

ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

Effect affecting on Zinc Ion Extraction via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane

กฤติยา วิสุทธิเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน จ.กรุงเทพมหานคร 10300

Krittiya Wisutthisaen

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Pathumwam, Bangkok 10300

E-mail: krittiya_wis@hotmail.com.

บทคัดย่อ

การแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูง ต่อการแยกไอออนโลหะ แต่ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ ระยะเวลาการดำเนินงานค่อนข้างต่ำ งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาชนิดของตัวทำละลายซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อระยะเวลาการดำเนินงาน ทำการศึกษาเปรียบเทียบตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ ไดคลอโรมีเทน โทลูอีน ไฮโดรคาร์บอน และเฮปเทน สารสกัดที่ใช้คือ D2EHPA ซึ่งเป็นสารสกัดที่มีศักยภาพสูงต่อการสกัดไอออนสังกะสี พบว่าค่าความมีขั้วของตัวทำละลายนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการสกัด การนำกลับ และระยะเวลาการดำเนินงานอย่างมีนัยสำคัญ ประสิทธิภาพการสกัดถูกประเมินด้วยค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน สภาวะที่ดีที่สุดคือ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 ที่ความเข้มข้นของ D2EHPA เท่ากับ 8.3% โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร โดยพบว่าตัวทำละลายที่มีความมีขั้วต่ำจะให้ค่าประสิทธิภาพการสกัดที่น้อย แต่ระยะเวลาการดำเนินงานค่อนข้างสูง เมื่อประเมินคุณค่าเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า โทลูอีนคือตัวทำละลายที่ดีที่สุดต่อการขยายผลต่ออุตสาหกรรม ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 11.21 และ 3.37 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

คำหลัก เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ไอออนสังกะสี D2EHPA ตัวทำละลาย

Abstract

Metal ion extraction via hollow fiber supported liquid membrane is a method was recognized to be highly effective but the drawback of these are low operation time. This study focuses on type of diluents that one factor affecting to the operation time. The study compared four types of solvent including dichloromethane, toluene, cyclohexane and heptane. The extractant is D2EHPA that is high potential for extraction of zinc ions. The results were found the polarity of each have significant to efficiency of extraction, stripping and operation time. The efficiency of extraction was investigated through distribution ratio and permeability coefficient. The best conditions were 2.5 of pH in feed solution; 8.3% by volume of D2EHPA concentration and 0.125 molar of stripping concentration. In this study was found that a solvent with a low polarity to less efficient to extraction but rather long operation time. On the economic evaluation was found toluene is the best solvent for applying to industrial which the distribution ratio and permeability coefficient equal to 11.21 and 3.37 cm/s as respectively.

Keywords: Hollow fiber supported liquid membrane, zinc ions, D2EHPA, diluents

1. บทนำ

สังกะสีเป็นหนึ่งในโลหะหนักมีพิษ ที่มีบทบาทสำคัญในการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม จากการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ว่ามลภาวะจากการปนเปื้อนสังกะสี อันเกิดจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรม กำลังสร้างปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์

