ของการถ่ายเทมวลแบบทางเดียว

2.6 ขั้นตอนการถ่ายเทมวลของไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลว

สำหรับกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ของไอออนโลหะ (M^{n+}) ไอออนไฮดรอกไซด์ (H^+) และสารสกัด (HR) ดังแสดงในภาพที่ 2.7 สำหรับสมดุลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายของน้ำทั้งสองฝั่ง ดังสมการ 2.11



โดยที่อักษรย่อ aq แทนวัฏภาคสารละลาย (aqueous phase) ส่วนอักษรย่อ org แทนวัฏภาคของสารอินทรีย์ (organic phase) การเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปในทิศทางใดขึ้นอยู่กับสภาวะของระบบและกลไกในการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลวเราสามารถอธิบายได้ดังนี้ (เอกพิชญ์ ทรงคุณ, 2548; Kumar และคณะ, 2000)



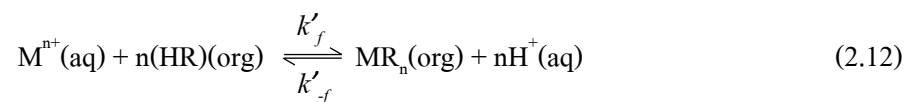
ภาพที่ 2.7 กลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลว

ขั้นที่ 1

ไอออนโลหะที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

ขั้นที่ 2

ไอออนโลหะจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดได้ไอออนไฮโดรเนียมและสารประกอบเชิงซ้อน $MR_n(\text{org})$ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัส I)



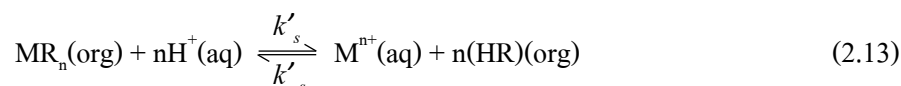
โดยที่ค่า k'_f และ k'_{-f} คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาการสกัดตามลำดับไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนจะถูกสกัดโดยปฏิกิริยาไปข้างหน้าระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัด

ขั้นที่ 3

สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่ซึมผ่านวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับเคลื่อน ไปยังผิวสัมผัสระหว่างวฏภาคสารละลายนำกลับกับวฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (ผิวสัมผัสII) ขณะเดียวกันไอออนไฮโดรเนียมที่เกิดขึ้นจะแพร่ไปยังในวฏภาคสารละลายป้อนเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเนียม

ขั้นที่ 4

สารประกอบเชิงซ้อนทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเนียมได้ไอออนโลหะสารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับระหว่างวฏภาคสารละลายนำกลับ (ผิวสัมผัสII)



โดยที่ค่า k'_s และ k'_s คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาการนำกลับตามลำดับ ไอออนโลหะจะถูกนำกลับโดยปฏิกิริยาไปข้างหน้าระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนไฮโดรเนียม

ขั้นที่ 5

สารสกัดที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะแพร่ย้อนกลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านวฏภาคสารละลายป้อนในขณะเดียวกันไอออนโลหะที่เกิดขึ้นจะแพร่จากผิวสัมผัสII ดังภาพที่ 2.7 ไปยังวฏภาคสารละลายนำกลับเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไอออนโลหะ ดังนั้นไอออนโลหะจึงเคลื่อนที่จากฝั่งวฏภาคสารละลายป้อนไปยังวฏภาคสารละลายนำกลับและไอออนไฮโดรเนียมจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อช่วยรักษาความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้าของระบบโดยมีผลต่างความเข้มข้น (concentration gradient) ของไอออนไฮโดรเนียมระหว่างวฏภาคสารละลายป้อนกับวฏภาคสารละลายนำกลับเป็นแรงขับเคลื่อนการถ่ายเทมวล

หลังจากที่ไอออนของโลหะเกิดการถ่ายเทมวลที่ผิวสัมผัสระหว่างวฏภาคสารละลายป้อนและวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวแล้ว ไอออนโลหะจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ผ่านชั้นเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและวฏภาคของสารละลายนำกลับหลังจากนั้นสารสกัดจะกลับคืนสภาพและมาจับกับไอออนโลหะที่ด้านสารละลายป้อนอีกครั้งเป็นวงจรเช่นนี้เรื่อยไป

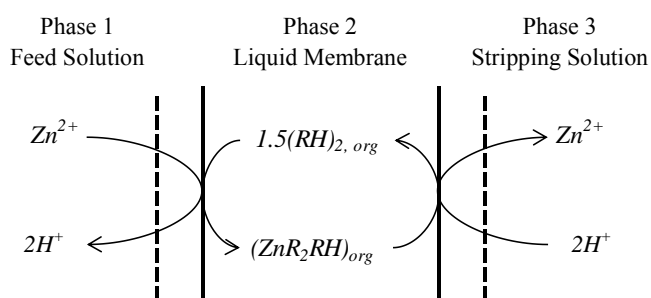
2.7 ปฏิบัติการสกัดไอออนสังกะสี

2.7.1 สมการการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด D2EHPA (Mallah และ Benachour, 2006)

การสกัดไอออนสังกะสีที่มีการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ชนิดแบบสวนทางกัน โดยใช้สารสกัดชนิดกรด Di-2-ethylhexyl phosphoric acid หรือ D2EHPA เป็นสารสกัด โดยสมการการเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังสมการ 2.14



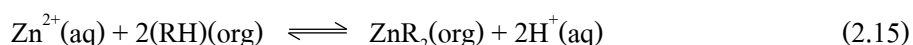
สามารถแสดงกลไกการถ่ายเทมวลของสมการการเกิดปฏิกิริยา ได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 กลไกการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัด D2EHPA

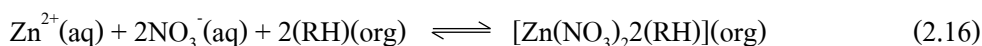
2.7.2 สมการการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด Cyanex 272 (Swain และคณะ, 2007)

การสกัดไอออนสังกะสีที่มีการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ชนิดแบบสวนทางกัน โดยการใช้สารสกัดชนิดกรด Bis(2,4,4-trimethyl pentyl) phosphinic acid หรือ Cyanex 272 เป็นสารสกัด โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังสมการ 2.15



2.7.3 สมการการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด TBP (Mellah และ Benachour, 2007)

การสกัดไอออนสังกะสีที่มีการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ชนิดแบบสวนทางกัน โดยใช้สารสกัดชนิดซอลเวทหรือชนิดกลาง Tri-butyl phosphate หรือ TBP เป็นสารสกัด โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังสมการ 2.16



2.8 ทฤษฎีการคำนวณค่าคงที่การถ่ายเทมวลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.8.1 การคำนวณร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{C_{f,0} - C_{f,out}}{C_{f,0}} \times 100 \quad (2.17)$$

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{C_{s,out} - C_{s,0}}{C_{f,0}} \times 100 \quad (2.18)$$

เมื่อ $C_{f,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 $C_{f,out}$ = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 $C_{s,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 $C_{s,out}$ = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับขาออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.8.2 การคำนวณค่าดัชนีการคัดเลือกต่อการสกัดไอออนสังกะสี (Selective index) และค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสี (Separation factor)

เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสารสกัดกับไอออนสังกะสี (Seader และ Ernest, 1984; Chaturabul และคณะ, 2013)

$$\text{Selective index for Zn}^{2+} \text{ over Ni}^{2+} \text{ and Mn}^{2+} = \frac{C_{\text{Zn}}}{C_{\text{Ni}} + C_{\text{Mn}}} \quad (2.19)$$

$$\text{Separation factor for Zn}^{2+} \text{ over Ni}^{2+} = \frac{(C_{Zn} / C_{Ni})_{\text{permeate}}}{(C_{Zn} / C_{Ni})_{\text{retentate}}} \quad (2.20)$$

$$\text{Separation factor for Zn}^{2+} \text{ over Mn}^{2+} = \frac{(C_{Zn} / C_{Mn})_{\text{permeate}}}{(C_{Zn} / C_{Mn})_{\text{retentate}}} \quad (2.21)$$

เมื่อ C_{Zn} = ความเข้มข้นของไอออนสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_{Ni} = ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_{Mn} = ความเข้มข้นของไอออนแมงกานีส (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.8.3 ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดของไอออนสังกะสี (Extraction equilibrium constant, K_{ex})

ในกรณีที่ใช้ D2EHPA เป็นสารสกัด จากปฏิกิริยาดังแสดงในสมการ 2.14 สามารถหาค่าคงที่สมดุลได้ ดังสมการ 2.22

$$K_{ex} = \frac{[ZnR_2RH]_{org} [H^+]^2}{[Zn^{2+}] [(RH)_2]_{org}^{1.5}} \quad (2.22)$$

2.8.4 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient, D)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของไอออนสังกะสีที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (สารประกอบเชิงซ้อน) ต่อความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในวัฏภาคสารละลาย (Seader และ Ernest, 1984; Rathore และคณะ, 2001) ดังสมการ 2.23

$$D = \frac{[ZnR_2RH]_{org}}{[Zn^{2+}]} = K_{ex} \frac{[(RH)_2]_{org}^{1.5}}{[H^+]^2} \quad (2.23)$$

2.8.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient, P)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านขึ้นอยู่กับความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลว การคำนวณใช้สมมติฐานที่ว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการสกัดไอออนสังกะสีทางสารละลายป้อนไปยังเยื่อแผ่นเหลว มากกว่าทางด้านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับเป็นอย่างมาก (Danesi และ Rickert, 1986) ดังสมการ 2.24

$$-V_f \ln \left(\frac{C_f}{C_{f,0}} \right) = AP \frac{\phi}{\phi+1} t \quad (2.24)$$

โดยที่

$$\phi = \frac{q_f}{PLE\pi Nr_i} \quad (2.25)$$

- เมื่อ
- P = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
 - V_f = ปริมาตรของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - C_f = ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่เวลาใดๆ (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - $C_{f,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - A = พื้นที่การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (ตารางเซนติเมตร)
 - t = เวลา (วินาที)
 - q_f = อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
 - L = ความยาวของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
 - \mathcal{E} = ความพรุนของเส้นใยกลวง (-)
 - π = ค่าคงที่ในสมการของ Stoke และ Einstein เท่ากับ 3.1416 (-)
 - N = จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล (-)
 - r_i = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

เมื่อสร้างกราฟจากสมการ 2.24 โดยให้ $AP \frac{\phi}{\phi+1}$ เป็นพจน์ของความชัน เมื่อเทียบกับเวลา

จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

2.8.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient)

ความต้านทานการถ่ายเทมวลมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน โดยขั้นตอนการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้านเส้นใยกลวงมี 3 ขั้นตอน ซึ่งการถ่ายเทมวลแต่ละขั้นตอนนี้ย่อมมีความต้านทานเกิดขึ้น ได้แก่

1. ความต้านทานในชั้นฟิล์มด้านสารละลายป้อน เกิดขึ้นระหว่างการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะเพื่อเข้าสู่รูพรุนของเส้นใยกลวง
2. ความต้านทานในเยื่อแผ่นเหลว เกิดขึ้นจากการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งถ่ายเทมวลจากด้านผิวสัมผัสสารละลายป้อนไปสู่ผิวสัมผัสด้านสารละลายนำกลับ
3. ความต้านทานในชั้นฟิล์มด้านสารละลายนำกลับและสารอินทรีย์ที่บริเวณผิวด้านนอกของเส้นใยกลวง

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของการถ่ายเทมวลกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอธิบายได้ดังสมการ 2.26 (Rathore และคณะ, 2001)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_f} + \frac{r_i}{r_m} \cdot \frac{1}{P_m} + \frac{r_i}{r_o} \cdot \frac{1}{k_s} \quad (2.26)$$

โดยที่

$$r_m = \frac{r_o - r_i}{\ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)} \quad (2.27)$$

เมื่อ r_m = รัศมี log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

r_i = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

r_o = รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

k_f = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในสารละลายป้อน (เซนติเมตรต่อวินาที)

k_s = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในสารละลายนำกลับ (เซนติเมตรต่อวินาที)

P_m = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (P_m) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ดังสมการ 2.28 (Rathore และคณะ, 2001)

$$P_m = Dk_m \quad (2.28)$$

เมื่อ D = ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (-)

k_m = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนโลหะในเยื่อแผ่นเหลว
(เซนติเมตรต่อวินาที)

รวมสมการ 2.23 และสมการ 2.28 จะได้

$$P_m = K_{ex} k_m \frac{[(RH)_2]^{1.5}}{[H^+]^2} \quad (2.29)$$

ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลในสารละลายนำกลับสามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ (k_s) นั้นมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนโลหะในสารละลายป้อน (k_f) มาก (ประกร รามกุล, 2544) ซึ่งเป็นเพราะความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวมากกว่าความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับมาก เนื่องจากที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อนมีการรวมตัวกันของไอออนโลหะและกรดที่ละลายอยู่ในสารละลายป้อน ในขณะที่ด้านนำกลับนั้นมีเพียงสารละลายนำกลับ จึงไม่เกิดการรวมตัวของตัวทำละลายที่จะสร้างความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ดังสมการ 2.30 และ 2.31 (Bird และคณะ, 2002)

$$k_f = \frac{D^*}{l_{if}} \quad (2.30)$$

และ

$$k_s = \frac{D^*}{l_{is}} \quad (2.31)$$

เมื่อ D^* = สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

l_{if} = ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตร)

l_{is} = ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตร)

ดังนั้นสามารถตัดเทอมสุดท้ายของสมการ 2.26 ได้และแทนค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (P_m) จากสมการ 2.29 ในสมการ 2.26 จะได้ดังสมการ 2.32

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_f} + \frac{r_i}{r_{lm}} \cdot \frac{1}{K_{ex} k_m [(RH)_2]^{1.5} / [H^+]^2} \quad (2.32)$$

พบว่าสมการ 2.32 เป็นสมการเส้นตรง โดยค่า $\frac{1}{k_f}$ เป็นค่าที่จุดตัดของแกน $\frac{1}{P}$ และ

$\frac{r_i}{r_{lm}} \cdot \frac{1}{K_{ex} k_m}$ เป็นค่าความชันของกราฟ ดังนั้นจึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลได้

2.8.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

รายละเอียดที่ใช้ในการคำนวณดังภาพที่ 2.7 ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นไปตามกฎของฟิค(Fick's Law) กำหนดให้ความหนาของเยื่อแผ่นเหลวเริ่มต้นจากค่า 0 ถึง x_0 และมีสมมติฐานดังต่อไปนี้ (Huang และคณะ, 2008)

1. กำหนดให้ค่าสมบัติทางกายภาพและอุณหภูมิคงที่ ให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลเทียม
2. ไม่มีการแพร่ซึมของเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ
3. ไอออนสังกะสีในแต่ละวัฏภาคเป็นเนื้อเดียวกัน
4. ไม่พิจารณาปริมาณของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเพราะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ
5. ไม่พิจารณาความต้านทานฝั่งสารละลายนำกลับเพราะถือว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายนำกลับเกิดขึ้นเร็วมาก

สามารถอธิบายกลไกการถ่ายเทมวลในแต่ละขั้นตอน ได้ดังนี้

ขั้นที่ 1

ไอออนโลหะที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

$$J_f(x,t) = k_f(x,t)[C_f(x,t)-C_f^*(x,t)] \quad (2.33)$$

ขั้นที่ 2

ไอออนโลหะจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดได้ ไอออนไฮโดรเนียมและสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

$$J_{r,f}(x,t) = k'_f C_f^*(x,t) - k'_f C(0,t) \quad (2.34)$$

ขั้นที่ 3

สารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ซึมผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคละลายนำกลับกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

$$J_{m,f}(x,t) = -D_e \frac{dC(0,t)}{dx} \quad (2.35)$$

$$J_{m,s}(x,t) = -D_e \frac{dC(x_0,t)}{dx} \quad (2.36)$$

ขั้นที่ 4

สารประกอบเชิงซ้อนทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเนียมได้ ไอออนโลหะ และสารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ

$$J_{r,s}(x,t) = k'_s C(x,t) - k'_s C_s^*(x,t) \quad (2.37)$$

ขั้นที่ 5

สารประกอบเชิงซ้อนทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเนียมได้ ไอออนโลหะ สารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ

$$J_s(x,t) = k_s(x,t)[C_s(x,t) - C_s^*(x,t)] \quad (2.38)$$

2.8.8 ค่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่ (Flux)

จากนิยามอัตราการถ่ายเทมวลต่อพื้นที่ของ Lin และ Juang (Lin และ Juang, 2001) พบว่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่โดยเฉลี่ยของไอออนโลหะที่ข้ามผ่านเยื่อแผ่นเหลวเป็นดังสมการ 2.39

$$J = \frac{C_{i,s} V_s}{At} \quad (2.39)$$

เมื่อ J = ค่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่, Flux (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที)
 $C_{i,s}$ = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ
 (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 V_s = ปริมาตรของสารละลายนำกลับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 A = พื้นที่การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (ตารางเซนติเมตร)
 t = เวลา (นาที)

นอกจากนั้นอัตราการถ่ายเทมวลต่อพื้นที่ยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังสมการ 2.40 ซึ่งมีพื้นฐานมาจากสมการของอาร์เรเนียส (Pang และคณะ, 2005)

$$J = e^{-E_a/RT} \quad (2.40)$$

จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง ดังสมการ 2.41

$$\ln J = \ln A - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (2.41)$$

เมื่อ A = ค่าแฟกเตอร์ความถี่, Frequency factor
 E_a = พลังงานก่อกัมมันต์ (จุดต่อ โมล)
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ เท่ากับ 8.314 (จุดต่อ โมลต่อเคลวิน)
 T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

2.8.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

2.8.9.1 แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยา

แบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir model) (Aksu และ Balibek, 2007)

มีสมมติฐานที่ว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวดูดซับเกิดการดูดซับผลผิวแบบชั้นเดียว (monolayer) ไม่สามารถเกิดข้ามผิวหรือไม่สามารถเกิดขึ้นกับโมเลกุลที่อยู่ติดกันได้

$$q_e = \frac{Q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.42)$$

จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงไปดังสมการ 2.43

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L Q_0} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{Q_0} \quad (2.43)$$

เมื่อ q_e = จำนวนของไอออนโลหะที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารสกัดที่ความเข้มข้นสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

Q_0 = การดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e = ความเข้มข้นที่สถานะสมดุลของไอออนโลหะ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_L = ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

แบบจำลองของฟรอนด์ริช (Freundlich model) (Aksu, 2001)

มีสมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (heterogeneous) พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะรูขรุขระ พลังงานในการสร้างพันธะของแต่ละบริเวณเกิดพันธะของวัสดุดูดซับไม่เท่ากันและเป็นไปอย่างกระจายตัว

$$q_e = K_F C_e^{1/n_F} \quad (2.44)$$

จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงไปดังสมการ 2.45

$$\log q_e = \frac{1}{n_F} \log C_e + \log K_F \quad (2.45)$$

เมื่อ K_F = ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของฟรอนทริช (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
 n_F = ค่าคงที่ของฟรอนทริช (-)

2.8.9.2 แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของการพา (He และคณะ, 2006)

อัตราการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะ ถูกอธิบายในรูปของการแพร่ของไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลวจากสารละลายป้อนไปสู่สารละลายนำกลับ

$$\ln \frac{C_f}{C_{f,0}} = -\frac{A}{V_f} P_c \cdot t \quad (2.46)$$

เมื่อ P_c = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนโลหะที่ถูกดึงออกจากสารละลายป้อน (เซนติเมตรต่อวินาที)

2.8.9.3 แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาและการพา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อ้างอิงจากการนำเสนอโดย Pancharoen และคณะ (Pancharoen และคณะ, 2011) ซึ่งให้กระบวนการแยกผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้นเสมือนเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล สมมติฐานที่จำเป็นเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองของการสกัดในวัฏภาคสารละลายป้อนมีดังต่อไปนี้

- ปฏิริยาคำเนินที่สภาวะอุณหภูมิ ความดัน และปริมาตรคงที่
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงวัฏภาค มีเฉพาะวัฏภาคของเหลวเท่านั้นในกระบวนการ
- ไม่มีการเปลี่ยนความเข้มข้นในแนวรัศมีของมอดูล
- ปฏิริยการสกัดเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวตามแนวแกนของท่อ (มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในแนวแกนมอดูลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยา)
- ปฏิริยที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ

โดยแบบจำลองนี้แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ แบบจำลองของการสกัด และแบบจำลองของการนำกลับ

แบบจำลองของการสกัด (Pancharoen และคณะ, 2011; Suren และคณะ, 2012)

ปฏิกิริยาการสกัดดังสมการ 2.14 สำหรับการสกัดไอออนสังกะสี นำมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลอง ดังสมการ 2.47



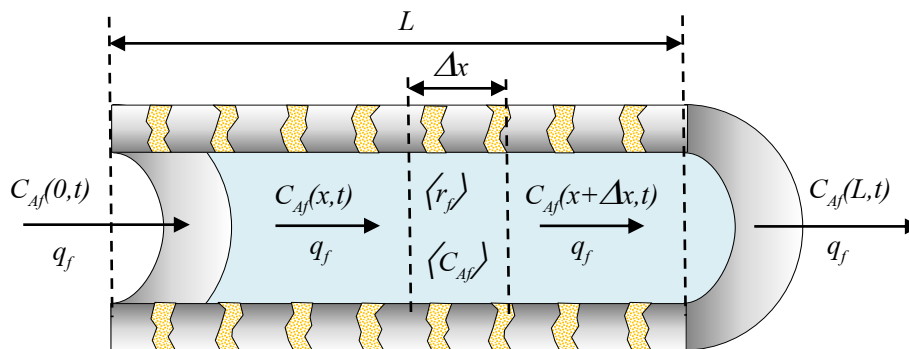
เมื่อ A คือ ไอออนสังกะสี, B คือ สารสกัด D2EHPA, C คือ สารประกอบเชิงซ้อน, D คือ ไอออนไฮโดรเนียม และ a, b, c, d คือ ค่าสัมประสิทธิ์ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สมมติฐานของปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับแสดงดังสมการ 2.48

$$-r_f = k'_f C_{A_f}^n(x,t) \quad (2.48)$$

เมื่อ k'_f คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาการสกัด

n คือ อันดับปฏิกิริยาของปฏิกิริยาการสกัด

อาศัยสมการสมดุลมวลเพื่อสร้างแบบจำลองของสารละลายป้อนที่ไหลต่อเนื่องในท่อเส้นใยกลวง ดังภาพที่ 2.9 และสมการสมดุลมวลดังสมการ 2.49



ภาพที่ 2.9 แสดงการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในฝั่งท่อของมอดูลเส้นใยกลวง

$$-\frac{q_f}{A_{cf}} \frac{\partial C_{A_f}(x,t)}{\partial x} - r_f(x,t) = \frac{\partial C_{A_f}(x,t)}{\partial t} \quad (2.49)$$

เมื่อ q_f = อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)

A_{cf} = พื้นที่ตัดขวางของฝั่งสารละลายป้อน (ตารางเซนติเมตร)

ที่สถานะเริ่มต้น ($t = 0$)

กรณีที่ 1 ที่ $n = 0$

$$C_{Af}(x,0) = C_{Af}(0,0) + \frac{k'_f A_{Cf}}{q_f} x \quad (2.50)$$

กรณีที่ 2 ที่ $n = 1$

$$C_{Af}(x,0) = C_{Af}(0,0) \exp\left(\frac{k'_f A_{Cf}}{q_f} x\right) \quad (2.51)$$

กรณีที่ 3 ที่ $n \neq 0, 1$

$$C_{Af}(x,0) = \left[C_{Af}^{n-1}(0,0) + \frac{(n-1)k'_f A_{Cf}}{q_f} x \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (2.52)$$

ที่สถานะเวลาใดๆ ($t \neq 0$)

กรณีที่ 1 ที่ $n = 0$

$$\bar{C}_{Af}(L,t) = \bar{C}_{Af}(0,t-\tau_f) \cdot u(t-\tau_f) + k'_f(t-\tau_f) - k'_f t \quad (2.53)$$

กรณีที่ 2 ที่ $n = 1$

$$\bar{C}_{Af}(L,t) = e^\alpha \bar{C}_{Af}(0,t-\tau_f) \cdot u(t-\tau_f) \quad (2.54)$$

กรณีที่ 3 ที่ $n \neq 0, 1$

$$\bar{C}_{Af}(L,t) = e^{-\beta_f} \bar{C}_{Af}(0,t-\tau_f) \cdot u(t-\tau_f) \quad (2.55)$$

โดยที่

$$\tau_f = \frac{A_{Cf} L}{q_f} \quad (2.56)$$

$$\alpha_f = \frac{k_f A_{cf} L}{q_f} \quad (2.57)$$

$$\beta_f = \left(\frac{A_{cf} k'_f n}{q_f \gamma_f} \right) \ln \left(\frac{\gamma_f L + \lambda_f}{\lambda_f} \right) \quad (2.58)$$

$$\gamma_f = \frac{(n-1)k'_f A_{cf}}{q_f} \quad (2.59)$$

$$\lambda_f = C_{Af}^{1-n}(0,0) \quad (2.60)$$

$$\bar{C}_{Af}(x,t) = C_{Af}(x,t) - C_{Af}(x,0) \quad (2.61)$$

$$A_{cf} = 35000 \cdot \pi(r_i)^2 \quad (2.62)$$

และ $u(t - \tau_f)$ คือ ฟังก์ชันหน่วย (unit function) ซึ่ง $u(t - \tau_f) = 0$ เมื่อ $t < \tau_f$, $u(t - \tau_f) = 1$ เมื่อ $t \geq \tau_f$

แบบจำลองของการนำกลับ (Chaturabul และคณะ, 2013)

ปฏิกิริยาการนำกลับดังสมการ 2.14 สำหรับการสกัดไอออนสังกะสี นำมาเขียนให้อยู่ในภาพอย่างง่าย เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลอง ดังสมการ 2.63

$$cC + dD \xrightarrow{k'_s} aA + bB \quad (2.63)$$

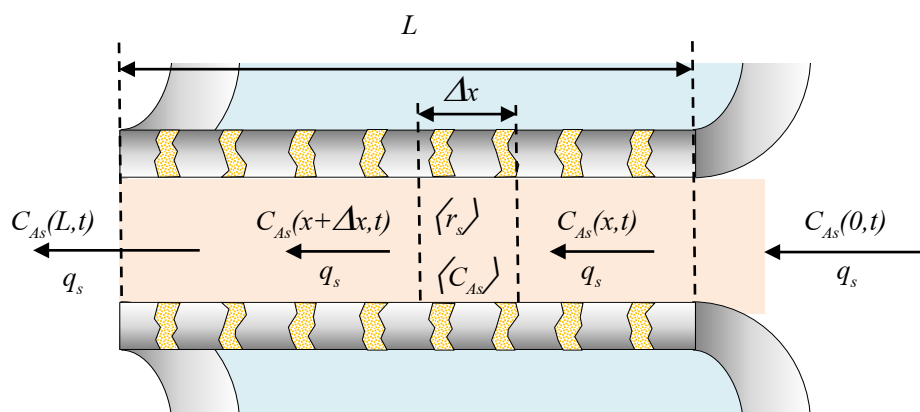
เมื่อ A คือ ไอออนสังกะสี, B คือ สารสกัด D2EHPA, C คือ สารประกอบเชิงซ้อน, D คือ ไอออนไฮโดรเนียม และ a, b, c, d คือ ค่าสัมประสิทธิ์ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สมมติฐานของปฏิกิริยาไม่ย้อนกลับแสดงดังสมการ 2.64

$$+r_s = k'_s C_{As}^m(x,t) \quad (2.64)$$

เมื่อ k'_s คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยานำกลับ

m คือ อันดับของปฏิกิริยาการนำกลับ

อาศัยสมการสมดุลมวลเพื่อสร้างแบบจำลองของสารละลายป้อนที่ไหลต่อเนื่องในท่อเส้นใยกลวง ดังภาพที่ 2.10 โดยการถ่ายเทมวลเกิดจากมวลในสายไหลเข้าและไหลออก และมวลที่เกิดจากปฏิกิริยานำกลับ ดังสมการ 2.65



ภาพที่ 2.10 แสดงการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในฝั่งเปลือกของมอดูลเส้นใยกลวง

$$-\frac{q_s}{A_{Cs}} \frac{\partial C_{As}(x,t)}{\partial x} + r_s(x,t) = \frac{\partial C_{As}(x,t)}{\partial t} \quad (2.65)$$

เมื่อ q_s = อัตราการสารละลายนำกลับ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)

A_{Cs} = พื้นที่ตัดขวางของฝั่งสารละลายนำกลับ (ตารางเซนติเมตร)

ที่สถานะเริ่มต้น ($t = 0$)

กรณีที่ 1 ที่ $m = 0$

$$C_{As}(x,0) = C_{As}(0,0) + \frac{k'_s A_{Cs}}{q_s} x \quad (2.66)$$

กรณีที่ 2 ที่ $m = 1$

$$C_{As}(x,0) = C_{As}(0,0) \exp\left(\frac{k'_s A_{Cs}}{q_s} x\right) \quad (2.67)$$

กรณีที่ 3 ที่ $m \neq 0, 1$

$$C_{As}(x,0) = \left[C_{As}^{m-1}(0,0) + \frac{(m-1)k'_s A_{Cs}}{q_s} x \right]^{\frac{1}{1-m}} \quad (2.68)$$

ที่สภาวะเวลาใดๆ ($t \neq 0$)

กรณีที่ 1 ที่ $m = 0$

$$\bar{C}_{As}(L,t) = \bar{C}_{As}(0,t-\tau_s) \cdot u(t-\tau_s) + k'_s(t-\tau_s) - k'_s t \quad (2.69)$$

กรณีที่ 2 ที่ $m = 1$

$$\bar{C}_{As}(L,t) = e^{\alpha_s} \bar{C}_{As}(0,t-\tau_s) \cdot u(t-\tau_s) \quad (2.70)$$

กรณีที่ 3 ที่ $m \neq 0, 1$

$$\bar{C}_{As}(L,t) = e^{-\beta_s} \bar{C}_{As}(0,t-\tau_s) \cdot u(t-\tau_s) \quad (2.71)$$

โดยที่

$$\tau_s = \frac{A_{Cs} L}{q_s} \quad (2.72)$$

$$\alpha_s = \frac{k'_s A_{Cs} L}{q_s} \quad (2.73)$$

$$\beta_s = \left(\frac{A_{Cs} k'_s m}{q_s \gamma_s} \right) \ln \left(\frac{\gamma_s L + \lambda_s}{\lambda_s} \right) \quad (2.74)$$

$$\gamma_s = \frac{(m-1)k'_s A_{Cs}}{q_s} \quad (2.75)$$

$$\lambda_s = C_{As}^{1-m}(0,0) \quad (2.76)$$

$$\bar{C}_{As}(x,t) = C_{As}(x,t) - C_{As}(x,0) \quad (2.77)$$

$$A_{Cs} = 35000 \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{4} d_0^2 - \frac{\pi r_0^2}{2} \right) \quad (2.78)$$

และ $u(t - \tau_s)$ คือ ฟังก์ชันหน่วย (unit function) ซึ่ง $u(t - \tau_s) = 0$ เมื่อ $t < \tau_s$, $u(t - \tau_s) = 1$ เมื่อ $t \geq \tau_s$

สามารถบ่งชี้ความแม่นยำของแบบจำลองผ่านค่าความแปรปรวน (Deviation) ดังสมการ 2.79

$$\%Deviation = \frac{\sum_{i=1}^j \left(\frac{C_{Expt.} - C_{Theo.}}{C_{Expt.}} \right)}{j} \times 100 \quad (2.79)$$

เมื่อ $C_{Expt.}$ = ค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ได้จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 $C_{Theo.}$ = ค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ได้จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

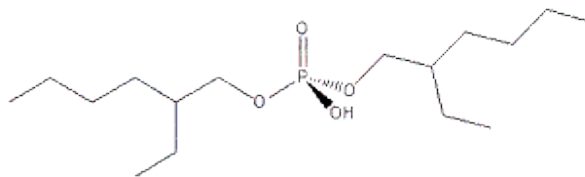
ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้และรายละเอียดการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษาการสกัดไอออนของสังกะสี

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	บริษัท
สารละลายป้อน	น้ำทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวโดยสังกะสีฟอสเฟต	บริษัท ไทย เอ็น โอเค จำกัด
สารปรับค่าความเป็นกรด-เบส	กรดฟอสฟอริก กรดไนตริก โซเดียมไฮดรอกไซด์	Sigma – Aldrich Ltd. Sigma – Aldrich Ltd. Sigma – Aldrich Ltd.
สารสกัด	D2EHPA Cyanex 272 TBP	Merck Ltd. Cytec Canada Inc. Merck Ltd.
ตัวทำละลายอินทรีย์	ไดคลอโรโรมีเทน โทลูอิน ไซโคลเฮกเซน เฮปเทน	Merck Ltd. Merck Ltd. Merck Ltd. Sigma – Aldrich Ltd.
สารละลายนำกลับ	กรดซัลฟูริก	Sigma – Aldrich Ltd.

โดยสูตร โครงสร้างสารสกัดD2EHPAแสดงได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารสกัดD2EHPA (Di-2-ethylhexyl phosphoric acid)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ประกอบด้วยเครื่องสูบ 2 ชุด ที่มีอัตราไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation (Fred, 1996)

2. อุปกรณ์เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงบนตัวรองรับที่ผลิตจากพอลิโพรไพลีนชนิดมีรูพรุน Celgard[®] X-40 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นมอดูล เป็นระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน ดังภาพที่ 2.4 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.2

3. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ EUTECH instrument รุ่น cyberscan pH310 สามารถวัดค่าความเป็นกรด-เบส ได้ในช่วง 0.00-14.00 ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส EUTECH instrument รุ่น cyberscan pH310

4. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS ใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนโลหะดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS

ตารางที่ 3.2 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยกลวงพอลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	ชนิด / ขนาด
วัสดุเส้นใยกลวง	พอลิโพรพิลีน
จำนวนเส้นใยกลวง	35,000 เส้น
ความพรุนของเส้นใยกลวง	25 %
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.03 ไมโครเมตร
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 ตารางเมตร
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
มิติของชุดเส้นใยกลวง (เส้นผ่านศูนย์กลาง×ความยาว)	2.5×8 นิ้ว
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1 ถึง 60 องศาเซลเซียส

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนการทดลอง ซึ่งก่อนการทดลองทุกครั้งต้องตรวจสอบสภาพอุปกรณ์

3.3.1 ผลของชนิดสารสกัด

1. เตรียมสารละลายป้อน พร้อมเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปหาปริมาณของไอออนโลหะโดยเครื่อง AAS
2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว D2EHPA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโทลูอีน
3. เตรียมสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร
4. ทดสอบผลของสารสกัดที่ระยะเวลาปฏิบัติการ 50 นาที ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการสกัดโดยเครื่อง AAS
6. ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 2-5 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนชนิดของสารสกัดเป็น Cyanex 272 และ TBP ตามลำดับ

3.3.2 ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่มีผลต่อการสกัดไอออนสังกะสี

1. วัดค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเริ่มต้น
2. ปรับค่าความเป็นกรด-เบส โดยใช้กรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ได้ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 1.0 พร้อมเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปหาปริมาณของไอออนโลหะโดยเครื่อง AAS
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร
4. เตรียมสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกปริมาตร 5 ลิตรที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร
5. ทดสอบผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ระยะเวลาปฏิบัติการ 50 นาที ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

6. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการสกัดโดยเครื่อง AAS

7. ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 2-6 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนปรับค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายป้อนที่ 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 และ 5.0 ตามลำดับ

3.3.3 ความเข้มข้นของสารสกัดที่มีผลต่อการสกัดไอออนสังกะสี

1. เตรียมสารละลายป้อนที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 2.5 พร้อมเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปหาปริมาณของไอออนโลหะโดยเครื่อง AAS

2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.7 โดยปริมาตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกปริมาตร 5 ลิตรที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

4. ทดสอบผลของความเข้มข้นของสารสกัดที่ระยะเวลาปฏิบัติการ 50 นาที ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการสกัดโดยเครื่อง AAS

6. เก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการนำกลับโดยเครื่อง AAS

7. ทำความสะอาดมอดูลเส้นใยกลวง

8. ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 2-7 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดเป็นร้อยละ 5.0, 6.5 และ 8.3 โดยปริมาตร ตามลำดับ

3.3.4 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่มีผลต่อการนำกลับไอออนสังกะสี

1. เตรียมสารละลายป้อนที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 2.5 พร้อมเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปหาปริมาณของไอออนโลหะโดยเครื่อง AAS

2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร พร้อมทั้งวัดค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายนำกลับ
4. ทดสอบผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับที่ระยะเวลาปฏิบัติการ 50 นาทีที่ อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการสกัดโดยเครื่อง AAS
6. เก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการนำกลับโดยเครื่อง AAS
7. ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 2-6 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ เป็น 0.075, 0.100, 0.125 และ 0.150 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

3.3.5 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่มีผลต่อการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสี

1. เตรียมสารละลายป้อนที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 2.5 พร้อมเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปหาความปริมาณของไอออนโลหะโดยเครื่อง AAS
2. เตรียมเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร พร้อมทั้งวัดค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายนำกลับ
4. ปรับอัตราการไหลของสารละลายป้อนเท่ากับ 75, 100, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ โดยให้อัตราการไหลของฝั่งสารละลายนำกลับคงที่ จากนั้นปรับอัตราการไหลของสารละลายนำกลับเท่ากับ 75, 100, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที เช่นกัน โดยให้โดยให้อัตราการไหลของฝั่งสารละลายป้อนคงที่ แต่ละสภาวะใช้โดยใช้ระยะเวลาปฏิบัติการ 30 นาที
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการสกัดโดยเครื่อง AAS
6. เก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการนำกลับโดยเครื่อง AAS

3.3.6 ชนิดของตัวทำละลายที่มีผลต่อร้อยละการสกัด ร้อยละการนำกลับและอายุการใช้งาน

1. เตรียมน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมให้มีค่าความเป็นกรด-เบสที่ 2.5 พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม (สารละลายป้อน) เพื่อนำไปหาปริมาณของไอออนโลหะโดยเครื่อง AAS
2. เตรียมเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกปริมาตร 5 ลิตร ที่ความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร พร้อมทั้งวัดค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายนำกลับ
4. ทดสอบผลที่ระยะเวลาปฏิบัติการ 300 นาที (5 ชั่วโมง) ต่อเนื่อง
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกของแต่ละสถานะ แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการสกัดโดยเครื่อง AAS
6. เก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับขาเข้า โดยเก็บจากถังของสารละลายนำกลับ จากนั้นเก็บตัวอย่างของสารละลายนำกลับขาออกของแต่ละสถานะ แล้วนำไปวิเคราะห์ผลการนำกลับโดยเครื่อง AAS
7. ทำความสะอาดมอดูลเส้นใยกลวง
8. ทำการทดสอบซ้ำในหัวข้อที่ 1-7 โดยทำการเปลี่ยนตัวทำละลายเป็น ไดคลอโรมีเทน, ไชโคลเฮกเซน และ เฮปเทน ตามลำดับพร้อมทั้งปรับความเข้มข้นของสารสกัด ตามวิธีการทดลองที่ 3.3.3

3.3.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสี

1. เตรียมสารละลายป้อนที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 2.5 ที่มีความเข้มข้นของไอออนสังกะสีเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พร้อมเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปหาความปริมาณของไอออนโลหะโดยเครื่อง AAS
2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกปริมาตร 5 ลิตรที่ความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร

4. ทดสอบผลของความเข้มข้นของสารสกัดที่ระยะเวลาปฏิบัติการ 30 นาที ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
5. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการสกัดโดยเครื่อง AAS
6. เก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการนำกลับโดยเครื่อง AAS
7. การทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 1-6 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนเท่ากับ 35, 45, 55 และ 65 ตามลำดับ

3.3.8 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสี

1. เตรียมสารละลายป้อนที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่ 2.5 พร้อมเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนเพื่อนำไปหาปริมาณของไอออนโลหะโดยเครื่อง AAS
2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอิน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกปริมาตร 5 ลิตรที่ความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร
4. ทำการทดลองโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส
5. นำถึงสารละลายป้อนขาเข้าและถึงสารละลายนำกลับ วางลงไปในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แล้วรอนจนกว่าอุณหภูมิภายในถึงจะถึง 30 องศาเซลเซียส
6. ทดสอบผลของอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาปฏิบัติการ 30 นาที ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
7. เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการสกัดโดยเครื่อง AAS
8. เก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับขาออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะจากผลการนำกลับโดยเครื่อง AAS
9. ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อที่ 3-8 อีกครั้ง โดยเปลี่ยนการควบคุมอุณหภูมิที่ 35, 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.4 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว

การป้อนสารสกัดและตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายเข้าด้วยกันแล้ว ให้เข้าสู่รูพรุนของเยื่อแผ่นเหลว ต้องทำการป้อนทั้งภายในเส้นใยกลวงและภายนอกเส้นใยกลวงหรือชั้นเปลือก โดยส่วนมากนิยมให้ไหลสวนทางกัน ใช้เวลาประมาณ 50-80 นาที จนให้แน่ใจว่าสารสกัดยึดตรึงอยู่ในรูพรุนตลอดตามแนวยาวของมอดูล จากนั้นชะล้างสารสกัดส่วนเกินออกโดยการป้อนน้ำปราศจากไอออนทั้งภายในและภายนอกเส้นใยกลวง

3.5 ขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลวง

ในการทดลองทุกครั้งหลังจากการใช้เครื่องมือจะต้องมีการล้างทำความสะอาดตัวรองรับเส้นใยกลวงเนื่องจากรูพรุนจุลภาคภายในจะถูกอุดตันไปด้วยสิ่งสกปรกปรกวมถึงสารเคมีต่างๆ ซึ่งจะเป็นตัวแปรหนึ่งที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง รวมถึงอาจทำให้ผลการทดลองครั้งต่อไปคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลวงจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นในข้างต้น สำหรับวิธีการล้างทำความสะอาดเส้นใยกลวงมีขั้นตอนดังนี้

1. ล้างเส้นใยกลวงด้วยน้ำกลั่นไหลผ่านมอดูลอย่างต่อเนื่องประมาณ 15 นาที
2. ใช้สารละลายกรดที่มีความสามารถละลายสารที่อุดตันในรูพรุนของเส้นใยกลวงได้ ซึ่งกรดดังกล่าวต้องมีความเข้มข้นไม่เกิน 1 โมลต่อลิตรไหลวนในมอดูล เป็นเวลา 20 นาที
3. ใช้สารทำความสะอาดไหลวนในมอดูล เป็นเวลา 15 นาที
4. ให้น้ำกลั่นไหลผ่านมอดูลอย่างต่อเนื่อง ประมาณ 10-15 นาที

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้แสดงผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสี ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ผลของตัวทำละลายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ อายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัด ผลของอุณหภูมิ และการประยุกต์แบบจำลองการถ่ายเทมวลกับผลการทดลอง

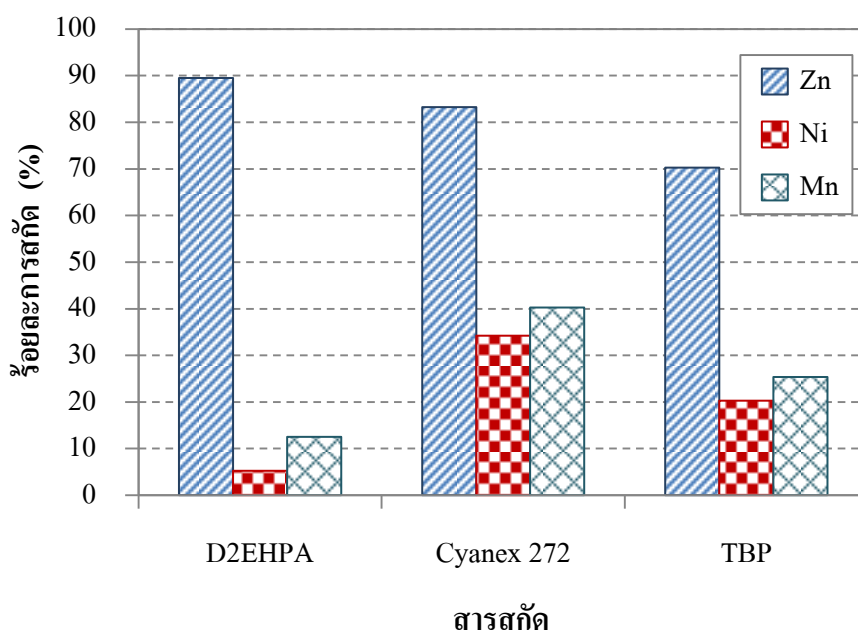
รูปแบบการปฏิบัติการผ่าน (operation mode) ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เป็นปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-batch) บนสารละลายป้อนรูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน (counter-transport)

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลของชนิดสารสกัด

การศึกษาผลของสารสกัดต่อร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสี ไอออนนิกเกิล และไอออนแมงกานีส รวมถึงผลของค่าดัชนีการคัดเลือกต่อการสกัดไอออนสังกะสีและค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสีออกจากไอออนนิกเกิลและแมงกานีส ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างสารสกัดชนิดกรด 2 ชนิด และสารสกัดชนิดกลาง 1 ชนิด คือ D2EHPA, Cyanex 272 และ TBP ตามลำดับ ศึกษาโดยการกำหนดปัจจัยคงที่ดังนี้ ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีมีค่าเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของไอออนแมงกานีสมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นให้มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณความเข้มข้นของไอออนโลหะในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสารสกัดทั้งหมดถูกนำมาละลายในตัวทำละลายโทลูอีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร และสารละลายนำกลับคือกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 3.0 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการสังเคราะห์สารละลายป้อน ผลการศึกษาเป็นดังภาพที่ 4.1 พบว่าค่าร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสีของสารสกัดชนิดกรดนั้นสูง

กว่า สารสกัดชนิดซอลเวทหรือชนิดกลาง โดยร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสีของ D2EHPA และ Cyanex 272 นั้นสูงสุดที่ร้อยละ 89 และ 83 ตามลำดับ ส่วนสารสกัด TBP ให้ร้อยละการสกัดที่ 70 และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีการคัดเลือกต่อการสกัดไอออนสังกะสีกับค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสีออกจากไอออนนิกเกิลและแมงกานีสดังตารางที่ 4.1 พบว่าไอออนสังกะสีสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารสกัด D2EHPA โดยให้ค่าดัชนีการคัดเลือกต่อการสกัดไอออนสังกะสีที่ 83.5 ค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสีออกจากไอออนนิกเกิลเท่ากับ 148.2 และค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสีออกจากไอออนแมงกานีสเท่ากับ 80.0 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับสารสกัดชนิดอื่น แสดงว่าหมู่ฟังก์ชัน $-POOH$ ของ D2EHPA สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับไอออนประจุสองบวกเหนือกว่าสารสกัดชนิด อื่นทั้งที่ความจำเพาะต่อการเกิดปฏิกิริยากับ ไอออนสังกะสีเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดี ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของไอออนสังกะสีที่สามารถทำปฏิกิริยากับ D2EHPA ได้ดี (Cheng, 2000) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือก D2EHPA เป็นสารสกัดเพื่อใช้ศึกษาสภาวะการแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่ยุ่งด้วยเส้นใยกลวง



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสี ไอออนนิกเกิล และไอออนแมงกานีสกับชนิดของสารสกัด