สังกะสีในรูปของสารประกอบฟอสเฟต ($Zn_3(PO_4)_2$) คือผลิตภัณฑ์เคลือบอยู่บนผิวโลหะ เป็นผลจากกระบวนการที่เรียกว่า การเคลือบผิวด้วยสังกะสีฟอสเฟต (zinc phosphate coating) ซึ่งไอออนโลหะที่นำมาใช้จะอยู่ในสภาพสารละลายกรดแล้วทำให้เจือจางในน้ำ หัวใจหลักในการเคลือบผิวโลหะด้วยสังกะสีฟอสเฟตคือการเพิ่มคุณสมบัติด้านการยึดเกาะ เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนและความชื้น [1] ดังนั้นกระบวนการเคลือบผิวด้วยสังกะสีฟอสเฟต จึงถูกใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ และงานใช้ภายนอก โดยน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการเคลือบผิวด้วยสังกะสีฟอสเฟตมาจากการล้างน้ำเพื่อชะเอาเคมีที่คงค้างอยู่บนผิวโลหะออกและเป็นการช่วยยุติปฏิกิริยา โดยน้ำทิ้งจากกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยไอออนสังกะสีประมาณ 15-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกินค่ามาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมประเทศไทยที่กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของไอออนสังกะสีในน้ำทิ้งมีค่าไม่เกิน 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ปี 2539 นอกจากนั้นยังประกอบด้วยไอออนโลหะชนิดอื่นดังตารางที่ 1 จากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยอันเนื่องมาจากการได้รับสังกะสีในอาหารและแหล่งน้ำธรรมชาติที่มากเกินไป จึงได้มีการคิดค้นพัฒนาและวิจัยเพื่อหาวิธีการต่าง ๆ ในการกำจัดสังกะสี ซึ่งในประเทศไทยนิยมบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีมากที่สุด [2] เนื่องจากต้นทุนการลงทุนต่ำและปฏิบัติงานได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังคงมีข้อเสียอยู่มากคือ มีค่าการเลือกสกัดต่ำ สิ้นเปลืองสารเคมี ก่อให้เกิดกากตะกอนจำนวนมาก ทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนมาก [3]

จากเหตุผลข้างต้น เพื่อรองรับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทย

สนับสนุนการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ควบคู่กับการรักษาสังแวดล้อมและลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพของประชากรไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการแยกไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมยานยนต์โดยผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane) ซึ่งเป็นเทคนิคการแยกที่มีประสิทธิภาพสูง ผน ความเข้มข้นต่ำ [4] เลือกศึกษาระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งระบบนี้เหมาะสมต่อการรองรับปริมาณน้ำทิ้งเป็นจำนวนมาก อีกทั้งผลิตผลทางอ้อม (by product) คือสารละลายน้ำกลั่นสามารถทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ โดยงานวิจัยนี้เลือกกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) เป็นสารละลายน้ำกลั่น ดังนั้นผลิตผลทางอ้อมที่ได้จะเป็นสารละลายไอออนสังกะสีในกรดซัลฟูริก ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นของกระบวนการชุบโลหะได้ โดยงานวิจัยนี้มีข้อแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 2 โดยมุ่งเน้นศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ต้นทุนที่สามารถยอมรับได้ นั่นคือเลือกสารเคมีที่หาง่าย ราคาถูก ประสิทธิภาพสูงมาเป็นวัตถุดิบในงานวิจัยและศึกษาระยะเวลาการดำเนินงานภายใต้สภาวะต่างๆ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของน้ำทิ้งเปรียบเทียบกับมาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมประเทศไทย

ไอออนโลหะ	ปริมาณในน้ำทิ้ง (ppm)	มาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งอุตสาหกรรม (ppm)
สังกะสี (Zn^{2+})	15-20	≤ 5
นิกเกิล (Ni^{2+})	≤ 1	≤ 1
แมงกานีส (Mn^{2+})	≤ 1	≤ 5

2. ทฤษฎี

เยื่อแผ่นที่พองด้วยตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยกลวงจำนวนมากเรียงในแนวนานกัน แล้วถูกบรรจุลงในมอดูลรูปทรงกระบอก โดยเส้นใยกลวงนั้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีรูพรุน ซึ่งรูพรุนนี้เป็นตัวยึดเยื่อแผ่นเหลวเอาไว้ด้วยแรงแคปิลลารี (capillary force) [5-6] โดยในงานวิจัยนี้ตัวรองรับที่ใช้ผลิตมาจากพอลิโพรพิลีน (Polypropylene) จัดเป็นตัวรองรับชนิดไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้วัสดุภาคซึ่งมีสารอินทรีย์เป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งของกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต

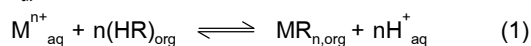
ชื่อผู้วิจัย	วิธีการ	วัตถุประสงค์	ข้อดี	ข้อเสีย
Bockholt และ Schuster ปี 2008 [7]	วิธีกาของเหลวบนตัวรองรับพอลิเมอร์ (liquid-phase polymer-based retention)	นำกลับสารละลายกรดฟอสฟอริก	ต้นทุนด้านการปฏิบัติการต่ำ	- ค่าการคัดเลือกสกัดต่ำ - ใช้เวลานาน - ใช้อุปกรณ์จำนวนมาก
Koby และคณะ ปี 2010 [8]	แยกโดยไฟฟ้า (electrocoagulation หรือ EC)	นำกลับสารละลายกรดฟอสฟอริก และนำไอออนสังกะสีไปใช้ประโยชน์	ค่าการสกัดแยกไอออนโลหะสูง	- ไม่มีค่าการคัดเลือกสกัด - ปฏิบัติการหลายขั้นตอน ต้นทุนการปฏิบัติการสูง
งานวิจัยนี้	เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane หรือ HFSLM)	นำกลับสารละลายกรดฟอสฟอริก และนำสารละลาย นำกลับในรูปไอออนสังกะสีในกรดซัลฟูริกเพื่อเป็นวัตถุดิบของกระบวนการชุบโลหะ	- ค่าการสกัดและการคัดเลือกไอออนโลหะสูง - ปฏิบัติการเสร็จสิ้นในขั้นตอนเดียว - อุปกรณ์ติดตั้งง่ายใช้พื้นที่น้อย ต้นทุนการปฏิบัติการต่ำ	- ไม่พบข้อมูลด้านระยะเวลาการดำเนินงานอย่างชัดเจน - สารสกัดมีราคาแพง

ผ่านหรือยึดติดในรูพรุน เลือกระบบปฏิบัติการไหลเป็นแบบสวนทางกัน โดยให้สารละลายป้อนไหลภายในด้านท่อ (tube side) และสารละลายนำกลับไหลในด้านเปลือก (shell side) แสดงมอดูลเส้นใยกลวงที่มีลักษณะการไหลแบบสวนทางของวิธีกาการละลายป้อนและสารละลายนำกลับดังรูปที่ 1

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงถูกเตรียมโดยการเคลือบเยื่อแผ่นเหลวไว้ที่ตัวรองรับเกิดเป็นชั้นฟิล์มกั้นระหว่างวิธีกาการละลายป้อนกับวิธีกาของสารละลายนำกลับ ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการแยกจากสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

2.1 ขั้นตอนการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

สำหรับกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ของไอออนโลหะ (M^{n+}) ไฮโดรเนียม (H^+) และสารสกัด (HR) สำหรับสมดุลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับวิธีกาการละลายของน้ำทั้งสองด้านคือ

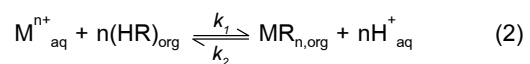


โดยที่อักษรย่อ aq แทนวิธีกาการละลาย (aqueous phase) ส่วนอักษรย่อ org แทนวิธีกาของสารอินทรีย์ (organic phase) การเกิดปฏิกิริยาจะดำเนินไปในทิศทางใดขึ้นอยู่กับสถานะของระบบและกลไกใน

การถ่ายเทมวลของโลหะผ่านเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ [9]

ขั้นที่ 1 ไอออนโลหะที่ละลายอยู่ในวิธีกาการละลายป้อนจะแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวิธีกาการละลายป้อนกับวิธีกาเยื่อแผ่นเหลว