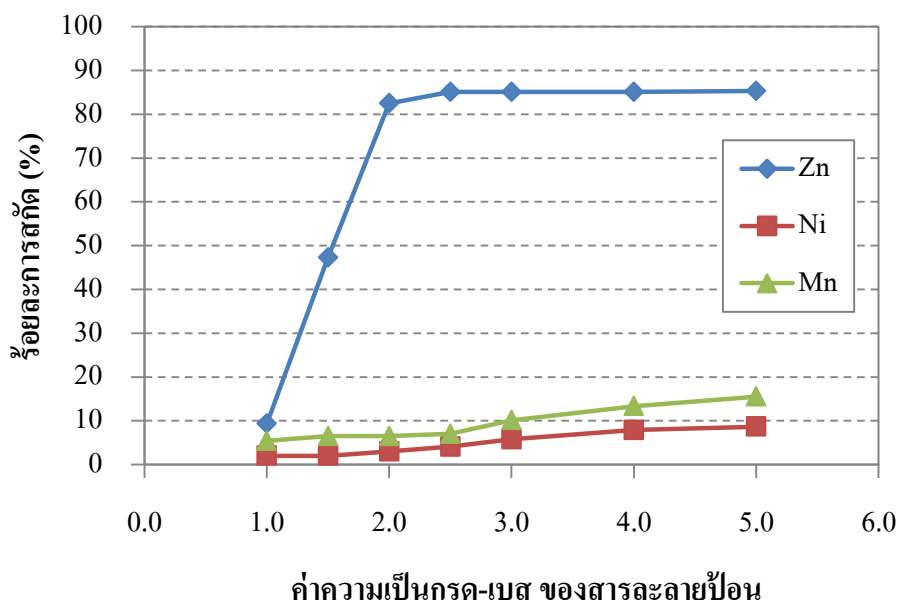
ตารางที่ 4.1 ผลของชนิดของสารสกัดต่อการแยกไอออนสังกะสี

ผลการแยกไอออนสังกะสี	D2EHPA	Cyanex 272	TBP
1. ร้อยละการสกัดไอออนสังกะสี (%)	89.5	83.2	70.3
2. ร้อยละการนำกลับไอออนสังกะสี (%)	52.4	45.2	37.1
3. ค่าดัชนีความจำเพาะต่อการเลือกสกัดไอออนสังกะสี	83.5	19.2	26.5
4. ค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสีออกจากไอออนนิกเกิล	148.2	8.9	5.9
5. ค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสีออกจากไอออนแมงกานีส	80.0	6.0	5.8

4.1.2 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่มีผลต่อร้อยละการสกัด โดยกำหนดปัจจัยคงที่ดังนี้ ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีมีค่าเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของไอออนแมงกานีสมีค่าเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นให้มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณความเข้มข้นของไอออนโลหะในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีนความเข้มข้นร้อยละ 10.0 โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน โดยใช้กรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าเมื่อเพิ่มความเป็นกรด-เบส (pH) ส่งผลให้เกิดการสกัดไอออนโลหะได้สูงขึ้นเนื่องจากการลดความเข้มข้นของประจุบวกลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาการสกัดมากกว่าปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังสมการที่ 2.14 แต่เมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนมากกว่า 3.0 พบว่าร้อยละการสกัดของไอออนนิกเกิลและไอออนแมงกานีสเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสีเริ่มคงที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ต่างกันของธาตุแต่ละชนิดในการทำปฏิกิริยากับสารสกัด D2EHPA เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยพบว่าไอออนสังกะสีประจุสองบวก (Zn^{2+}) เป็นธาตุที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ D2EHPA ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นที่มีประจุสองบวกเหมือนกัน (Cheng, 2000) ดังนั้นค่าความเป็นกรด-เบส

ที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนสังกะสีจากสารละลายป้อนจึงอยู่ในช่วงความเป็นกรด-เบสที่ 2.0-2.5 เพราะมีค่าความสามารถต่อการเลือกสกัดไอออนสังกะสีออกจากไอออนโลหะชนิดอื่น



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะในช่วงความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1.0-5.0

4.1.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอิน ที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดไอออนสังกะสี ทำการทดลองในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 1.7-10.0 โดยปริมาตรโดยกำหนดปัจจัยคงที่ดังนี้ ใช้ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.3 ซึ่งพบว่าร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เพิ่มมากขึ้น จนมีค่าร้อยละการสกัดสูงสุดที่ 91.5 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาการสกัดได้มากขึ้น จากนั้นร้อยละการสกัดจะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของสารสกัดที่สูง ส่งผลทำให้ความหนืดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวสูงขึ้น ทำ

ให้การถ่ายโอนมวลของสารประกอบเชิงซ้อนทำได้ช้าลง หรือก็คือส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ (D^*) น้อยลง ดังสมการของ Stokes และ Einstein (Schulz, 1998; Cussler, 1997) ดังสมการ 4.1

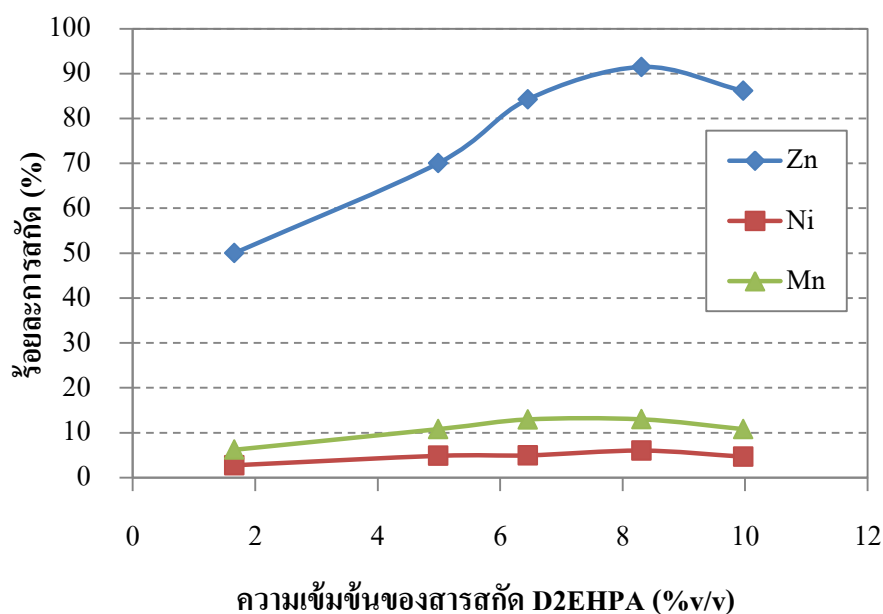
$$D^* = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} \quad (4.1)$$

เมื่อ k_B = ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ 1.3807×10^{-27} (กิโลกรัมตารางเซนติเมตรต่อวินาทีต่อเคลวิน)

T = อุณหภูมิ (เคลวิน)

η = ความหนืดของสารละลายในเยื่อแผ่นเหลว (กิโลกรัมต่อเซนติเมตรต่อวินาที)

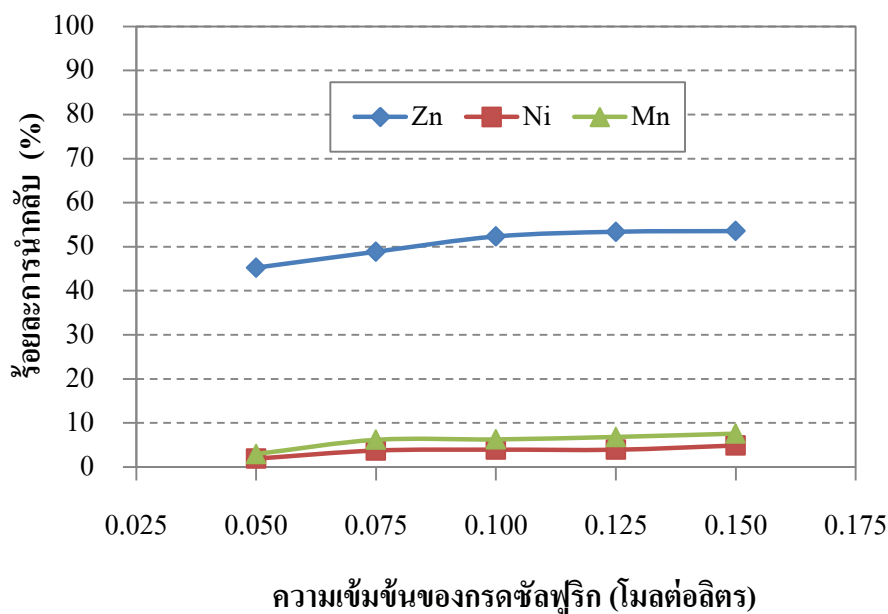
r = รัศมีโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน (เซนติเมตร)



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวกับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะ ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 1.7-10.0 โดยปริมาตร

4.1.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

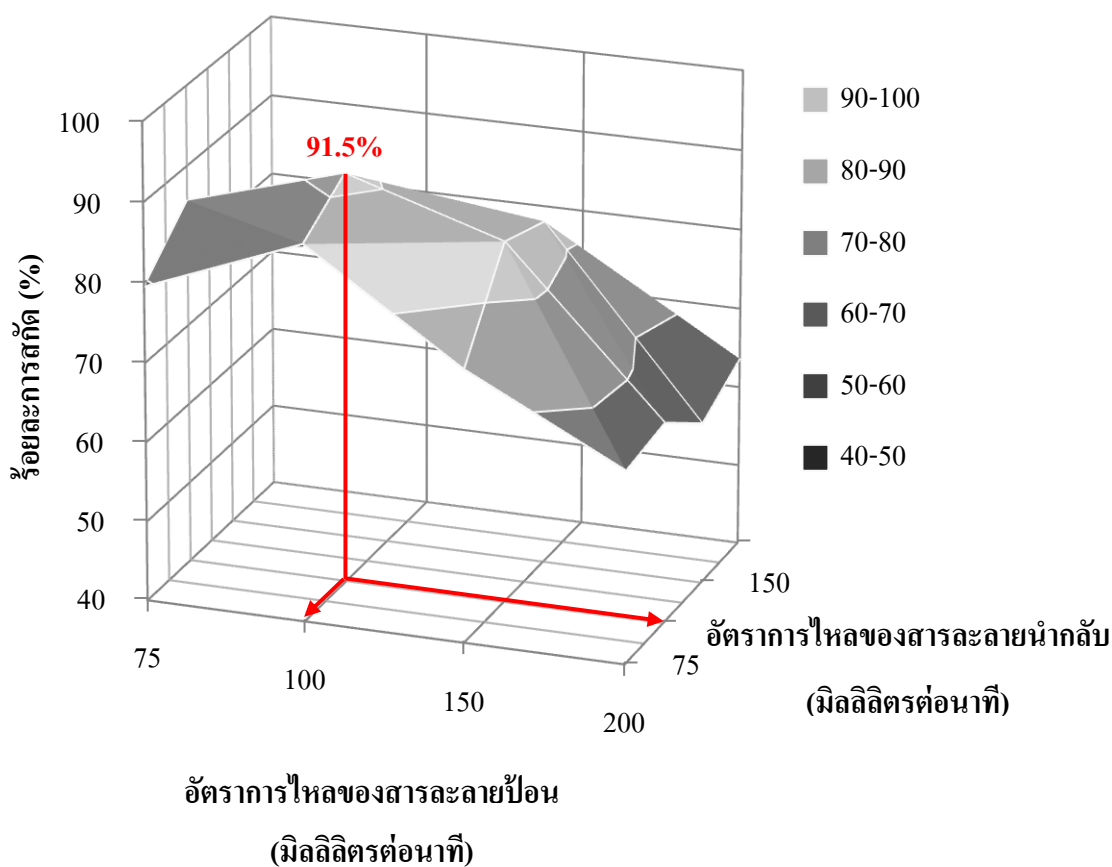
การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริก ทำการทดลองในช่วงความเข้มข้น 0.05-0.15 โมลต่อลิตร โดยกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ใช้ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีนความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตร ต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.4 พบว่าร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะเพิ่มขึ้น เมื่อสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้นในช่วงค่าเริ่มต้นที่ 0.05 โมลต่อลิตร ไปจนถึง 0.125 โมลต่อลิตร โดยให้ร้อยละการนำกลับสูงสุดที่ 53 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาการนำกลับตามหลักของเลอชาเตอลิเยร์ จากนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกเพิ่มมากขึ้น จะไม่ทำให้ร้อยละการนำกลับเพิ่มมากขึ้น เพราะอัตราการถ่ายเทมวลจำกัดเนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายเทมวลของมอดูลเส้นใยกลวงคงที่ (Wannachod และคณะ, 2011) ทำให้ร้อยละการนำกลับไม่เพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกมีค่ามากกว่า 0.125 โมลต่อลิตร



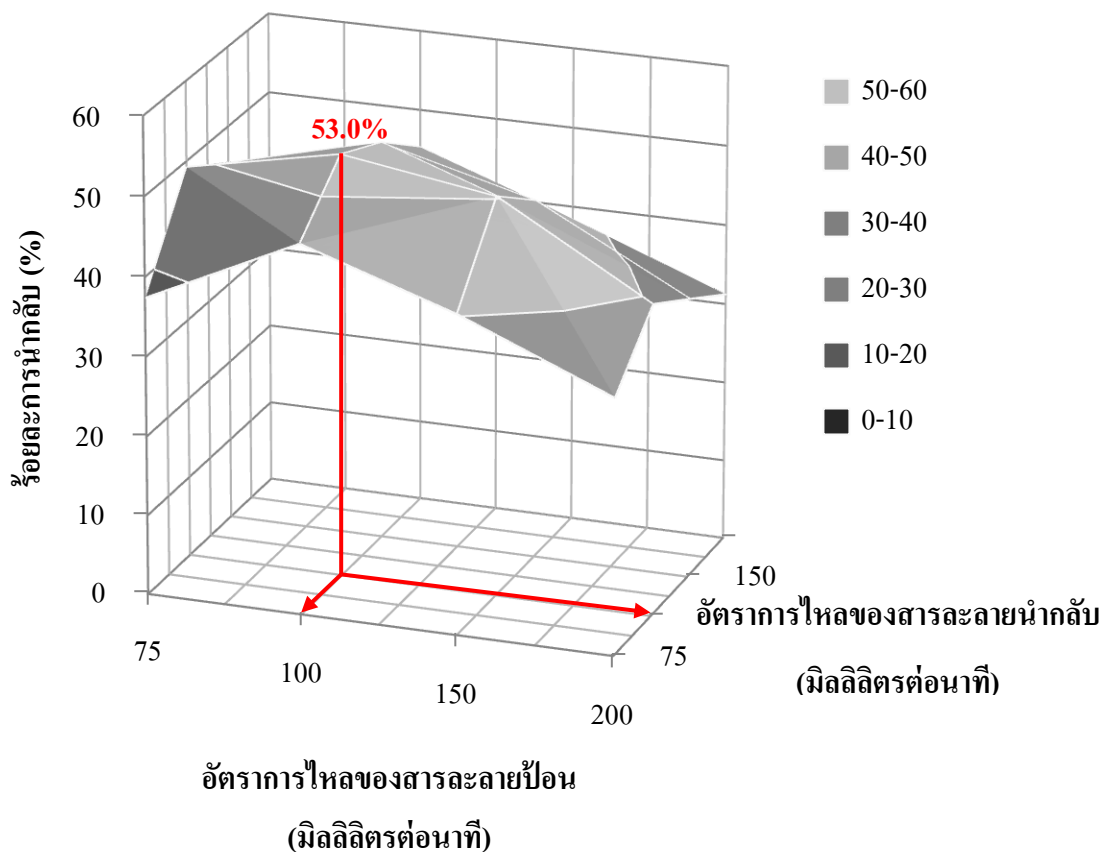
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกกับร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะในช่วงความเข้มข้น 0.05-0.15 โมลต่อลิตร

4.1.5 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลที่ 75, 100, 150 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ให้อัตราการไหลของสารละลายด้านใดด้านหนึ่งคงที่แล้วทำการปรับอัตราการไหลอีกด้านหนึ่งเพียงด้านเดียว โดยกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร และสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.5



(ก) ร้อยละการสกัด



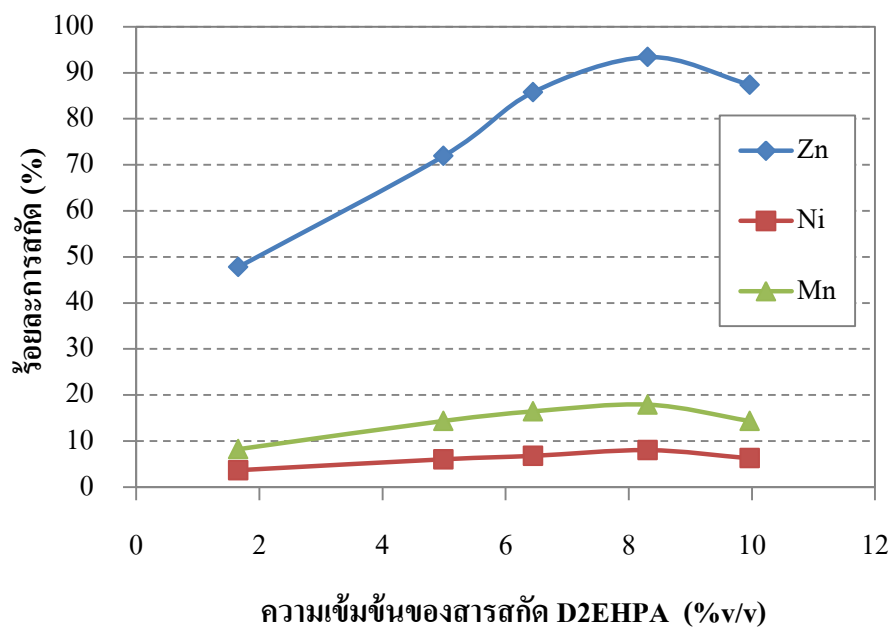
(ข) ร้อยละการนำกลับ

ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสีกับอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ (ก) ร้อยละการสกัด (ข) ร้อยละการนำกลับ

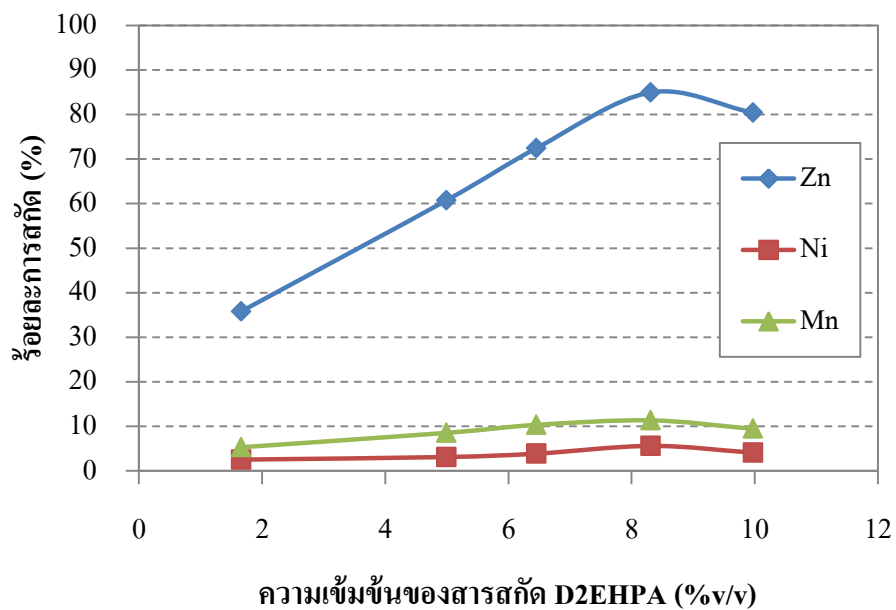
พบว่าอัตราการไหลซึ่งสัมพันธ์กับเวลาการสัมผัสระหว่างสารละลายกับเยื่อแผ่นเหลวที่ทำให้ร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับสูงสุดที่เท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้น ร้อยละการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสีลดลง เพราะอัตราการไหลที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เยื่อแผ่นเหลวที่ฝังในรูพรุนของเส้นใยกลวงหลุดออก เนื่องจากเกิดแรงเฉือนจากการไหลผ่านของสารละลาย นอกจากนี้การเพิ่มอัตราเร็วยังเป็นการลดเวลาการสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (Yang และ Kocherginsky, 2006)

4.1.6 ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว

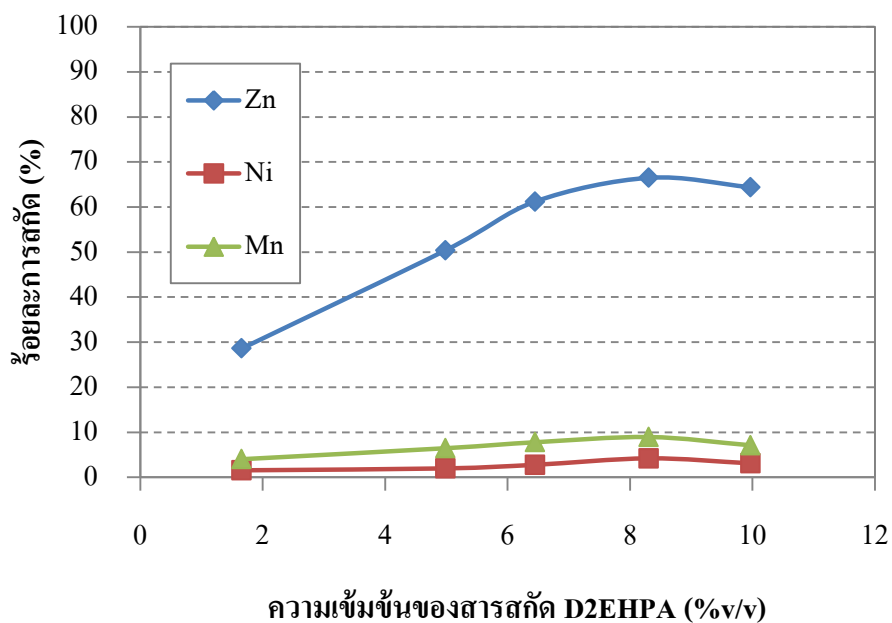
การศึกษาผลของชนิดของตัวทำละลายต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสีโดยใช้น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม ตัวทำละลายที่เลือกใช้ในการศึกษา พิจารณาจากคุณค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ คือเลือกตัวทำละลายที่หาง่าย ราคาถูก และนิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางเคมีที่อาจส่งผลต่อเสถียรภาพต่อการใช้งาน คือค่าความมีขั้ว (polarity) ของตัวทำละลาย (Szpakowka และ Nagy, 1997) โดยงานวิจัยนี้เลือก ตัวทำละลาย ไคคลอโรโรมีเทนมีค่าความมีขั้วเท่ากับ 3.1 ตัวทำละลายโทลูอินมีค่าความมีขั้วเท่ากับ 2.4 ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนมีค่าความมีขั้วเท่ากับ 0.2 และตัวทำละลายเฮปแทนมีค่าความมีขั้วเท่ากับ 0.1 ทำการทดลองโดยกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ ใช้สารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตร ต่อนาทีจากภาพที่ 4.6 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ร้อยละ 8.3 โดยปริมาตรให้ค่าการสกัดสูงสุดของทุกชนิดของตัวทำละลาย ทำการศึกษาอายุการใช้งานในช่วงเวลา 0-300 นาที (5 ชั่วโมง) ต่อเนื่อง ดังภาพที่ 4.7 สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด ร้อยละการนำกลับและอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวสำหรับตัวทำละลายแต่ละชนิดดังภาพที่ 4.8 พบว่าเมื่อค่าความมีขั้วเพิ่มขึ้น อายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวลดลง เนื่องจากมีความสามารถในการละลายในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเพิ่มมากขึ้นและความสามารถในการฝังในรูพรุนของเยื่อแผ่นเหลวกับเส้นใยกลวงลดลง โดยเส้นใยกลวงนั้นผลิตจากวัสดุที่ไม่มีขั้ว (Leepipatpiboon และคณะ, 2013) เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ พบว่าตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดคือ ไคคลอโรโรมีเทนและโทลูอิน แต่เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวร่วมด้วย พบว่าโทลูอินเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้และสามารถขยายผลสู่ภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้โดยโทลูอินให้ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับโดยรวมสูงสุดที่ร้อยละ 91 และ 56 ตามลำดับ ณ อายุการใช้งานที่ 210 นาที (3 ชั่วโมง 30 นาที) ทั้งนี้ตัวทำละลายไคคลอโรโรมีเทนอาจให้อายุการใช้งานที่สูงขึ้น หากใช้งานในประเทศเมืองหนาว เพราะในขณะที่ทำการทดลองพบว่าไคคลอโรโรมีเทนมีการระเหยออกตลอดเวลาเนื่องจากไคคลอโรโรมีเทนมีจุดเดือด ณ ความดันปกติเท่ากับ 40 องศาเซลเซียสเท่านั้น



(ก) ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน

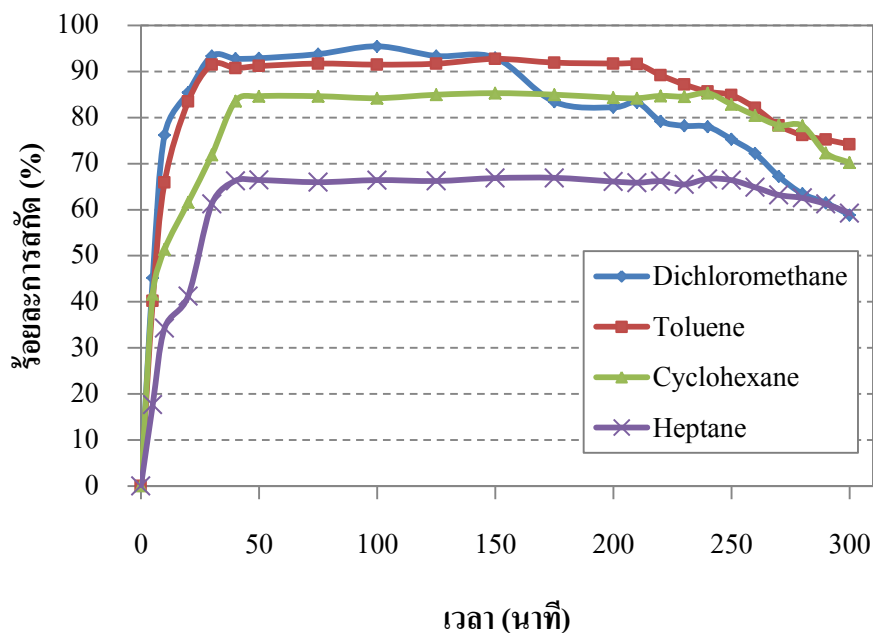


(ข) ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน

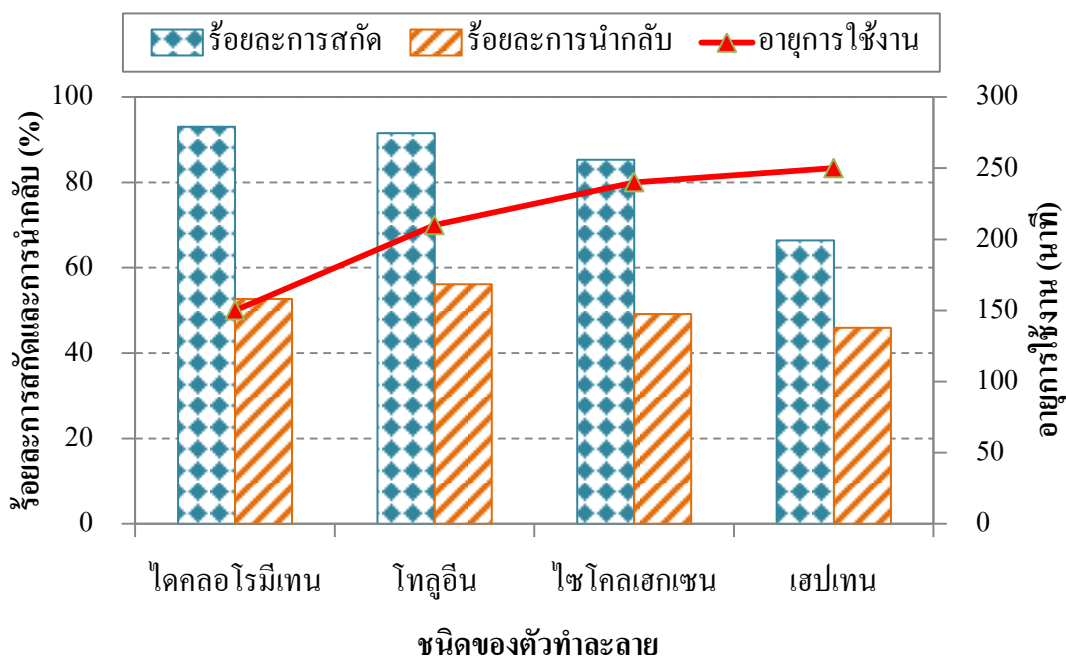


(ค) ตัวทำละลายเฮปเทน

ภาพที่ 4.6 ผลการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ (ก) ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (ข) ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน (ค) ตัวทำละลายเฮปเทน



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ กับเวลา

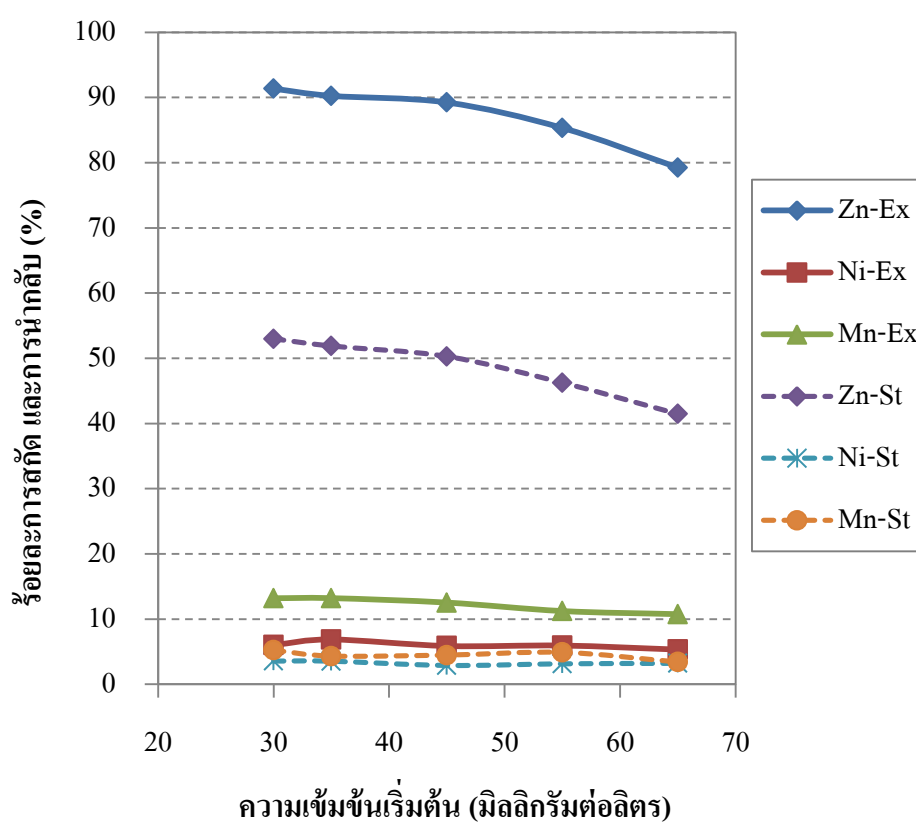


ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสีกับชนิดของตัวทำละลายและอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวกับชนิดของตัวทำละลาย

4.1.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้ตัวทำละลายโทลูอิน

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ โดยเพิ่มความเข้มข้นของไอออนสังกะสี เท่ากับ 30, 35, 45, 55 และ 65 โดยช่วงความเข้มข้นดังกล่าวอ้างอิงจากประวัติการเกิดความผิดปกติจากระบบการผลิตของบริษัท ไทย เอ็น โอค จำกัด ที่เคยส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของไอออนสังกะสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสูงถึง 57.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนไอออนนิกเกิลและไอออนแมงกานีสนั้นไม่เคยมีประวัติความเข้มข้นมากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงเลือกปรับความเข้มข้นของไอออนสังกะสีเพียงชนิดเดียวเท่านั้น การทดลองใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น คือ ค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอินเท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกเท่ากับ 0.125 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีผลแสดงดังภาพที่ 4.9 ซึ่งพบว่าการถ่ายเทมวลของมอดูลของเส้นใยกลวงที่ใช้สามารถรองรับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่า 45 มิลลิกรัมต่อ

ลิตรได้ โดยให้ผลประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสีใกล้เคียงร้อยละ 90 และ 50 โดยประมาณ ตามลำดับ แต่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีมากกว่า 45 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าร้อยละการสกัดและการนำกลับลดลงแต่ไม่ได้หมายความว่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่นั้นลดลง ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.2.4 ดังนั้นสถานะที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงเหมาะสมต่อการรองรับปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีที่ต่ำกว่า 45 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะผลการสกัดให้ค่าปริมาณไอออนสังกะสีที่สารละลายป้อนขาออกน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมประเทศไทย

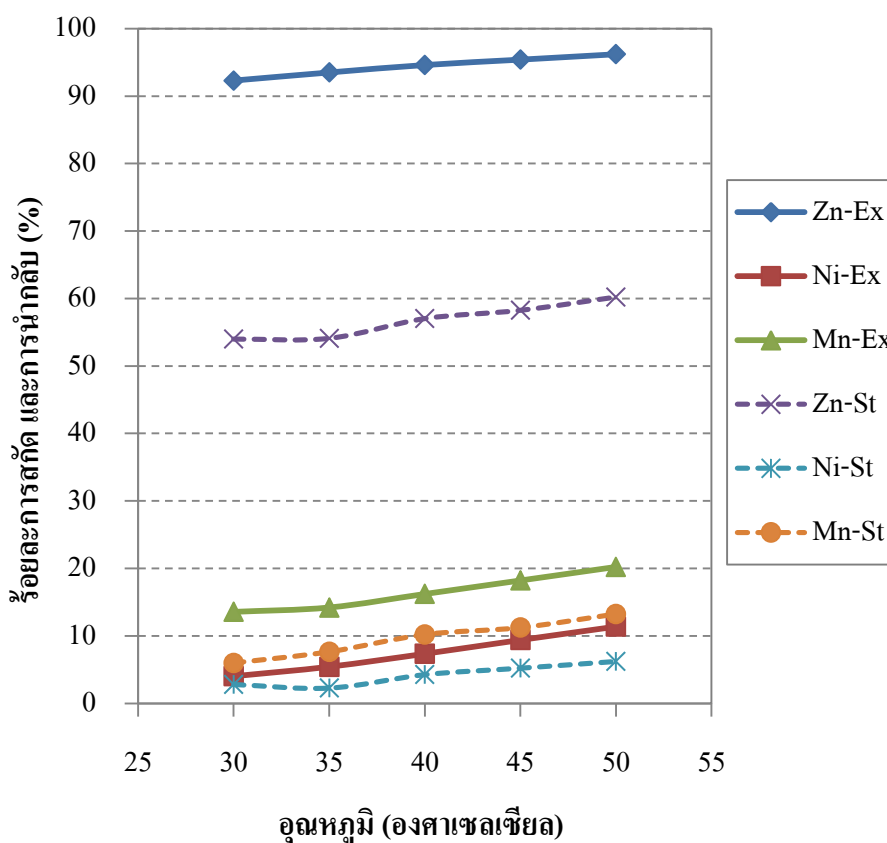


ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนสังกะสี ไอออนนิกเกิล และไอออนแมงกานีส

4.1.8 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

จากผลการทดลองพบว่าค่าร้อยละการสกัดนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้แต่ค่าร้อยละการนำกลับนั้นยังถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง โดยจากงานวิจัยของ Biswas และ Mondel พบว่าค่า

เอนทัลปี (ΔH) ของปฏิกิริยาผันกลับได้ระหว่างสารสกัด D2EHPA กับไอออนโลหะประจุสองบวก นั้น มีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายความว่าปฏิกิริยาการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Biswas และ Mandal, 2003) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงสามารถช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 30, 35, 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส ในการศึกษาผลของ อุณหภูมิต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับกำหนดให้ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน เท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีนเท่ากับร้อยละ 8.3 โดย ปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกเท่ากับ 0.125 โมลต่อลิตร และอัตราการ ไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีผลแสดงดังภาพ ที่ 4.10 ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวจะนำไปหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ และค่าคงที่อาร์เรเนียสของ ปฏิกิริยาเพื่อวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่ต่อไป

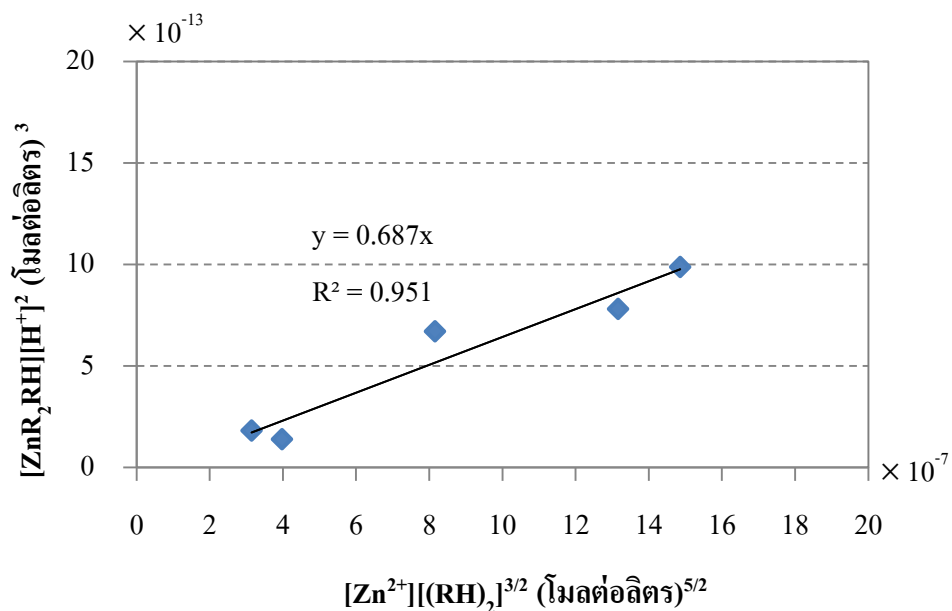


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนสังกะสี ไอออนนิกเกิล และไอออนแมงกานีส

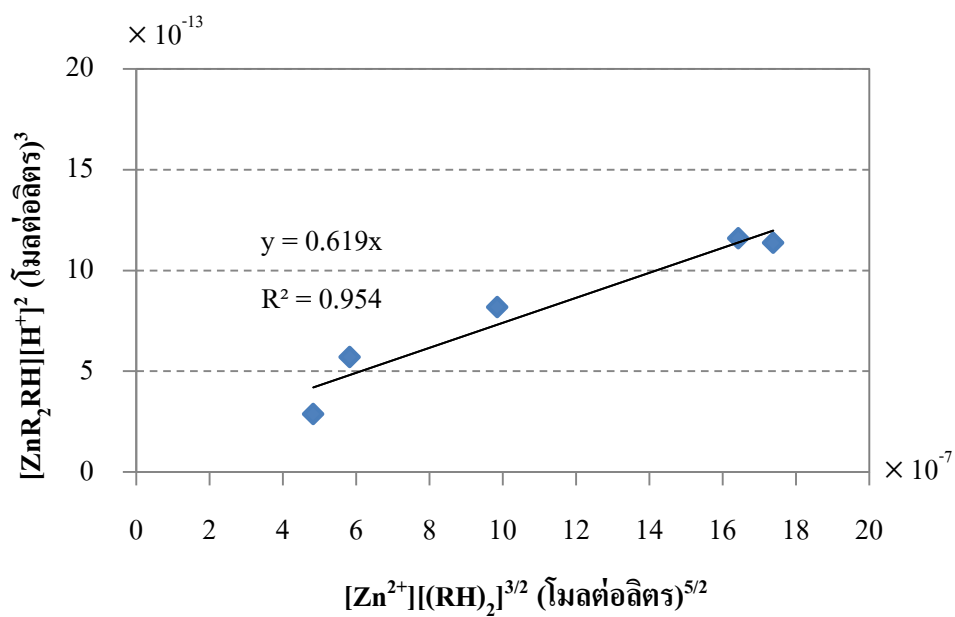
4.2 การประยุกต์แบบจำลองการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีด้วยแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใย กลวงกับผลการทดลอง

4.2.1 การคำนวณค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออน สังกะสี

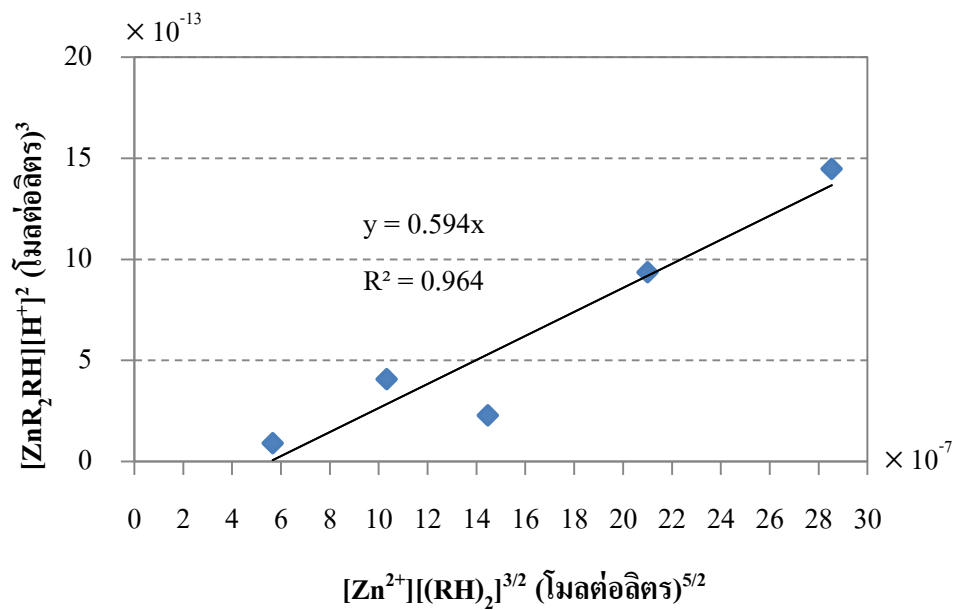
การคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี หาได้จากความชันของกราฟซึ่งมาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.22 ค่าความชันของกราฟแตกต่างตามชนิดของตัวทำละลายซึ่งตัวทำละลายไดคลอโรเทนค่าคงที่สมดุลที่ได้จากกราฟภาพที่ 4.11 (ก) มีค่าเท่ากับ 6.87×10^{-7} (โมลต่อลิตร)^{1/2} ตัวทำละลายโทลูอีน ค่าคงที่สมดุลที่ได้จากกราฟภาพที่ 4.11 (ข) มีค่าเท่ากับ 6.19×10^{-7} (โมลต่อลิตร)^{1/2} ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน ค่าคงที่สมดุลที่ได้จากกราฟภาพที่ 4.11 (ค) มีค่าเท่ากับ 5.94×10^{-7} (โมลต่อลิตร)^{1/2} และตัวทำละลายเฮปเทน ค่าคงที่สมดุลที่ได้จากกราฟภาพที่ 4.11 (ง) มีค่าเท่ากับ 2.18×10^{-7} (โมลต่อลิตร)^{1/2} สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี จำนวนได้จากสมการที่ 2.23 สามารถแสดงผลของตัวทำละลายสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ดังตารางที่ 4.2



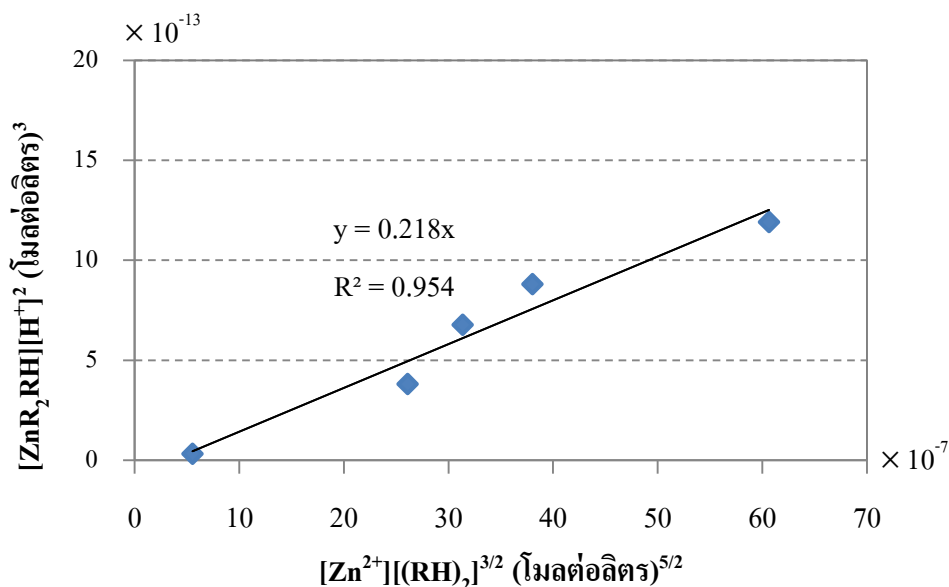
(ก) ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน



(ข) ตัวทำละลายโทลูอีน



(ค) ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน



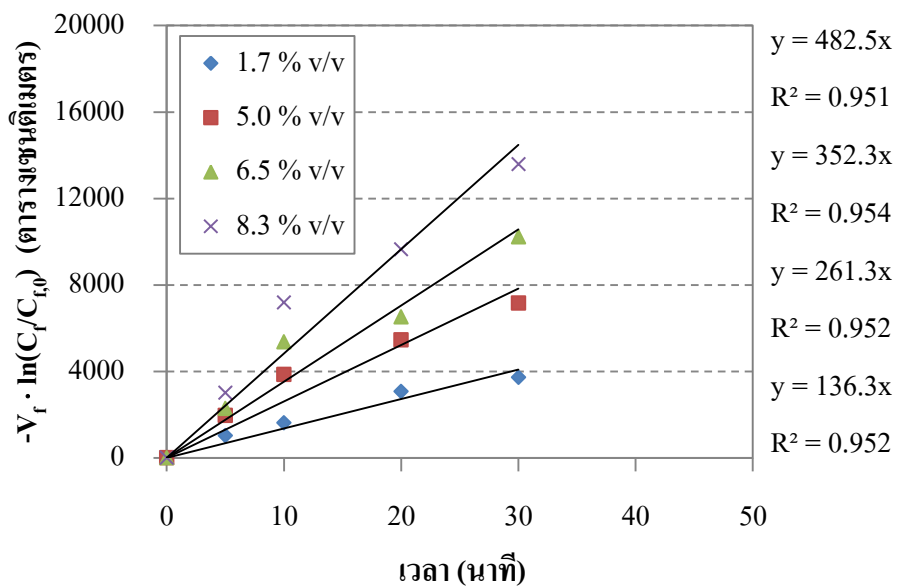
(ง) ตัวทำละลายเฮปเทน

ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $[Zn^{2+}][(RH)_2]^{3/2}$ และ $[ZnR_2RH][H^+]^2$ ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวร้อยละ 1.7-10.0 โดยปริมาตร สำหรับตัวทำละลายชนิดต่างๆ (ก) ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (ข) ตัวทำละลายโทลูอีน (ค) ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน (ง) ตัวทำละลายเฮปเทน