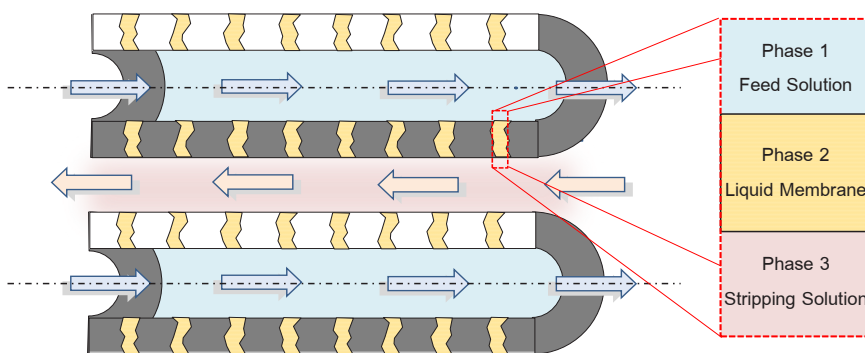
ขั้นที่ 2 ไอออนโลหะจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดได้อิออนไฮโดรเนียมและสารประกอบเชิงซ้อน MR_n ที่ผิวสัมผัสระหว่างวิธีกาการละลายป้อนกับวิธีกาเยื่อแผ่นเหลว



โดยค่า k_1 และ k_2 คือค่าคงตัวของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับตามลำดับ ไอออนโลหะในวิธีกาการละลายป้อนนั้นถูกสกัดโดยปฏิกิริยาไปข้างหน้าระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัด

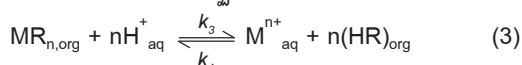
ขั้นที่ 3 สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนั้นจะแพร่ซึมผ่านวิธีกาเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลจากความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับเคลื่อนไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิธีกาการละลายนำกลับกับวิธีกาเยื่อแผ่นเหลว ขณะเดียวกันไอออนไฮโดรเนียมที่เกิดขึ้นจะแพร่จากผิวสัมผัสไปยังวิธีกาการละลายป้อนเนื่องจากผลจากความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเนียม

ขั้นที่ 4 สารประกอบเชิงซ้อนทำปฏิกิริยากับไอออนไฮโดรเนียมได้อิออนโลหะ สารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่าง



รูปที่ 1 โมดูลของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและลักษณะการไหลแบบสวนทางของวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ



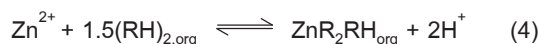
โดยค่า k_3 และ k_4 คือค่าคงตัวของปฏิกิริยาไปข้างหน้าและปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยานำกลับตามลำดับ ไอออนโลหะจะถูกนำกลับ โดยปฏิกิริยาไปข้างหน้าระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนไฮโดรเนียม ได้ไอออนโลหะและสารสกัดกลับคืนมา เรียกว่าสารสกัดเกิดขึ้นใหม่

ขั้นที่ 5 สารสกัดเกิดขึ้นใหม่นี้จะแพร่ย้อนกลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านวัฏภาคสารละลายป้อนในขณะเดียวกันไอออนโลหะที่เกิดขึ้นจะแพร่ไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไอออนโลหะ ดังนั้นไอออนโลหะจึงเคลื่อนที่จากด้านวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับและไอออนไฮโดรเนียมจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อช่วยรักษาความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้าของระบบ โดยมีผลต่างความเข้มข้น (concentration gradient) ของไอออนไฮโดรเนียมระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายนำกลับเป็นแรงขับเคลื่อนการถ่ายเทมวล

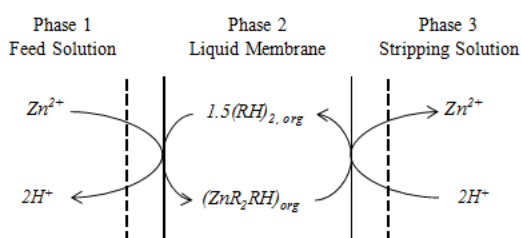
หลังจากที่ไอออนของโลหะเกิดการถ่ายเทมวลที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวแล้ว ไอออนโลหะจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ผ่านชั้นเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและวัฏภาคของสารละลายนำกลับ หลังจากนั้นสารสกัดจะกลับคืนสภาพและมาจับกับไอออนโลหะที่ด้านสารละลายป้อนอีกครั้งเป็นวงจรเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