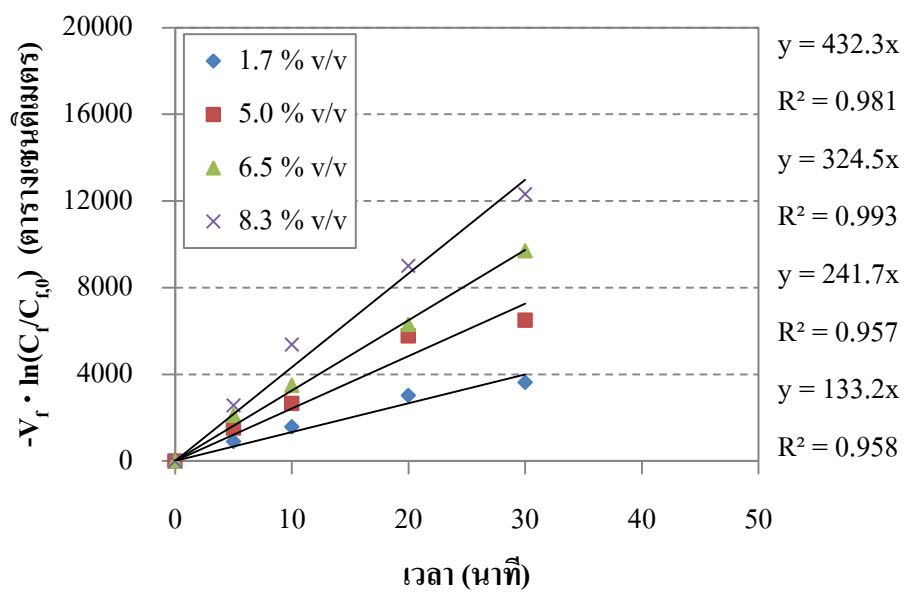
4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี

จากการทดลองโดยการเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลาย ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ร้อยละ 1.7-8.3 โดยปริมาตรแล้วทำการเก็บผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเทียบกับเวลา นำค่าที่ได้แทนในสมการที่ 2.24 และ 2.25 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln \left(\frac{C_f}{C_{f,0}} \right)$ เทียบกับเวลา ดัง

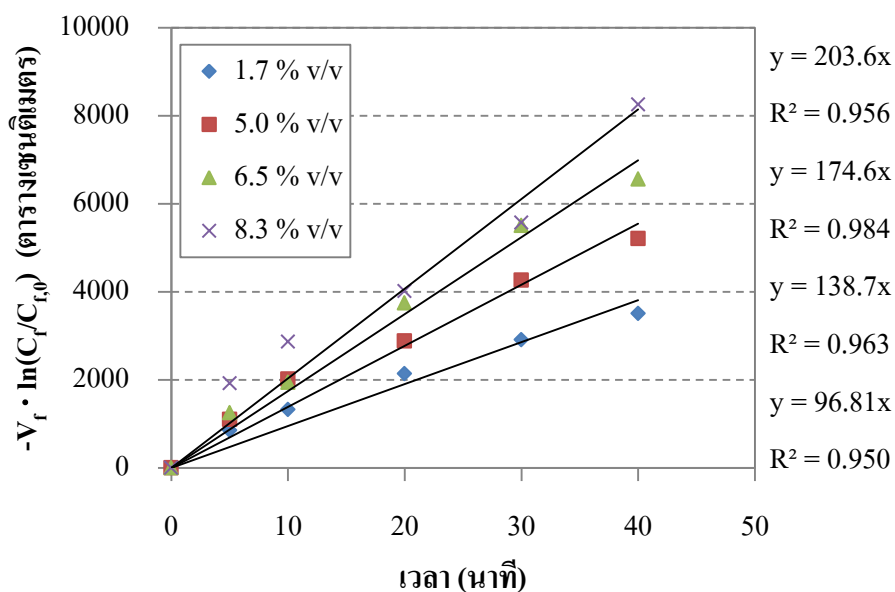
กราฟภาพที่ 4.12 ซึ่งความชันของกราฟ คือ $AP \frac{\phi}{\phi+1}$ สามารถหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสีดังแสดงในตารางที่ 4.2



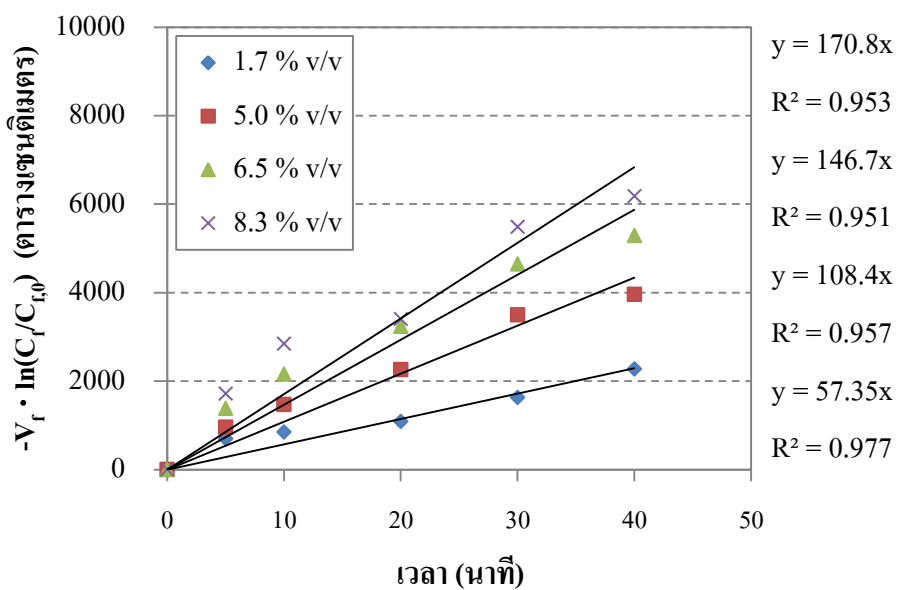
(ก) ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน



(ข) ตัวทำละลายโทลูอีน



(ค) ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน



(ง) ตัวทำละลายเฮปเทน

ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln(C_f/C_{f,0})$ กับเวลา ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA พิจารณาในช่วงร้อยละ 1.7-8.3 โดยปริมาตร ที่ตัวทำละลายชนิดต่างๆ (ก) ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (ข) ตัวทำละลายโทลูอีน (ค) ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน (ง) ตัวทำละลายเฮปเทน

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) สำหรับปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงเท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ของตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ตัวทำละลาย	ค่าความมีขี้	D	$P \times 10^2$ (เซนติเมตรต่อวินาที)
ไดคลอโรมีเทน	3.1	16.95	3.81
โทลูอิน	2.4	11.21	3.37
ไซโคลเฮกเซน	0.2	8.52	1.52
เฮปเทน	0.1	1.87	1.26

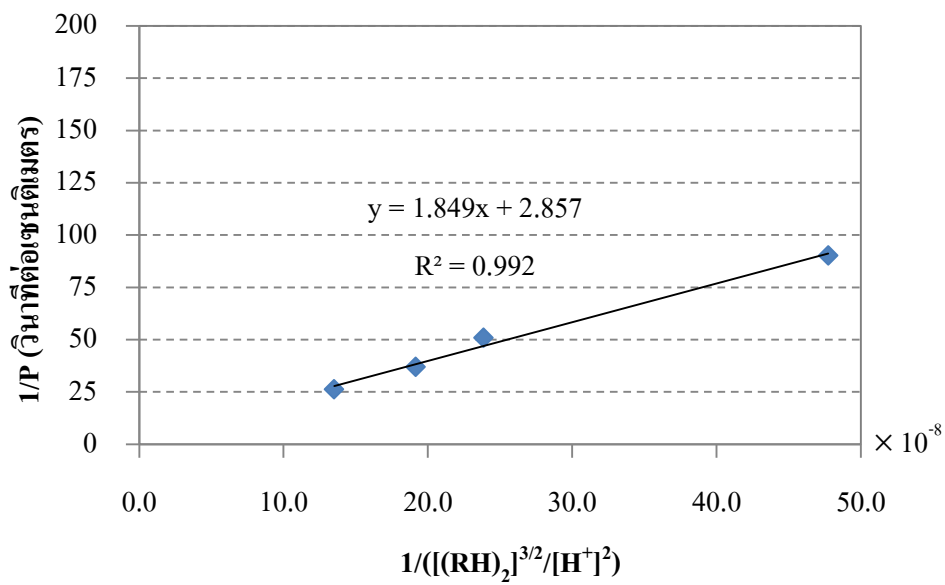
4.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อแผ่นเหลวของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี

จากสมการที่ 2.26 เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{P}$ กับ $\frac{1}{[(RH)_2]^{1.5} / [H^+]^2}$ ดัง

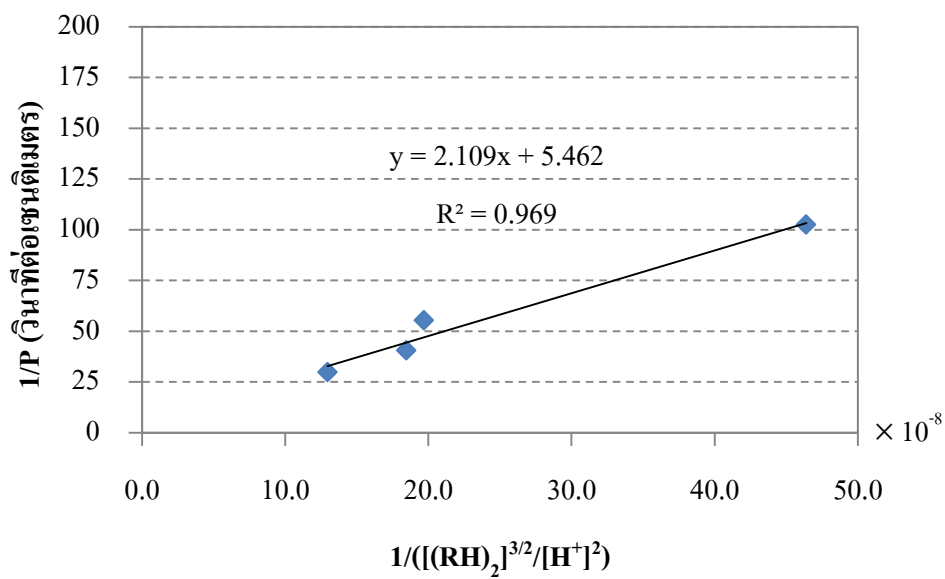
ภาพที่ 4.13 จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อน (k_p) ได้จากจุดตัดแกน $\frac{1}{P}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อ

แผ่นเหลว (k_m) จากความชันของกราฟ ซึ่งคือเทอม $\frac{r_i}{r_{lm}} \cdot \frac{1}{K_{ex} k_m}$ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

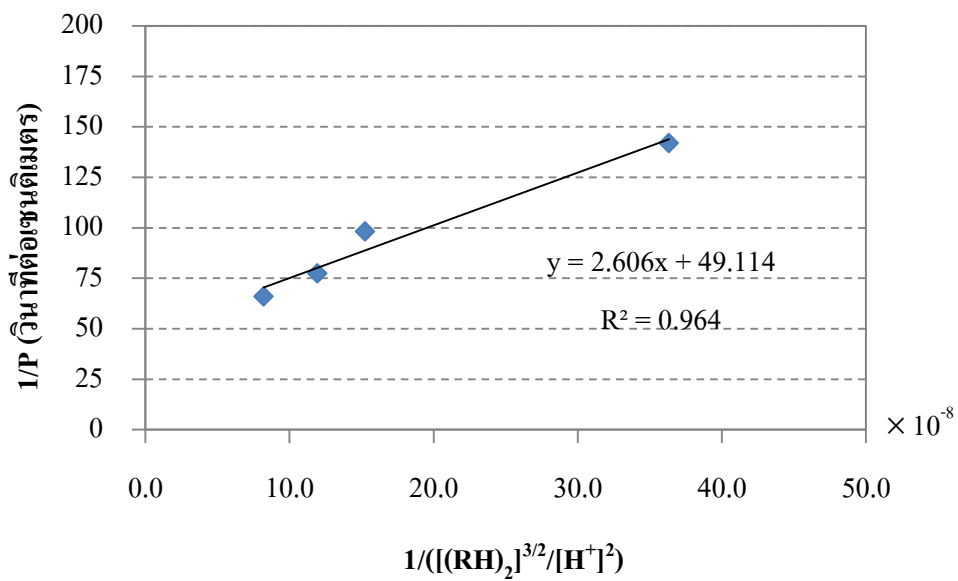
ของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อน (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อแผ่นเหลว (k_m) แสดงได้ดังตารางที่ 4.3



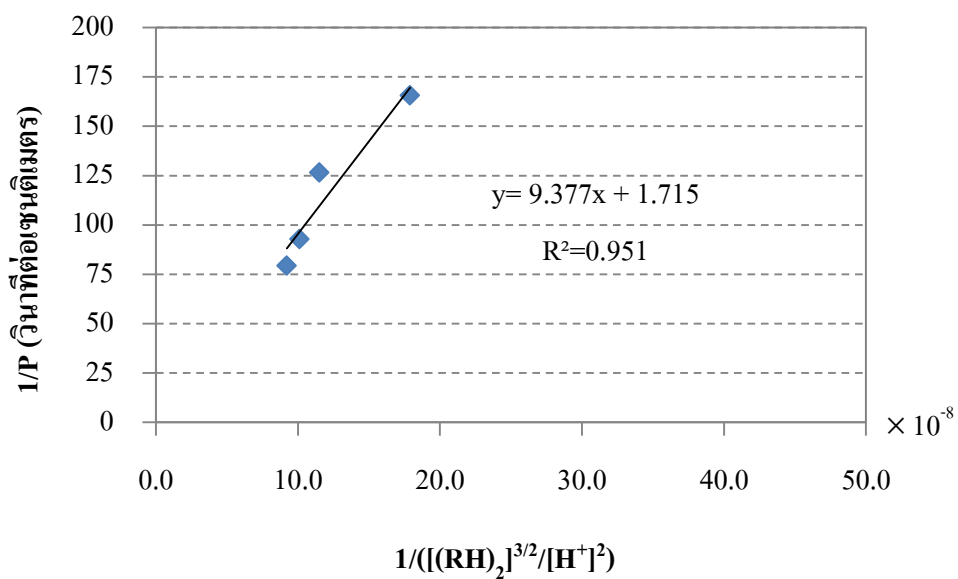
(ก) ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน



(ข) ตัวทำละลายโทลูอีน



(ค) ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน



(ง) ตัวทำละลายเฮปเทน

ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/P$ และ $1/[(RH)_2]^{3/2}/[H^+]^2$ สำหรับตัวทำละลายชนิดต่างๆ โดย (ก) ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (ข) ตัวทำละลายโทลูอีน (ค) ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน (ง) ตัวทำละลายเฮปเทน

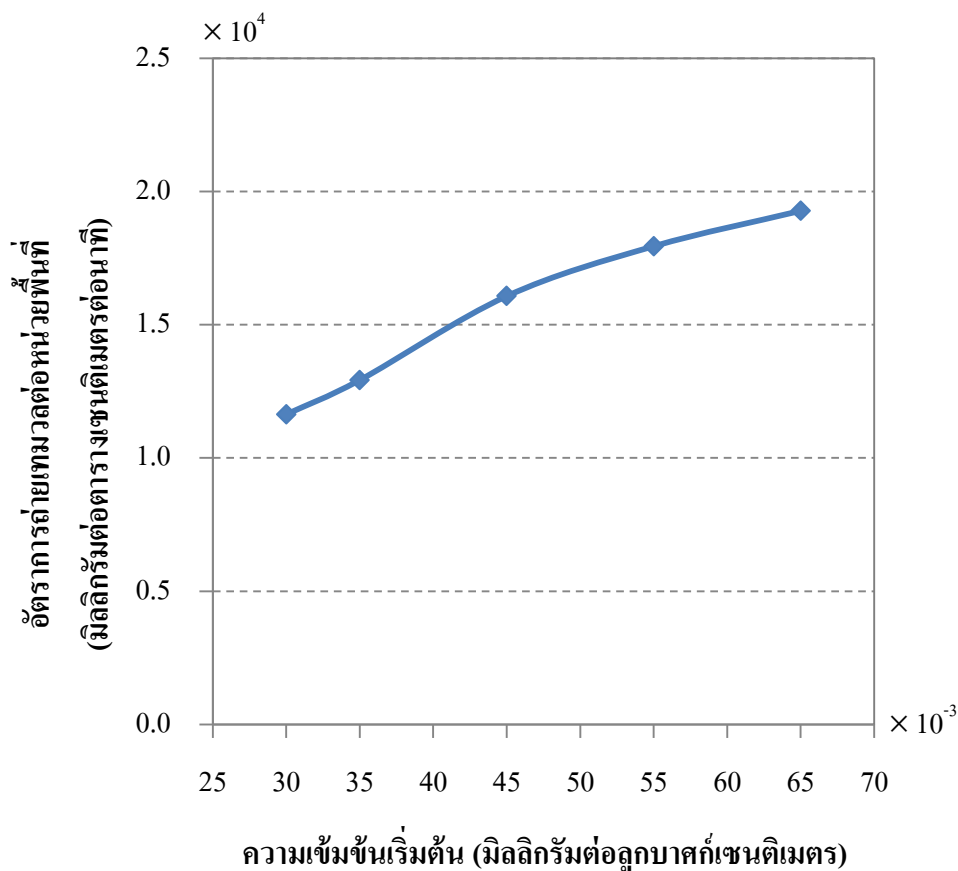
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อน (k_f) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อแผ่นเหลว (k_m) ของตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ตัวทำละลาย	ค่าความหนืด (cP)	k_f (เซนติเมตรต่อวินาที)	k_m (เซนติเมตรต่อวินาที)
ไคคลอโรมีเทน	0.44	0.35	0.0070
โทลูอิน	0.59	0.18	0.0068
ไซโคลเฮกเซน	1.00	0.02	0.0057
เฮปเทน	0.39	0.63	0.0041

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อน (k_f) ของตัวทำละลาย เฮปเทน > ไคคลอโรมีเทน > โทลูอิน > ไซโคลเฮกเซน แปรผกผันตามความหนืดโดยความหนืดของตัวทำละลาย เฮปเทน ไคคลอโรมีเทน โทลูอิน และ ไซโคลเฮกเซน คือ 0.39, 0.44, 0.59 และ 1.00 cP ตามลำดับ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อแผ่นเหลว (k_m) ของตัวทำละลาย ไคคลอโรมีเทน > โทลูอิน > ไซโคลเฮกเซน > เฮปเทน เป็นการสนับสนุนผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.5 ที่ว่าค่าความมีขั้วของสารละลายมีผลอย่างเป็นนัยสำคัญต่อการสกัด โดยตัวทำละลายที่มีความเป็นขั้วต่ำ จะฝังอยู่ในรูพรุนของเส้นใยกลวงได้ดี ยากต่อการเกิดความเสียหาย ในขณะที่ตัวทำละลายที่มีความเป็นขั้วสูงจะถูกทำลายได้ง่ายทำให้เยื่อแผ่นเหลวเกิดการหลุดรูดออกได้ง่าย (Leepipatpiboon และคณะ, 2013)

4.2.4 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่

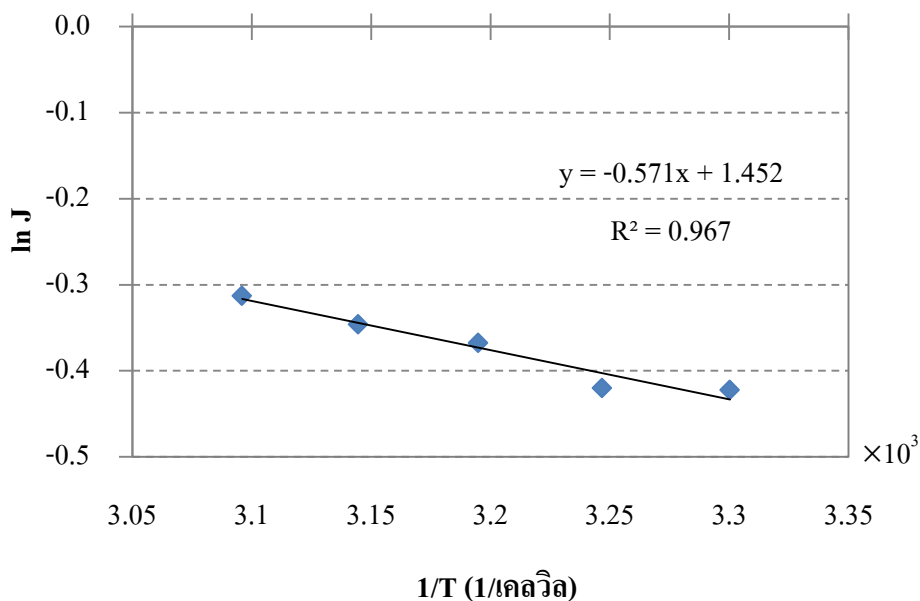
จากการทดลองภาพที่ 4.9 เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสี พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีน้อยกว่า 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่พบความแตกต่างที่ของร้อยละการสกัดและการนำกลับอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณา ค่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่ ณ ความเข้มข้นเริ่มต้นแต่ละค่า ดังภาพที่ 4.14 พบว่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นที่ทำการศึกษา



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่และความเข้มข้นเริ่มต้น

4.2.5 อุณหภูมิที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่

จากสมการที่ 2.40 และ 2.41 เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ และ $1/T$ ดังภาพที่ 4.15 จะสามารถหาค่าแฟกเตอร์ความถี่ (A) ได้จากจุดตัดแกน $\ln J$ และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_d) จากความชัน ซึ่งคือเทอม $-E_d/R$ ดังนั้นค่าคงที่อาร์เรเนียสในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาเท่ากับ 1.452 มิลลิกรัมต่อตารางเมตรต่อนาที และค่าพลังงานก่อกัมมันต์เท่ากับ 4.7 กิโลจูลต่อโมลจากการรายงานของ Kislik กล่าวว่า ถ้าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวน้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การเปลี่ยนการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้น เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการแพร่ผ่านเท่านั้น ไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยา (Kislik, 2010) ดังนั้นผลของงานวิจัยนี้จึงพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นในขอบเขตที่ทำการศึกษา ส่งผลให้ความหนืดของเยื่อแผ่นเหลวลดลง ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่สูงขึ้น (Sunsandee และคณะ, 2013) ดังสมการที่ 4.1 เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มสูงขึ้นตามกฎของฟิค (Fick's law)

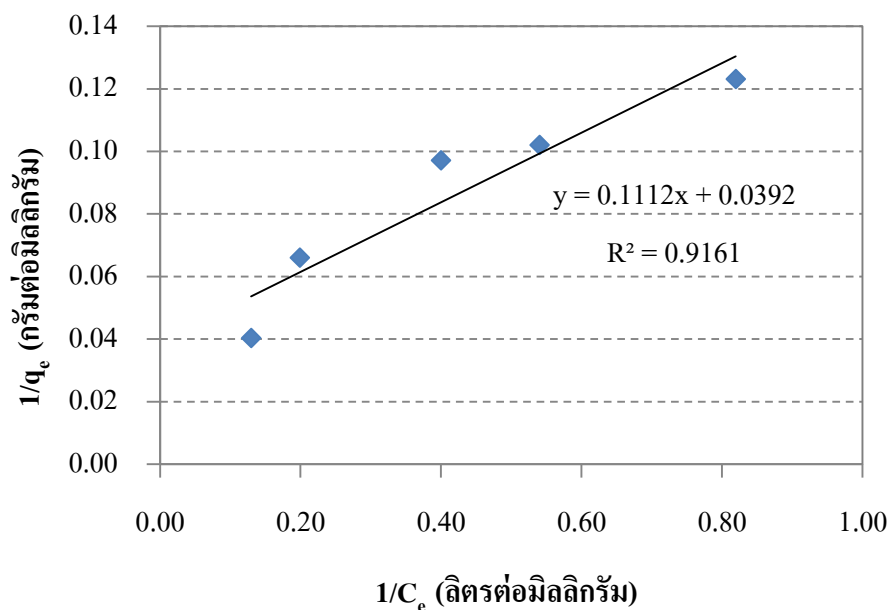


ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่กับอุณหภูมิที่มีผลต่อการสกัด

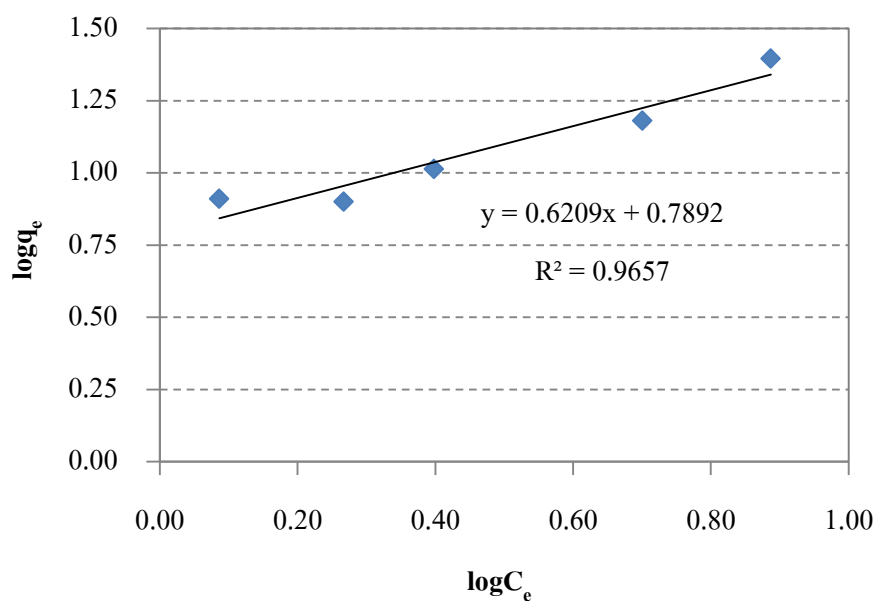
4.2.6 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการแยกไอออนสังกะสีด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

4.2.6.1 แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยา

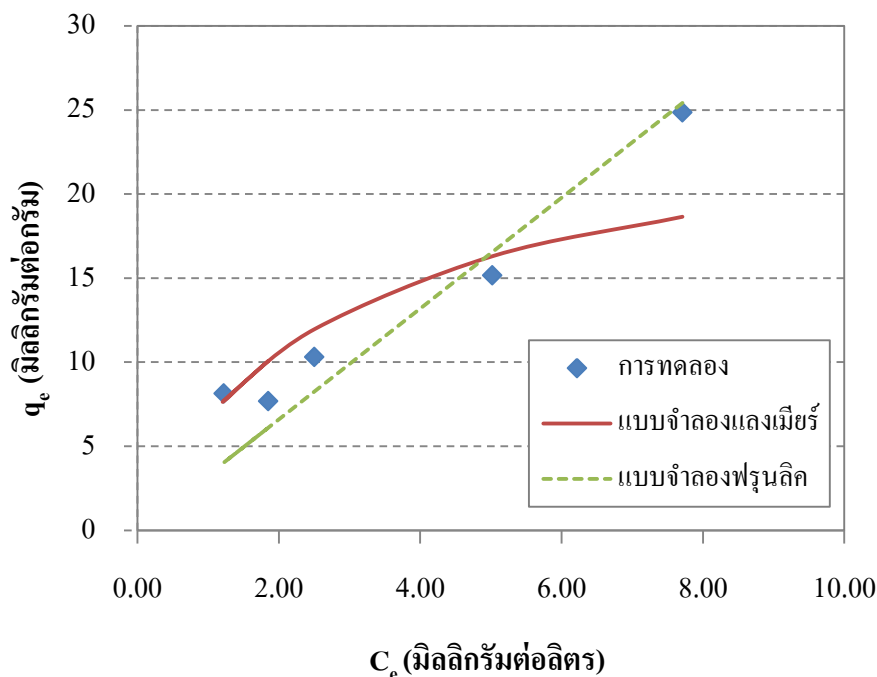
จากสมการที่ 2.43 เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ $1/C_e$ และ $1/q_e$ ดังภาพที่ 4.16 จะได้ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของแลงเมียร์ (K_L) และค่าการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (Q_0) เท่ากับ 0.35 ลิตรต่อมิลลิกรัม และ 25.51 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากสมการที่ 2.45 เมื่อกราฟความสัมพันธ์ $\log C_e$ และ $\log q_e$ ดังภาพที่ 4.17 จะได้ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของฟรุนดริช (K_F) และค่าคงที่ของฟรุนดริช (n_F) เท่ากับ 4.18 ลิตรต่อมิลลิกรัม และ 1.27 ตามลำดับ เมื่อเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดริชได้ผลดังภาพที่ 4.18 พบว่าอิทธิพลของปฏิกิริยาเป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดริช (Freundlich Model) ที่ค่าความแปรปรวนร้อยละ 15.87 แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้น เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลและระดับการดูดซับเป็นไปอย่างไม่จำกัดบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (วีรานูช หลาง และคณะ, 2552)



ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ $1/C_e$ และ $1/q_e$ ของแบบจำลองแลงเมียร์เพื่อหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของแลงเมียร์ (K_L) และค่าการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (Q_0)



ภาพที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ $\log C_e$ และ $\log q_e$ ของแบบจำลองฟรุนดริชเพื่อหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของฟรุนดริช (K_F) และ ค่าคงที่ของฟรุนดริช (n_F)

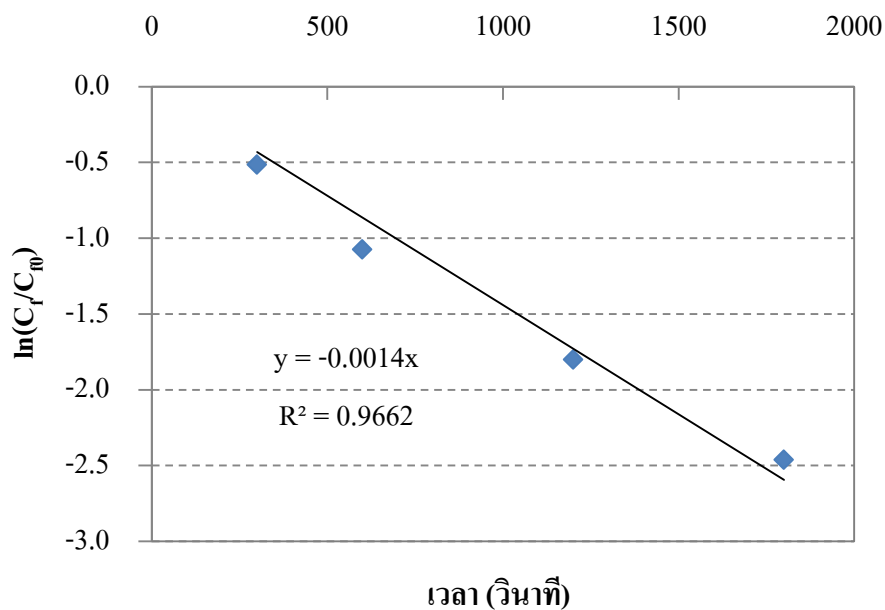


ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของแลงเมียร์และแบบจำลองของฟรูนดริช

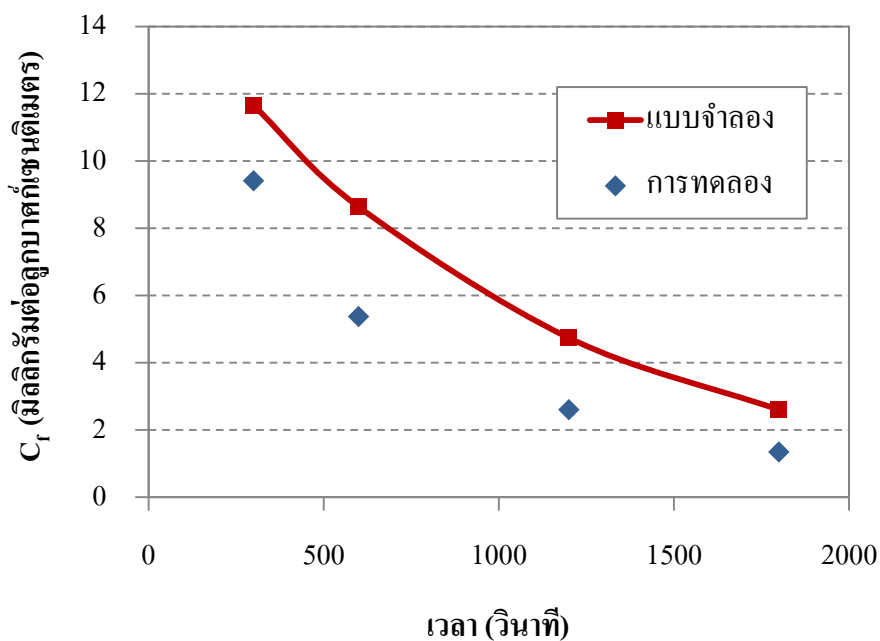
4.2.6.2 แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของการพา

จากสมการที่ 2.46 เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ $\ln(C/C_{f,0})$ กับเวลา จากผลการทดลองที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในเยื่อแผ่นเหลวร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโทลูอีน ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีที่ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลดังภาพที่ 4.19 จะได้ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ของไอออนโลหะที่ถูกดึงออกจากสารละลายป้อน (P_c) มีค่าเท่ากับ 3.57×10^{-4} เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งคำนวณจากค่าความชันของกราฟจากภาพที่ 4.19 เมื่อเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองได้ผลดังภาพที่ 4.20 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแต่มีค่าความแปรปรวนสูงที่ร้อยละ 65.25

เมื่อพิจารณาผลจากหัวข้อที่ 4.2.6.1 และ 4.2.6.2 สามารถกล่าวได้ว่าการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวนั้นเกิดจากอิทธิพลของปฏิกิริยาและการพาควบคู่กัน ทำให้แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาและการพา เป็นแบบจำลองที่มีความน่าสนใจในการศึกษา



ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ $\ln(C_t/C_0)$ และเวลาของแบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของการพา



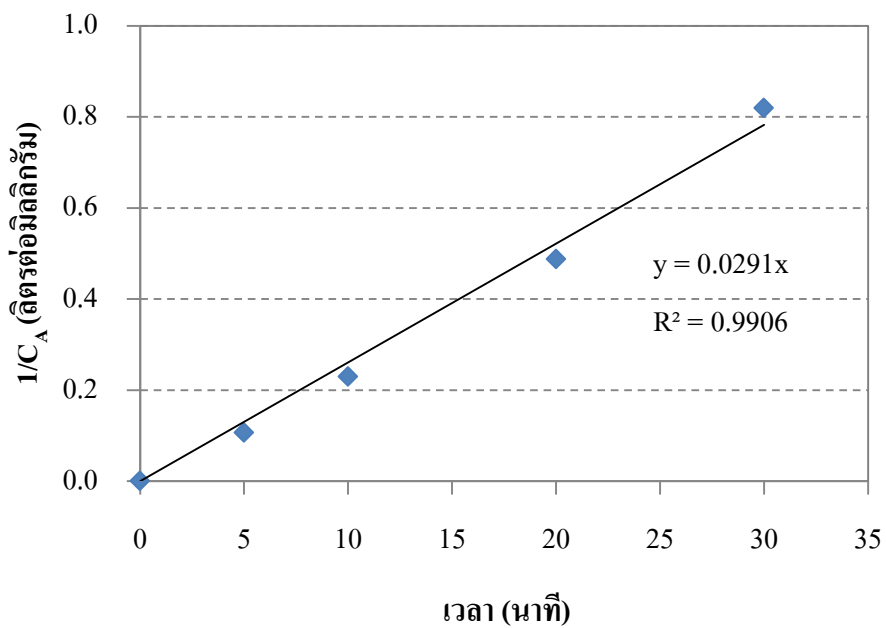
ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของการพาของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกับเวลา

4.2.6.3 แบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาและการพา

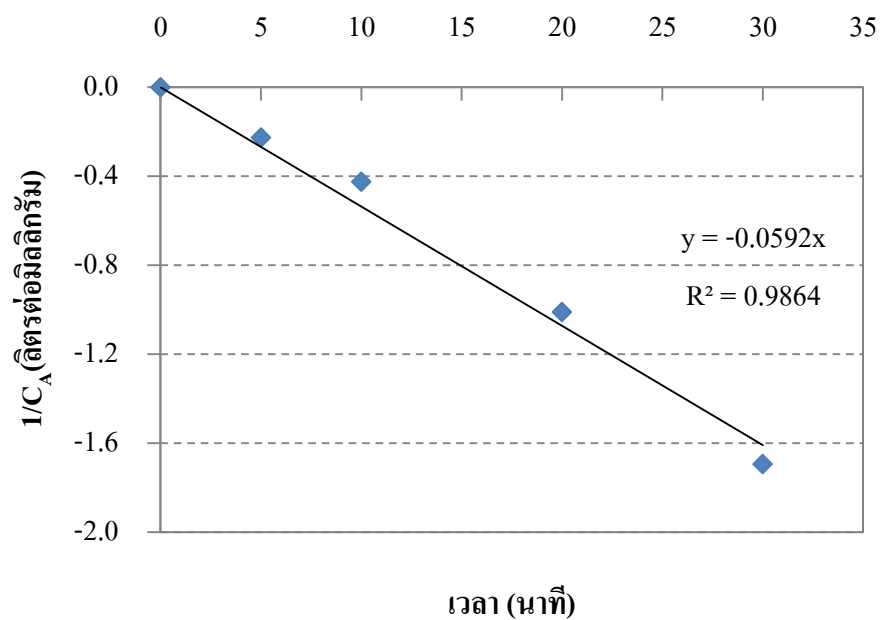
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อ้างอิงจากการนำเสนอโดย Pancharoen และคณะ (Pancharoen และคณะ, 2011) ซึ่งให้กระบวนการแยกผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พยุ่งด้วยเส้นใยกลวงนั้นเสมือนเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล โดยข้อดีของแบบจำลองนี้คือสามารถทำนายผลของร้อยละการสกัดและการนำกลับได้ ซึ่งถูกพัฒนาโดย Chaturabul และคณะ (Chaturabul และคณะ, 2013) โดยเริ่มต้นจากการหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสี โดยใช้วิธีอินทิกรัล (Integral method) แสดงดังตารางที่ 4.4 จากภาพที่ 4.21 และ 4.22 พบว่าอันดับปฏิกิริยาของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของสมการการสกัดและการนำกลับนั้นเท่ากับ 2 กราฟเส้นตรงแสดงให้เห็นถึงค่า R^2 ของปฏิกิริยาการสกัดมากกว่า 0.99 และของปฏิกิริยาการนำกลับมากกว่า 0.98 โดยให้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาการสกัด (k'_p) และการนำกลับ (k'_s) เท่ากับ 0.0291 และ 0.0592 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการแปรผันอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับแสดงดังภาพที่ 4.23 พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นแนวโน้มเดียวกันในช่วงอัตราการไหลที่สูงกว่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที โดยค่าความแปรปรวนของสมการสำหรับปฏิกิริยาการสกัดนั้นน้อยกว่าร้อยละ 10 ซึ่งถือว่าสมการสำหรับปฏิกิริยาการสกัดนั้นมีความแม่นยำสูง

ตารางที่ 4.4 อันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา

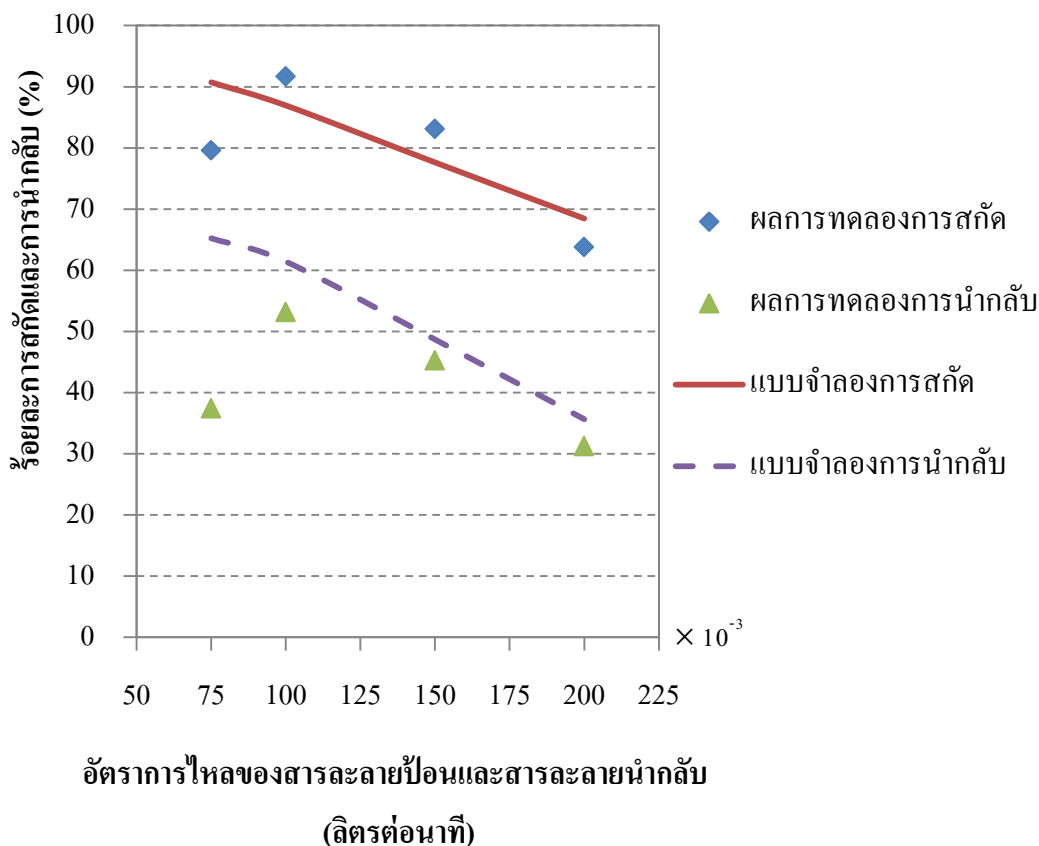
อันดับปฏิกิริยา	ความสัมพันธ์	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา	R^2	Deviation
การสกัด				
$n = 0$	C_A ต่อเวลา	$0.2939 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	0.7883	-
$n = 1$	$\ln(C_{A0}/C_A)$ ต่อเวลา	0.0805 min^{-1}	0.8013	-
$n = 2$	$1/C_A$ ต่อเวลา	$0.0291 \text{ l} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	<u>0.9906</u>	8.26%
การนำกลับ				
$m = 0$	C_A ต่อเวลา	$0.1428 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	0.8372	-
$m = 1$	$\ln(C_{A0}/C_A)$ ต่อเวลา	0.1254 min^{-1}	0.8311	-
$m = 2$	$1/C_A$ ต่อเวลา	$0.0592 \text{ l} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	<u>0.9864</u>	24.11%



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนสังกะสีต่อเวลาของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนสังกะสีต่อเวลาของปฏิกิริยาการนำกลับไอออนสังกะสี



ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสีระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองที่อัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันค่าต่างๆ

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าความสามารถของการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมาจากปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบซ้อนและกลไกการถ่ายเทมวลแบบการพา ซึ่งนั่นหมายความว่าอัตราการใช้และรูปแบบการไหลของวัสดุภาคสารละลายมีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ เมื่อพิจารณาเพียงผลของการสกัด เมื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งหมดพบว่าแบบจำลองที่กล่าวถึงผลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาและการพา มีความเหมาะสมต่อการทำนายผลการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมากที่สุด ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการสกัดของไอออนสังกะสี โดยใช้สารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโทลูอีน

ชื่อผู้คิดค้น/พัฒนา	ชื่อแบบจำลอง	R ²	Deviation	พิจารณา
ผลของปฏิกิริยา				
I. Langmuir	แลงเมียร์	0.9161	17.10%	ไม่เหมาะสม
E.F. Freundlich	ฟรูนดริช	0.9657	15.87%	ไม่เหมาะสม
ผลของการพามวล				
P.R. Danesi	ไม่มี	0.9662	65.25%	ไม่เหมาะสม
ผลของปฏิกิริยาและการพามวล				
U. Pancharoen และคณะ	ไม่มี	0.9906	8.26%	เหมาะสม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ไอออนสังกะสีจากสารละลายกรดฟอสฟอริกซึ่งเป็นน้ำทิ้งอุตสาหกรรมจากกระบวนการเคลือบสังกะสี ถูกสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน ให้สารละลายป้อนไหลทางด้านฝั่งท่อ และสารละลายนำกลับไหลทางด้านฝั่งเปลือก ซึ่งกำหนดให้กรดซัลฟูริกเป็นสารละลายนำกลับ เพื่อต้องการทำสารละลายนำกลับที่ได้ ไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการชุบโลหะต่อไป โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ผลของตัวทำละลายที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัด-การนำกลับ และอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสกัด ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละการสกัด การนำกลับ และการประยุกต์แบบจำลองของการถ่ายเทมวลกับผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. สารสกัด D2EHPA เป็นสารสกัดที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าร้อยละการสกัด ค่าดัชนีการคัดเลือกต่อการสกัดไอออนสังกะสี ค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสีออกจากไอออนนิกเกิลและไอออนแมงกานีสสูงสุด
2. ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนส่งผลต่อร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสี และค่าความสามารถต่อการเลือกสกัดไอออนสังกะสีออกจากโลหะชนิดอื่น โดยที่ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมอยู่ที่ 2.5
3. ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในช่วงร้อยละ 1.7-10.0 โดยปริมาตร ต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนสังกะสี พบว่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร (0.25 โมลต่อลิตร) เพราะให้ร้อยละสกัดไอออนสังกะสีสูงสุด
4. ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกในช่วง 0.05-0.15 โมลต่อลิตร ต่อประสิทธิภาพการนำกลับของไอออนสังกะสี พบว่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกที่ 0.125 โมลต่อลิตร ให้ค่าร้อยละการนำกลับของไอออนสังกะสีสูงสุด

5. ผลของอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ในช่วง 75-200 มิลลิลิตรต่อนาที่ พบว่าอัตราการใช้ที่ให้ร้อยละการสกัดและการนำกลับสูงสุด คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที่ ทั้งฝั่งของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

6. ค่าความมีขี้ของตัวทำละลายส่งผลต่ออายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว โดยพบว่า มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อแผ่นเหลว (k_m) ซึ่งเป็นขั้นกำหนดอัตราการถ่ายเทมวล เมื่อพิจารณาจากร้อยละการสกัดที่ได้ภายใต้อายุการใช้งานที่เหมาะสม พบว่าตัวทำละลายที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้คือ โทลูอิน

7. ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในช่วง 15-65 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสภาวะที่ได้จากการวิจัย เหมาะสมต่อการรองรับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต่ำกว่า 45 มิลลิกรัมต่อลิตร

8. ผลของการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 30-50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับเพิ่มขึ้น

9. แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมต่อการทำนายผลการแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้ D2EHPA เป็นสารสกัด คือแบบจำลองของ Pancharoen และคณะ และ Chaturabul และคณะ ซึ่งเป็นแบบจำลองการถ่ายเทมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาและการพา

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์จากสภาวะที่ได้จากงานวิจัยนี้ พบว่าเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน ซึ่งใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอิน และกรดซัลฟูริกเป็นสารละลายนำกลับที่ระยะเวลาการปฏิบัติงาน 210 นาที สามารถบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมจากระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายกรดฟอสฟอริกได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 โดยพบว่าสารละลายฟอสเฟตหลังจากการบำบัดมีความเป็นไปได้อย่างสูงต่อการนำกลับไปใช้ในกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต และสารละลายนำกลับที่ได้มีองค์ประกอบของไอออนโลหะ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 ซึ่งองค์ประกอบของไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลายกรดซัลฟูริกเหมาะต่อการนำไปสารตั้งต้นตัวเดิมในกระบวนการชุบโลหะต่อไป

ด้วยผลลัพธ์ดังกล่าว สิ่งทีภาคอุตสาหกรรมจะได้รับ คือ สามารถลดปริมาณน้ำทิ้ง อันเป็นผลให้สามารถลดต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ลดค่าบำบัดกากตะกอน และลดต้นทุนด้านวัตถุดิบได้ และยิ่งไปกว่านั้นยังส่งเสริมภาพลักษณ์องค์กรต่อการเป็นโรงงานสีเขียว ลดปริมาณกากโลหะหนักที่ส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 5.1 ผลลัพธ์จากการทดลองเทียบกับค่ามาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมไทย

ไอออนโลหะ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณไอออนโลหะ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
		ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด
Zn ²⁺	≤ 5	15	1.22
Ni ²⁺	≤ 1	1	0.78
Mn ²⁺	≤ 5	1	0.72

ตารางที่ 5.2 ค่าองค์ประกอบของไอออนโลหะในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร

ไอออนโลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Zn ²⁺	38
Ni ²⁺	3
Mn ²⁺	3

หมายเหตุ: ที่สภาวะความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีนความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ที่ระยะเวลาปฏิบัติการ 210 นาที

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีความสำคัญมากต่อผลร้อยละการสกัดและการนำกลับ ดังนั้นในระหว่างปฏิบัติการควรทำการวัดค่าความเป็นกรด-เบสทุกชั่วโมง หากพบว่าค่าความเป็นกรด-เบสเปลี่ยนไป ควรทำการปรับด้วยสารละลายบัฟเฟอร์
2. ในกรณีที่ใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH meter) ควรมีการทวนสอบอุปกรณ์กับสารละลายมาตรฐานก่อนทำการวัดค่าทุกครั้ง เพื่อลดร้อยละความคลาดเคลื่อนจากการวัด
3. ควรทดสอบมอดูลเยื่อแผ่นที่พุงด้วยเส้นใยกลวง บนตัวรองรับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่สามารถทนความเป็นกรด-เบส ได้น้อยกว่า 1
4. ในกรณีที่ระบบมีความแปรปรวนสูง จนเป็นผลทำให้ค่าไอออนสังกะสีสูงมากกว่า 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ควรเพิ่มมอดูลของเส้นใยกลวงโดยการต่อแบบอนุกรมบนสารละลายป้อน เพื่อเพิ่มร้อยละการสกัดโดยรวม และเพื่อให้ค่าความเข้มข้นของไอออนสังกะสีอยู่ในค่ามาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมประเทศไทย

5. นำทิ้งจากกระบวนการผลิตควรผ่านการกรองเพื่อเอาสิ่งปนเปื้อนออก เพื่อป้องกันการอุดตันในมอดูลเส้นใยกลาง
6. ควรศึกษาการเพิ่มขนาดของมอดูลเชื่อมต่อแผ่นเหลวที่พยางด้วยเส้นใยกลาง เพื่อประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กระทรวงอุตสาหกรรม. กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ฉบับที่2. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2539.

ประกร รามกุล. การสกัดไอออนผสมของแลนทาอัมและนีโอดีเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

วีรานุช หลาง, ชมวรรณ เดชมา, วันวิสาข์ บูรณบริรักษ์ และสาโรจน์ศิริ ศันสนียกุล. แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและการคายสารอนิลีนฟีนอลด้วยเส้นใยไรโซวิทที่เจริญและถูกตรึงในเม็ดไคโตซาน. วารสารสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ 7 (ธันวาคม 2552) : 82-97.

อุรา ปานเจริญ. การสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

เอกพิชญ์ ทรงคุณ. การถ่ายเทมวลโคบอลต์ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ภาษาอังกฤษ

Aguilar, J.C., Castellanos, M.S., Miguel, E.R., and Gyves, J. Cd(II) and Pb(II) extraction and transport modeling in SLM and PLM systems using Kelex 100 as carrier. Journal of Membrane Science 190 (August 2001) : 107-118.

Aksu, Z. Biosorption of reactive dyes by dries activated sludge: equilibrium and kinetic modeling. Biochemical Engineering Journal 7 (January 2001) : 79-84.

Aku, Z., and Balibek, E. Chromium (VI) biosorption by dried: Effect of salt (NaCl) concentration on equilibrium and kinetic parameters. Journal of Hazardous Materials 145 (June 2007) : 210-220.

- Ata, O.N., Be, V., Colak, S., Donmeza, B., and Cakici, A. Effect of parameters on the transport of zinc ion through supported liquid membrane. Chemical Engineering and Processing 43 (July 2004) : 895–903.
- Avila, M., and others. Zinc recovery from an effluent using Ionquest 290: From laboratory scale to pilot plant. Hydrometallurgy 107 (May 2011) : 63-67.
- Baraket, M.A. New Trends in removing heavy metals from industrial wastewater. Arabian Journal of Chemistry 4 (October 2011) : 361-377.
- Bart, H.J., and Rousselle, H.P. Microkinetics and reaction equilibria in the system ZnSO₄/D2EHPA/isododecane. Hydrometallurgy 51 (March 1999) : 285-298.
- Bird, R.B., Stewart, W.E., and Light, E.N. Transport Phenomena, 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 2002.
- Biswas, R.K., and Mondal, M.G.K. Kinetics of Mn(II) extraction by D2EHPA. Hydrometallurgy 69 (April 2003) : 145–156.
- Bockholt, M.S., and Schuster, M. Removal enrichment and recovery of Ni(II), Zn(II) and phosphate from phosphation rinsing waters with liquid-phase polymer-based retention technique. Separation and Purification Technology 63 (October 2008) : 172–178.
- Bose, P., Bose, M.A., and Kumar, S. Critical evaluation of treatment strategies involving adsorption and chelation for wastewater containing copper, zinc and cyanide. Advances in Environmental Research 7 (November 2002) : 179-195.
- Charemtanyarak, L. Heavy metals removal by chemical coagulation and precipitation. Water Science Technology 39 (January 1999) : 135–138.
- Chaturabul, S., Wongkaew, K., and Pancharoen., U. Selective transport of palladium through a hollow fiber supported liquid membrane and prediction model based on reaction flux. Separation Science and Technology 48 (January 2013) : 93-104.

- Cheng, C.Y. Purification of synthetic laterite leach solution by solvent extraction using D2EHPA. Hydrometallurgy 56 (July 2000) : 369–386.
- Cussler, E.I. Diffusion mass transfer in fluid systems. USA : Cambridge University Press, 1977.
- Danesi, P.R., and Rickert, P.G. Some observation on the performance of hollow fiber supported liquid membrane for Co-Ni separation. Solvent Extraction and Ion Exchange 4 (March 1986) : 149-164.
- Fred, W. Membrane contactors : an introduction to the technology [online]. 1996. Available from : <http://www.liquicel.com/uploads/documents/Membrane.html> [2013, January 12]
- 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 (June 2006) : 40–51.
- Huang, D., Kelong, H., Chen, S., Liu, S., and Yu., J. Rapid reaction diffusion model for the enantioseparation of phenylalanine across hollow fiber supported liquid membrane. Journal Separation Science and Technology 43 (January 2008) : 259-272.
- Jegannathan, S., Narayanan, T.S., Ravichandran, K., and Rajeswari, S. Formation of zinc phosphate coating by anodic electrochemical treatment. Surface Coating Technology 200 (May 2006) : 6014–6021.
- Johnson, A.R., Munoz, A., and Gottlieb, J. High dose zinc increases hospital admissions due to genitourinary complication. The Journal of Urology 177 (February 2007) : 639-643.
- Kislik, V.S. Carrier-facilitated coupled transport through liquid membranes: general theoretical considerations and influencing parameters. Liquid Membranes : Principle and Application in Chemical Separation and Wastewater Treatment. Amsterdam : Elsevier B.V., 2010.
- Kittisupakorn, P., Weerachaipichaskul , W., and Thitiyasook, P. Modeling and Simulation of CopperionExtraction with Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 6 (August 2007) : 903-910.

- Koby, M., Demirbasb, E., Dedelia, A., and Sensoya M.T. Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes, Journal of Hazardous Materials 173 (January 2010) : 326–334.
- Kumar, A., Haddad, R., Benzal, G., Ninou, R., and Sastre, A.M. Use of modified membrane carrier system for recovery of gold cyanide from alkaline cyanide media using hollow fiber supported liquid membrane: feasibility studies and mass transfer modeling. Journal of Membrane Science 174 (July 2000) : 17-30.
- Kunungo, S.B., and Mohapatra, R. Coupled transport of Zn(II) through a supported liquid membrane containing bis(2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid in kerosene II experimental evaluation of model equations for rate process under different limiting conditions. Journal of Membrane Science 105 (July 1995) : 227-235.
- Leepipatpiboon, N., Pancharoen, U., and Ramakul, P. Separation of Co(II) and Ni(II) from thiocyanate media by hollow fiber supported liquid membrane containing Alamine 300 as carrier-investigation on polarity of diluent and membrane stability. Korean Journal Chemical Engineering 30 (July 2013) : 194-200.
- Lin, S.H., and Juang, R.S. Mass-transfer in hollow-fiber modules for extraction and back-extraction of copper(II) with LIX64N carriers. Journal of Membrane Science 188 (July 2001) : 251–262.
- Mansur, M.B., Slater M.J., and Biscaia, E.C. Equilibrium analysis of the reactive liquid–liquid test system ZnSO₄/D2EHPA/n-heptane. Hydrometallurgy 63 (February 2002): 117-126.
- Marr, R., and Kopp, A. Liquid membrane technology a survey of pheomena, mechnism and models. International Chemical Engineering 22 (January 1982) : 44-59.
- Mellah, A., and Benachour, D. The solvent extraction of zinc and cadmium from phosphoric acid solution by di-2-ethyl hexyl phosphoric acid in kerosene. Chemical Engineering and Processing 45 (August 2006) : 684-690.

- Mellah A., and Benachour, D. The solvent extraction of zinc, cadmium and chromium from phosphoric acid solutions by tri-n butyl phosphate in kerosene diluent. Separation and Purification Technology 56 (August 2007) : 220–224.
- Mortaga M., and Krishna, A. Electrochemical studies of zinc–nickel codeposition in sulphate bath. Applied Surface Science 252 (November 2005) : 1035–1048.
- Othmer, K. Encyclopedia of Chemical Technology, 5th ed. New York : John Wiley & Sons, 2005.
- Pancharoen, U., Wongsawa, T., and Lothongkum, A.W. A reaction flux model for extraction of Cu(II) with LIX841 in HFSLM. Separation Science and Technology 46 (June 2011) : 1-8.
- Pang, P., Fane, A.G., and Li, X. Desalination by membrane distillation adopting a hydrophilic membrane. Desalination 173 (March 2005) : 45-54.
- Pereira, D.D., Denise, S., Rocha, F., and Mansur, M.B. Recovery of zinc sulphate from industrial effluents by liquid–liquid extraction using D2EHPA (di-2-ethylhexyl phosphoric acid). Separation and Purification Technology 53 (February 2007) : 89–96.
- Rathore, N.S., and others. Hollow fiber supported liquid membrane: a novel technique for separation and recovery of plutonium from aqueous acidic wastes. Journal of Membrane Science 189 (July 2001) : 119-128.
- Schultz, G. Separation techniques with supported liquid membrane. Desalination 68 (March 1998) : 191-202.
- Seader, J.D., and Ernest, J.H. Separation Process Principles. USA : John Wiley & Sons, 1984.
- Sunsandee, N., Leepipatiboon, N., Ramakul, P., and Wongsawa, T. The effects of thermodynamics on mass transfer and enantioseparation of (R,S)-amlodipine across a hollow fiber supported liquid membrane. Separation and Purification Technology 102 (January 2013) : 50–61.

- Suren, S., Wongsawa, T., Pancharoen, U., Prapasawat, T., and Lothongkum, A.W. Uphill transport and mathematics model of Pd(II) from dilute synthetic lead-containing solution across hollow fiber supported liquid membrane. Chemical Engineering Journal 191 (March 2012) : 503-511.
- Swain, B., Jeong., J., Lee J.C., and Lee, G.H. Separation of Co(II) and Li(I) by supported liquid membrane using Cyanex 272 as mobile carrier. Journal of Membrane Science 297 (July 2007) : 253–261.
- Szpakowska, M., and Nagy, O.B. Stability of supported liquid membranes containing Acorga P-50 as carrier. Journal of Membrane Science 129 (July 1997) : 251-261.
- Tavlarides, L.L., Bae, J.H., and Lee, C.K. Solvent extraction, membrane and ion exchange in hydrometallurgical dilute metals separation. Separation Science and Technology 22 (February 1987) : 581-617.
- Vahidi, E., Rashchi, F., and Moradkhani, D. Recovery of zinc from an industrial zinc leach residue by solvent extraction using D2EHPA. Minerals Engineering 22 (January 2009) : 204–206.
- Valenzuela, F., Basualto, C., Tapia, C., and Sapag, J. Application of hollow fiber supported liquid membranes technique to the selective recovery of a low content of copper from a Chilean mine water. Journal of Membrane Science 155 (March 1999): 163-168.
- Vellaichamy, S., and Palanivelu, K. Preconcentration and separation of copper, nickel and zinc in aqueous samples by flame atomic absorption spectrometry after column solid-phase extraction onto MWCNTs impregnated with D2EHPA-TOPO mixture. Journal of Hazardous Materials 185 (January 2011): 1131–1139.
- Wannachod, P., Chaturabul, S., Pancharoen, U., Lothongkum, A.W., and Patthaveekongka, W. The effective recovery of praseodymium from mixed rare earths via a hollow fiber supported liquid membrane and its mass transfer related. Journal of Alloys and Compounds 509 (January 2011) : 354–361.

Yang, Q., and Kocherginsky, N.M. Copper recovery and spent ammoniacal etchant regeneration based on hollow fiber supported liquid membrane technology: From bench-scale to pilot-scale tests. Journal of Membrane Science 286 (December 2006) : 301-309.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก-1 การคำนวณร้อยละการสกัด

คำนวณจากสมการที่ 2.17

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{C_{f,0} - C_{f,out}}{C_{f,0}} \times 100$$

- เมื่อ $C_{f,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนเข้า
 = 14.32 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3)
- $C_{f,out}$ = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาออก
 = 1.22 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3)

ดังนั้น

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{(14.32 - 1.22) \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}}{14.32 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}} \times 100 = 91.48\%$$

ก-2 การคำนวณร้อยละการนำกลับ

คำนวณจากสมการที่ 2.18

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{C_{s,out} - C_{s,0}}{C_{f,0}} \times 100$$

- เมื่อ $C_{s,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ
 = 0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- $C_{s,out}$ = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับขาออก
 = 8.32 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-4)
- $C_{f,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนเข้า
 = 15.57 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3)

ดังนั้น

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{(8.32 - 0) \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}}{15.57 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}} \times 100 = 53.37\%$$

ก-3 การคำนวณค่าดัชนีการคัดเลือก

คำนวณจากสมการที่ 2.19

$$\text{Selective index for Zn}^{2+} \text{ over Ni}^{2+} \text{ and Mn}^{2+} = \frac{C_{Zn}}{C_{Ni} + C_{Mn}}$$

เมื่อ C_{Zn} = ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีที่ถูกสกัดโดยสารสกัด D2EHPA
 $= 15.87 - 1.67 = 14.2$ มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1)

C_{Ni} = ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลที่ถูกสกัดโดยสารสกัด D2EHPA
 $= 0.95 - 0.90 = 0.05$ มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1)

C_{Mn} = ความเข้มข้นของไอออนแมงกานีสที่ถูกสกัดโดยสารสกัด D2EHPA
 $= 0.93 - 0.81 = 0.12$ มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1)

ดังนั้น

$$\text{Selective index for Zn}^{2+} \text{ over Ni}^{2+} \text{ and Mn}^{2+} = \frac{14.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}}{(0.05 + 0.12) \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}} = 83.53$$

ก-4 ค่าแฟกเตอร์การแยกไอออนสังกะสี

คำนวณจากสมการที่ 2.20

$$\text{Separation factor for Zn}^{2+} \text{ over Ni}^{2+} = \frac{(C_{Zn} / C_{Ni})_{\text{permeate}}}{(C_{Zn} / C_{Ni})_{\text{retentate}}}$$

เมื่อ $(C_{Zn} / C_{Ni})_{\text{permeate}}$ = ส่วนที่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว
 $= 8.25 / 0.03 = 275.00$ (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1)

$(C_{Zn} / C_{Ni})_{\text{retentate}}$ = ส่วนที่ไม่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว
 $= 1.67 / 0.90 = 1.86$ (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1)

ดังนั้น

$$\text{Separation factor for Zn}^{2+} \text{ over Ni}^{2+} = \frac{(C_{Zn} / C_{Ni})_{\text{permeate}}}{(C_{Zn} / C_{Ni})_{\text{retentate}}} = 275.00 / 1.86 = 148.20$$

ก-5 การคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant, K_{ex}) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี

คำนวณจากสมการที่ 2.22

$$K_{ex} = \frac{[ZnR_2RH]_{org} [H^+]^2}{[Zn^{2+}] [(RH)_2]_{org}^{1.5}}$$

เมื่อ ความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} [Zn^{2+}] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนเข้า} \ 14.32 \text{ ppm} \\ &= 4.54 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \\ [(RH)_2]_{org} &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร} \\ &= 0.25 \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นที่สมดุลมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} [Zn^{2+}] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนออก} \ 1.22 \text{ ppm} \\ &= 0.38 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \\ [ZnR_2RH]_{org} &= \text{ความเข้มข้นของไอออนเชิงซ้อน} \\ &= \text{ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีที่เข้าทำปฏิกิริยา} \\ &= [Zn^{2+}] \text{ ในสารละลายป้อนเข้า} - [Zn^{2+}] \text{ ในสารละลายป้อนออก} \\ &= 4.54 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} - 0.38 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= 4.16 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \\ [(RH)_2]_{org} &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร} \\ &\quad (0.25 \text{ โมลต่อลิตร}) \text{ ที่สมดุล} \\ &= 0.25 - [(3/2) \times (4.16 \times 10^{-5})] \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= 2.5 \times 10^{-1} \text{ โมลต่อลิตร} \\ [H^+] &= \text{ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกที่สมดุล} \\ &= 2 \times (4.16 \times 10^{-5}) \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= 8.32 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} [ZnR_2RH]_{org}[H^+]^2 &= (4.16 \times 10^{-5}) \times (8.32 \times 10^{-5})^2 \text{ (โมลต่อลิตร)}^3 \\ &= 2.87 \times 10^{-13} \text{ (โมลต่อลิตร)}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [Zn^{2+}][RH]_{org}^{3/2} &= (0.38 \times 10^{-5}) \times (2.5 \times 10^{-1})^{3/2} \text{ (โมลต่อลิตร)}^{5/2} \\ &= 4.83 \times 10^{-7} \text{ (โมลต่อลิตร)}^{5/2} \end{aligned}$$

สร้างกราฟระหว่าง $[ZnR_2RH]_{org}[H^+]^2$ กับ $[Zn^{2+}][RH]_{org}^{3/2}$ ที่ความเข้มข้นของสารสกัดค่าต่างๆ ดังรูปที่ 4.10 สามารถหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี (K_{ex}) จากความชันของกราฟได้เท่ากับ $6.19 \times 10^{-7} \text{ (โมลต่อลิตร)}^{1/2}$ สำหรับตัวทำละลายโทลูอีน

ก-6 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient, D) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี

คำนวณจากสมการที่ 2.23

$$D = \frac{[ZnR_2RH]_{org}}{[Zn^{2+}]} = K_{ex} \frac{[(RH)_2]_{org}^{1.5}}{[H^+]^2}$$

เมื่อ K_{ex} = การคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี
 $= 6.19 \times 10^{-7} \text{ (โมลต่อลิตร)}^{1/2}$

$[(RH)_2]_{org}$ = ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตรที่สมดุล
 $= 2.5 \times 10^{-1} \text{ โมลต่อลิตร}$

$[H^+]$ = ความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั่นกรดซัลฟิวริกที่สมดุล
 $= 8.32 \times 10^{-5} \text{ โมลต่อลิตร}$

ดังนั้น

$$D = 11.21$$

(สำหรับตัวทำละลายโทลูอีน)

ก-7 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (Permeability coefficient, P)

คำนวณจากสมการที่ 2.24 และ 2.25

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

โดยที่

$$\phi = \frac{q_f}{PL\mathcal{E}\pi Nr_i}$$

- เมื่อ
- P = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
 - C_f = ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีที่เวลาใดๆ (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - $C_{f,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อนขาเข้า (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - t = เวลา (วินาที)
 - V_f = ปริมาตรของสารละลายป้อน
= 5,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร (5 ลิตร)
 - A = พื้นที่การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว
= 1.4×10^4 ตารางเซนติเมตร
 - q_f = อัตราการไหลของสารละลายป้อน
= 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (100 มิลลิลิตรต่อนาที)
 - L = ความยาวของเส้นใยกลวง
= 20.3 เซนติเมตร
 - π = 3.1416
 - \mathcal{E} = ความพรุนของเส้นใยกรวง
= 0.3
 - N = จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล
= 35,000
 - r_i = รัศมีภายในเส้นใยกลวง
= 120×10^{-4} เซนติเมตร

แทนค่าความเข้มข้นของไอออนสังกะสีที่เวลาเริ่มต้นและที่เวลาใดๆ สร้างกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln \left(\frac{C_f}{C_{f,0}} \right)$ กับเวลา ดังรูปที่ 4.11 และหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

(P) จากความชันของกราฟ ซึ่งคือเทอม $AP \frac{\phi}{\phi+1}$ เท่ากับ 423.3 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด

D2EHPA เท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ 2.24 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) ของไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร สำหรับตัวทำละลายโทลูอีน เท่ากับ 3.37×10^{-2} เซนติเมตรต่อวินาที

ก-8 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อน (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อแผ่นเหลวของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี (k_m)

คำนวณจากสมการที่ 2.26

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_f} + \frac{r_i}{r_{lm}} \cdot \frac{1}{K_{ex} k_m [(RH)_2]^{1.5} / [H^+]^2}$$

เมื่อ P = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)

k_f = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อน (เซนติเมตรต่อวินาที)

r_i = รัศมีภายในของเส้นใยกลาง

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

r_{lm} = รัศมี log-mean ของเส้นใยกลาง

$$= \frac{r_o - r_i}{\ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)} \quad \text{เมื่อ } r_o \text{ คือ รัศมีภายนอกเส้นใยกลาง เท่ากับ } 150 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร}$$

$$= 1.34 \times 10^{-2} \text{ เซนติเมตร}$$

k_m = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อแผ่นเหลวของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี (เซนติเมตรต่อวินาที)

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{P}$ กับ $\frac{1}{[(RH)_2]^{1.5} / [H^+]^2}$ ดังรูปที่ 4.11 คำนวณค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อน (k_f) ได้จากจุดตัดแกน $\frac{1}{P}$ และค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนเชิงซ้อนของสังกะสีในเยื่อแผ่นเหลว (k_m) ได้จากความชัน

ของกราฟ ซึ่งคือเทอม $\frac{r_i}{r_m} \cdot \frac{1}{K_{ex} k_m}$ ดังนั้นจากรูปที่ 4.11 (ข) สามารถหาค่า k_f และ k_m ได้

ดังนั้น

$$k_f = \frac{1}{5.46} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$= 0.18 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

$$k_m = \frac{0.012 \text{ cm}}{0.0134 \text{ cm}} \cdot \frac{1}{6.19 \times 10^{-7} \text{ mol}^{0.5} \cdot \text{l}^{-0.5}} \cdot \frac{1}{2.109 \times 10^8 \text{ s} \cdot \text{l}^{0.5} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mol}^{-0.5}}$$

$$= 0.0068 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

ก-9 อัตราการถ่ายเทมวลต่อพื้นที่โดยเฉลี่ยของไอออนโลหะที่ข้ามผ่านเยื่อแผ่นเหลว

คำนวณจากสมการที่ 2.39

$$J = \frac{C_{i,s} V_s}{At}$$

เมื่อ J = ค่าอัตราการถ่ายเทมวลต่อหน่วยพื้นที่ (มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที)

$C_{i,s}$ = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ

$$= 16.29 \times 10^{-3} \text{ มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (16.29 มิลลิกรัมต่อลิตร)}$$

V_s = ปริมาตรของสารละลายนำกลับ

$$= 5,000 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร (5.0 ลิตร)}$$

A = พื้นที่การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว

$$= 1.4 \times 10^4 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

t = เวลา

$$= 50 \text{ นาที}$$

ดังนั้น

$$J = \frac{\left[16.29 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{cm}^3)^{-1} \right] (5000 \text{ cm}^3)}{(1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2) \cdot 50.0 \text{ min}}$$

$$= 1.16 \times 10^{-4} \text{ มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที}$$

ก-10 การคำนวณแบบจำลองของแลงเมียร์

คำนวณจากสมการที่ 2.42

$$q_e = \frac{Q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

- เมื่อ C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของไอออนโลหะ
 = 1.22 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3)
- Q_0 = การดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว
 = 25.51 มิลลิกรัมต่อกรัม
- K_L = ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของแลงเมียร์
 = 0.35 ลิตรต่อมิลลิกรัม

ดังนั้น

$$q_e = \frac{(25.51 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1})(0.35 \text{ l} \cdot \text{mg}^{-1})(1.22 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1})}{1 + (0.35 \text{ l} \cdot \text{mg}^{-1})(1.22 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1})}$$

$$= 7.64 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

ก-11 การคำนวณแบบจำลองของฟรุนดริช

คำนวณจากสมการที่ 2.44

$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

- เมื่อ C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของไอออนโลหะ
 = 1.22 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-3)
- K_F = ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับของฟรุนดริช
 = 4.18 ลิตรต่อมิลลิกรัม

$$n_F = \text{ค่าคงที่ของฟรอนคริช}$$

$$= 1.27$$

ดังนั้น

$$q_e = (4.18 l \cdot mg^{-1})(1.22 mg \cdot l^{-1})^{1/1.27}$$

$$= 4.89 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

ก-12 การคำนวณแบบจำลองแบบจำลองการถ่ายมวลอันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาและการพา

คำนวณจากสมการที่ 2.46

$$\ln \frac{C_f}{C_{f,0}} = -\frac{A}{V_f} P_c \cdot t$$

เมื่อ $C_{f,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนเข้า

$$= 15.73 \times 10^{-3} \text{ มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-8)}$$

V_f = ปริมาตรของสารละลายป้อน

$$= 5,000 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร (5 ลิตร)}$$

A = พื้นที่การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว

$$= 1.4 \times 10^4 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

t = เวลา

$$= 600 \text{ วินาที (ภาคผนวก ข ตารางที่ ข-8)}$$

ดังนั้น

$$\ln \frac{C_f}{C_{f,0}} = -\frac{(1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2)}{(5000 \text{ cm}^3)} (3.57 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot (600 \text{ s}) = -0.599$$

$$C_f = e^{-0.599} \cdot (15.73 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{cm}^3)^{-1})$$

$$= 8.64 \times 10^{-3} \text{ มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (8.64 มิลลิกรัมต่อลิตร)}$$

ก-13 การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแยกไอออนสังกะสีด้วยระบบเยื่อแผ่น
เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

แบบจำลองร้อยละการสกัด คำนวณจากสมการที่ 2.52 และ 2.55

$$C_{Af}(x,0) = \left[C_{Af}^{1-n}(0,0) + \frac{(1-n)k'_f A_{Cf}}{q_f} x \right]^{\frac{1}{1-n}}$$

$$\bar{C}_{Af}(L,t) = e^{-\beta_f} \bar{C}_{Af}(0,t-\tau_f) \cdot u(t-\tau_f)$$

- เมื่อ C_{Af} = ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนสังกะสีในสารละลายป้อน
 = 15.73×10^{-3} มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (15.73 มิลลิกรัมต่อลิตร)
- n = อันดับปฏิกิริยาของปฏิกิริยาการสกัด
 = 2
- k'_f = ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาการสกัด
 = 29.1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที (0.0291 ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที)
- A_{Cf} = พื้นที่หน้าตัดของฝัองสารละลายป้อน
 = $35,000 \times \pi(r_f)^2 = 15.8$ ตารางเซนติเมตร
- q_f = อัตราการไหลของสารละลายป้อน
 = 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที (100 มิลลิลิตรต่อนาที)
- L = ความยาวของเส้นใยกลวง
 = 15 เซนติเมตร
- $\tau_f = \frac{A_{Cf} L}{q_f} = \frac{(15.8 \text{ cm}^2)(15 \text{ cm})}{(100 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})} = 2.37 \text{ min}$
- $\gamma_f = \frac{(n-1)k'_f A_{Cf}}{q_f} = \frac{(2-1)(29.1 \text{ cm}^3 \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})(15.8 \text{ cm}^2)}{100 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}} = 4.60 \text{ cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$
- $\lambda_f = C_{Af}^{1-n}(0,0) = \frac{1}{15.73 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{cm}^3)^{-1}} = 63.57 \text{ cm}^3 \cdot \text{mg}^{-1}$

$$\begin{aligned}\beta_f &= \left(\frac{A_{cs} k'_s n}{q_f \gamma_f} \right) \ln \left(\frac{\gamma_f L + \lambda_f}{\lambda_f} \right) \\ &= 2 \cdot \ln \left(\frac{(4.60 \text{ cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1})(15 \text{ cm}) + (63.57 \text{ cm}^3 \cdot \text{mg}^{-1})}{(63.57 \text{ cm}^3 \cdot \text{mg}^{-1})} \right) = 1.47\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}C_{Af}(15,0) &= \left[(63.5 \text{ cm}^3 \cdot \text{mg}^{-1}) + \frac{(2-1)(29.1 \text{ cm}^3 \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})(15.8 \text{ cm}^2)}{(100 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})} (15 \text{ cm}) \right]^{1-2} \\ &= 7.54 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot (\text{cm}^3)^{-1} = 7.54 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}\end{aligned}$$

$$C_{Af}(15,50) = e^{-\beta_f} C_{Af}(15,0) \cdot 1 = e^{-1.47} (7.54 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}) = 1.73 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$$

$$\% \text{การสกัด} = \frac{(15.73 - 1.73) \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}}{15.73 - 1.73 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}} \times 100 = 89.00$$

เนื่องจากอันดับปฏิกิริยาของปฏิกิริยาไปข้างหน้าของสมการการนำกลับเป็นลำดับที่ 2 ($m=2$) เช่นเดียวกัน ดังนั้นการคำนวณค่าร้อยละการนำกลับสามารถหาได้จากสมการที่ 2.63 และ 2.66 โดยกำหนดให้ A_{cs} เท่ากับ 1.26 ตารางเซนติเมตร และ k'_s เท่ากับ 5.92 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อมิลลิกรัมต่อนาที

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบและผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ผลของชนิดของสารสกัดที่มีต่อร้อยละการสกัด ไอออน โลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ชนิดของ สารสกัด	ไอออน โลหะ	ความเข้มข้น (ppm)			ร้อยละ การสกัด (%)	ร้อยละ การนำกลับ (%)
		สารละลายป้อน		สารละลายนำกลับ		
		ขาเข้า	ขาออก	ขาออก		
D2EHPA	Zn ²⁺	15.87	1.67	8.25	89.46	51.98
	Ni ²⁺	0.95	0.90	0.03	5.25	3.16
	Mn ²⁺	0.93	0.81	0.05	12.48	5.37
Cyanex 272	Zn ²⁺	15.87	2.65	7.14	83.25	44.99
	Ni ²⁺	0.95	0.63	0.19	34.21	20.00
	Mn ²⁺	0.93	0.56	0.25	40.24	26.88
TBP	Zn ²⁺	15.87	4.72	5.87	70.26	36.99
	Ni ²⁺	0.95	0.76	0.16	20.24	16.84
	Mn ²⁺	0.93	0.70	0.15	25.32	16.13

สถานะในการทดลอง : สารสกัดถูกทำละลายในตัวทำละลายโทลูอินในความเข้มข้นร้อยละ 10.0 โดยปริมาตร สารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากัน เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการสกัด 50 นาที

ตารางที่ ข-2 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อร้อยละการสกัดไอออนโลหะด้วย
เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ค่าความเป็น กรด-เบส	ไอออนโลหะ	สารละลายป้อน (ppm)		ร้อยละการสกัด (%)
		ขาเข้า	ขาออก	
1.0	Zn ²⁺	16.78	15.24	9.18
	Ni ²⁺	0.85	0.83	2.35
	Mn ²⁺	0.93	0.88	5.38
1.5	Zn ²⁺	16.78	8.85	47.26
	Ni ²⁺	0.85	0.83	2.35
	Mn ²⁺	0.93	0.87	6.45
2.0	Zn ²⁺	16.78	2.94	82.48
	Ni ²⁺	0.85	0.82	3.53
	Mn ²⁺	0.93	0.87	6.45
2.5	Zn ²⁺	15.66	2.33	85.12
	Ni ²⁺	0.97	0.93	4.12
	Mn ²⁺	0.83	0.77	7.23
3.0	Zn ²⁺	15.66	2.33	85.12
	Ni ²⁺	0.97	0.91	6.19
	Mn ²⁺	0.83	0.75	9.64
4.0	Zn ²⁺	15.66	2.33	85.12
	Ni ²⁺	0.97	0.89	8.25
	Mn ²⁺	0.83	0.72	13.25
5.0	Zn ²⁺	15.66	2.30	85.31
	Ni ²⁺	0.97	0.89	8.25
	Mn ²⁺	0.83	0.70	15.66

สถานะในการทดลอง : สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 10.0 โดยปริมาตร ในตัวทำละลาย
โทลูอีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของ
สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากัน เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการสกัด 50
นาที

ตารางที่ ข-3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนโลหะ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ความเข้มข้น D2EHPA(%v/v)	ไอออนโลหะ	สารละลายป้อน (ppm)		ร้อยละการสกัด (%)
		ขาเข้า	ขาออก	
1.7	Zn ²⁺	15.42	7.71	50.00
	Ni ²⁺	0.87	0.85	2.30
	Mn ²⁺	0.93	0.87	6.45
5.0	Zn ²⁺	16.77	5.02	70.07
	Ni ²⁺	0.88	0.84	4.55
	Mn ²⁺	0.93	0.83	10.75
6.5	Zn ²⁺	15.78	2.50	84.16
	Ni ²⁺	0.74	0.70	5.41
	Mn ²⁺	0.93	0.81	12.90
8.3	Zn ²⁺	14.32	1.22	91.48
	Ni ²⁺	0.83	0.78	6.02
	Mn ²⁺	0.83	0.72	13.25
10.0	Zn ²⁺	17.23	2.40	86.07
	Ni ²⁺	0.97	0.92	5.15
	Mn ²⁺	0.88	0.78	11.36

สภาวะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากัน เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการสกัด 50 นาที

ตารางที่ ข-4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกต่อประสิทธิภาพการสกัด ไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ความเข้มข้น กรดซัลฟูริก (M)	ไอออนโลหะ	สารละลายป้อน ขาเข้า (ppm)	สารละลายนำกลับ ขาออก (ppm)	ร้อยละการ นำกลับ(%)
0.050	Zn ²⁺	14.13	6.39	45.22
	Ni ²⁺	0.82	0.01	1.22
	Mn ²⁺	0.82	0.02	2.44
0.075	Zn ²⁺	15.55	7.60	48.87
	Ni ²⁺	0.87	0.03	3.45
	Mn ²⁺	0.92	0.06	6.52
0.100	Zn ²⁺	15.57	8.15	53.34
	Ni ²⁺	0.73	0.03	4.11
	Mn ²⁺	0.92	0.06	6.52
0.125	Zn ²⁺	15.57	8.32	53.44
	Ni ²⁺	0.73	0.03	4.11
	Mn ²⁺	0.92	0.06	6.52
0.150	Zn ²⁺	15.22	8.15	53.55
	Ni ²⁺	0.86	0.04	4.65
	Mn ²⁺	0.92	0.07	7.61

สถานะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโทลูอีน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากัน เท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการสกัด 50 นาที

ตารางที่ ข-5 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

อัตราการไหล สารละลายป้อน (ml/min)	อัตราการไหล สารละลายนำกลับ (ml/min)	สารละลายป้อน (ppm)		ร้อยละการสกัด (%)
		ขาเข้า	ขาออก	
75	75	15.57	3.18	79.58
	100	15.57	2.23	85.68
	150	15.57	3.70	76.24
100	200	15.57	4.63	70.26
	75	15.98	1.98	87.61
	100	15.98	1.33	91.68
	150	15.98	2.45	84.67
150	200	15.98	3.97	75.16
	75	15.43	4.01	74.01
	100	15.43	2.28	85.22
	150	15.43	2.61	83.08
200	200	15.43	4.79	68.96
	75	15.66	5.56	64.50
	100	15.66	5.41	65.45
	150	15.66	6.19	60.47
	200	15.66	5.67	63.79

สภาวะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโทลูอีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกความเข้มข้นเท่ากับ 0.125 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่ออนาที เวลาในการสกัด 30 นาที

ตารางที่ ข-6 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อร้อยละการนำกลับ
ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

อัตราการไหล สารละลายป้อน (ml/min)	อัตราการไหล สารละลายนำกลับ (ml/min)	สารละลายป้อน ขาเข้า (ppm)	สารละลายนำกลับ ขาออก (ppm)	ร้อยละการ นำกลับ (%)
75	75	15.57	5.83	37.42
	100	15.57	7.67	49.26
	150	15.57	6.27	40.26
100	200	15.57	5.95	38.23
	75	15.98	7.44	46.53
	100	15.98	8.49	53.15
	150	15.98	8.03	50.23
150	200	15.98	7.23	45.26
	75	15.43	6.21	40.23
	100	15.43	7.75	50.23
	150	15.43	6.98	45.25
200	200	15.43	5.90	38.26
	75	15.66	5.06	32.32
	100	15.66	6.14	39.23
	150	15.66	5.52	35.26
	200	15.66	4.86	31.23

สถานะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายโทลูอีน สารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกความเข้มข้นเท่ากับ 0.125 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการสกัด 30 นาที

ตารางที่ ข-7 ผลของชนิดของตัวทำละลายโคคลอโรมีเทนต่ออายุการใช้งาน

เวลา (นาทีก)	[Zn ²⁺] สารละลายป้อน (ppm)		[Zn ²⁺] สารละลายนำกลับ (ppm)	
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก
5	16.21	8.88	1.48	5.26
10	16.21	3.85	2.11	6.65
20	16.21	2.35	2.88	8.59
30	16.21	1.07	4.42	9.28
40	16.21	1.17	6.29	11.35
50	16.21	1.15	6.48	14.57
75	16.21	1.01	9.89	21.01
100	16.21	0.73	14.29	25.36
1125	16.21	1.07	21.33	32.48
150	16.21	1.13	25.61	36.20
175	16.21	2.68	36.76	46.56
200	16.21	2.88	42.32	52.25
210	16.21	2.70	45.57	55.35
220	16.21	3.37	49.44	59.09
230	16.21	3.53	54.83	61.28
240	16.21	3.56	61.72	65.32
250	16.21	4.00	65.57	71.64
260	16.21	4.50	70.48	73.28
270	16.21	5.31	71.24	74.66
280	16.21	5.92	72.13	74.68
290	16.21	6.24	73.26	75.23
300	16.21	6.67	72.15	76.32

สถานะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.125 โมลต่อลิตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-8 ผลของชนิดของตัวทำละลายโทลูอินต่ออายุการใช้งาน

เวลา (นาทีก)	[Zn ²⁺] สารละลายป้อน (ppm)		[Zn ²⁺] สารละลายนำกลับ (ppm)	
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก
5	15.73	9.40	1.53	4.21
10	15.73	5.37	2.12	5.32
20	15.73	2.60	2.72	6.87
30	15.73	1.34	4.01	7.42
40	15.73	1.45	5.54	8.67
50	15.73	1.38	5.61	10.42
75	15.73	1.30	8.31	12.36
100	15.73	1.34	11.82	20.19
1125	15.73	1.30	17.46	25.69
150	15.73	1.14	20.78	29.32
175	15.73	1.27	29.82	39.29
200	15.73	1.30	34.44	42.85
210	15.73	1.31	37.10	45.51
220	15.73	1.69	40.30	48.24
230	15.73	2.01	44.69	52.43
240	15.73	2.26	50.34	57.97
250	15.73	2.38	53.49	61.16
260	15.73	2.81	59.55	67.36
270	15.73	3.41	64.98	72.11
280	15.73	3.74	69.30	74.68
290	15.73	3.90	74.58	77.24
300	15.73	4.06	76.12	79.46

สถานะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.125 โมลต่อลิตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-9 ผลของชนิดของตัวทำละลายไซโคลเฮกเซนต่ออายุการใช้งาน

เวลา (นาที)	[Zn ²⁺]สารละลายป้อน (ppm)		[Zn ²⁺]สารละลายนำกลับ (ppm)	
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก
5	15.94	9.30	1.62	3.58
10	15.94	7.75	2.04	4.56
20	15.94	6.12	2.34	5.02
30	15.94	4.48	3.56	6.59
40	15.94	2.62	5.02	7.54
50	15.94	2.45	4.88	10.14
75	15.94	2.45	6.86	12.16
100	15.94	2.51	9.41	14.81
1125	15.94	2.39	13.62	18.99
150	15.94	2.34	15.99	21.35
175	15.94	2.39	22.67	27.93
200	15.94	2.50	25.94	31.29
210	15.94	2.52	27.86	33.20
220	15.94	2.44	30.18	35.44
230	15.94	2.46	33.42	38.72
240	15.94	2.34	37.60	42.91
250	15.94	2.73	39.92	44.77
260	15.94	3.12	44.37	49.25
270	15.94	3.45	48.34	52.86
280	15.94	3.47	51.49	55.54
290	15.94	4.41	55.30	59.16
300	15.94	4.75	60.04	63.56

สถานะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.125 โมลต่อลิตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-10 ผลของชนิดของตัวทำละลายเฮปแทนต่ออายุการใช้งาน

เวลา (นาที)	[Zn ²⁺]สารละลายป้อน (ppm)		[Zn ²⁺]สารละลายนำกลับ (ppm)	
	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก
5	16.34	13.45	1.83	3.01
10	16.34	10.74	2.29	4.06
20	16.34	9.60	2.59	4.21
30	16.34	6.33	3.88	5.01
40	16.34	5.51	5.42	5.26
50	16.34	5.48	5.16	9.41
75	16.34	5.56	6.98	11.27
100	16.34	5.48	9.36	13.70
1125	16.34	5.52	13.31	17.56
150	16.34	5.41	15.43	19.77
175	16.34	5.40	21.68	25.95
200	16.34	5.54	24.64	28.73
210	16.34	5.58	26.39	30.66
220	16.34	5.52	28.53	32.83
230	16.34	5.64	31.53	35.92
240	16.34	5.44	35.42	39.70
250	16.34	5.49	37.55	41.58
260	16.34	5.74	41.69	45.82
270	16.34	6.01	45.38	49.46
280	16.34	6.12	48.32	52.10
290	16.34	6.33	51.90	55.18
300	16.34	6.66	56.32	59.66

สถานะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.125 โมลต่อลิตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-11 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ โดยใช้ตัวทำละลายโทลูอีน

ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ไอออนโลหะ	สารละลายป้อน (ppm)		สารละลายนำกลับ
		ขาเข้า	ขาออก	ขาออก (ppm)
30	Zn ²⁺	30.75	28.09	16.29
	Ni ²⁺	0.98	0.06	0.03
	Mn ²⁺	0.94	0.12	0.05
35	Zn ²⁺	34.86	31.46	18.09
	Ni ²⁺	0.98	0.07	0.03
	Mn ²⁺	0.94	0.12	0.04
45	Zn ²⁺	44.75	39.93	22.50
	Ni ²⁺	0.98	0.06	0.03
	Mn ²⁺	0.94	0.12	0.04
55	Zn ²⁺	54.32	46.35	25.12
	Ni ²⁺	0.98	0.06	0.03
	Mn ²⁺	0.94	0.11	0.05
65	Zn ²⁺	65.08	51.58	26.98
	Ni ²⁺	0.98	0.05	0.03
	Mn ²⁺	0.94	0.10	0.03

สถานะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.125 โมลต่อลิตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-12 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการกักและการนำกลับ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ไอออนโลหะ	สารละลายป้อน (ppm)		สารละลายนำกลับ
		ขาเข้า	ขาออก	ขาออก (ppm)
30	Zn ²⁺	15.22	1.17	8.22
	Ni ²⁺	0.93	0.89	0.03
	Mn ²⁺	0.95	0.82	0.06
35	Zn ²⁺	15.22	0.99	8.23
	Ni ²⁺	0.93	0.88	0.02
	Mn ²⁺	0.95	0.82	0.07
40	Zn ²⁺	15.22	0.82	8.68
	Ni ²⁺	0.93	0.86	0.04
	Mn ²⁺	0.95	0.80	0.10
45	Zn ²⁺	15.22	0.70	8.87
	Ni ²⁺	0.93	0.84	0.05
	Mn ²⁺	0.95	0.78	0.11
50	Zn ²⁺	15.22	0.58	9.16
	Ni ²⁺	0.93	0.822	0.06
	Mn ²⁺	0.95	0.76	0.13

สถานะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารสกัด D2EHPA ความเข้มข้นร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.125 โมลต่อลิตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-13 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในช่วงร้อยละ 1.7-8.3 โดยปริมาตร

ชนิดตัวทำละลาย	ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA (%v/v)	D	P × 10 ² (cm/s)
ไดคลอโรมีเทน	1.7	1.80	1.11
	5.0	2.96	1.97
	6.5	5.07	2.70
	8.3	17.0	3.81
โทลูอีน	1.7	0.63	0.97
	5.0	2.05	1.81
	6.5	4.00	2.47
	8.3	11.21	3.37
ไซโครเฮกเซน	1.7	2.08	0.70
	5.0	5.83	1.02
	6.5	3.50	1.29
	8.3	8.52	1.52
เฮปเทน	1.7	1.52	0.60
	5.0	1.54	0.79
	6.5	1.60	1.08
	8.3	1.87	1.26

สถานะในการทดลอง : ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ 0.125 โมลต่อลิตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ภาคผนวก ค

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539)
เรื่อง กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน



ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

ออกตามความในพระ ราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)” รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติดังนี้

(1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

(2) ทิตีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้

2.1 ค่าทิตีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า ทิตีเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า ทิตีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

/ (3) สารแขวนลอย ...

-2-

(3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

(4) โลหะหนักมีค่าดังนี้

4.1 ปรอท (Mercury)	ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.2 เซเลเนียม (Selenium)	ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.3 แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.4 ตะกั่ว (Lead)	ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.5 อาร์เซนิก (Arsenic)	ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.6 โครเมียม (Chromium)	
4.6.1 Hexavalent Chromium	ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.6.2 Trivalent Chromium	ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.7 บาเรียม (Barium)	ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.8 นิกเกิล (Nickel)	ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.9 ทองแดง (Copper)	ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.10 สังกะสี (Zinc)	ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.11 แมงกานีส (Manganese)	ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(5) ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(6) ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

(7) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
(8) สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound)	ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
(9) คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
(10) เพสติไซด์ (Pesticide)	ต้องไม่มี
(11) อุณหภูมิ	ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส
(12) สี	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
(13) กลิ่น	ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

/ (14) น้ำมันและไขมัน ...

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นางสาวกฤติยา วิสุทธิเสน

เกิด วันที่ 5 มีนาคม 2529 ที่จังหวัดกาญจนบุรี

การศึกษา

- พ.ศ. 2547 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนกาญจนานุเคราะห์ จังหวัดกาญจนบุรี
- พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
- พ.ศ. 2552 เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสบการณ์

- พ.ศ. 2551 เมษายน 2551-ปัจจุบัน วิศวกรฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท ไทย เอ็น ไอ เค จำกัด

ทุนสนับสนุนการวิจัย

- พ.ศ. 2554 โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย

ผลงานทางวิชาการ

- พ.ศ. 2555 Krittiya Wisutthisaen, Pharannalak Wannachod and Ura Pancharoen. Mass transfer modeling and extraction of zinc from rinse water of zinc phosphate coating via a hollow fiber supported liquid membrane. Proceedings of Membrane Science and Technology International Conference, Bangkok, Thailand, August 22-24, 2012
- พ.ศ. 2556 กฤติยา วิสุทธิเสน. ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ฉบับที่ 2 ปีที่ 6, 2556