2.2 สมการการสกัดไอออนสังกะสีด้วยสารสกัด D2EHPA [10]

การสกัดไอออนสังกะสีมีการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ชนิดแบบสวนทางกัน โดยใช้สารสกัดชนิดกรด Di-2-ethylhexyl phosphoric acid หรือ D2EHPA เป็นสารสกัด โดยสมการการเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังสมการ 4



สามารถแสดงกลไกการถ่ายเทมวลของสมการการเกิดปฏิกิริยา ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กลไกการถ่ายเทมวลของไอออนสังกะสีผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัด D2EHPA

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

ในกรณีที่ใช้ D2EHPA เป็นสารสกัด จากปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 4 สามารถหาค่าคงที่สมดุลได้ดังสมการที่ 5

$$K_{ex} = \frac{[ZnR_2RH]_{org} [H^+]^2}{[Zn^{2+}] [(RH)_2]_{org}^{1.5}} \quad (5)$$

2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient, D)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของไอออนสังกะสีที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (สารประกอบเชิงซ้อน) ต่อความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการแยกที่อยู่ในวัฏภาคสารละลาย [11-12] ดังสมการที่ 6

$$D = \frac{[ZnR_2RH]_{org}}{[Zn^{2+}]} = K_{ex} \frac{[(RH)_2]_{org}^{1.5}}{[H^+]^2} \quad (6)$$

2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient, P)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านขึ้นอยู่กับความต้านทานต่อการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลว การคำนวณใช้สมมุติฐานที่ว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการสกัดไอออนสังกะสีทางสารละลายป้อนไปยังเยื่อแผ่นเหลวมากกว่าทางด้านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับเป็นอย่างมาก [13] ดังสมการ 7

$$-V_f \ln \left(\frac{C_f}{C_{f,0}} \right) = AP \frac{\phi}{\phi + 1} t \quad (7)$$

โดยที่

$$\phi = \frac{Q_f}{PL\epsilon\pi Nr_i} \quad (8)$$

เมื่อ

P = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (cm/s)

V_f = ปริมาตรของสารละลายป้อน (cm³)

C_f = ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีที่เวลา t (mol/l)

$C_{f,0}$ = ความเข้มข้นของไอออนสังกะสีที่เวลาเริ่มต้น (mol/l)

A = พื้นที่การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (cm²)

t = เวลา (S)

Q_f = อัตราการไหลของสารละลายป้อน (cm³/s)

L = ความยาวของเส้นใยกลวง (cm)

ϵ = ความพรุนของเส้นใยกลวง

π = 3.1416

N = จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล (เส้น)

r_i = รัศมีในของเส้นใยกลวง (cm)

เมื่อสร้างกราฟจากสมการที่ (7) โดยให้ $AP \frac{\phi}{\phi + 1}$

เป็นพจน์ของความชัน เทียบกับเวลา จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

3. วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้สารเคมีที่หาง่าย ราคาถูก เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์มากที่สุด โดยการใช้สารเคมีดังตารางที่ 3

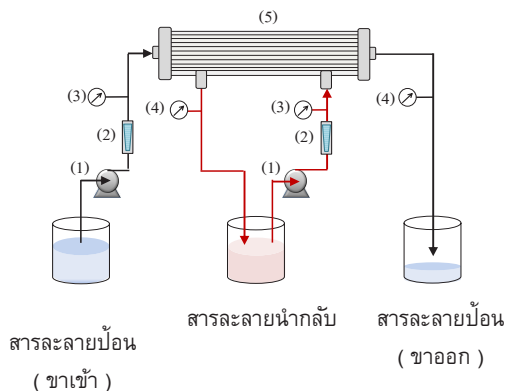
3.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

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

2. อุปกรณ์เยื่อแผ่นเหลวที่พยางด้วยเส้นใยกลวง ตัวรองรับผลิตจากพอลิโพรไพลีนชนิดมีรูพรุน Celgard[®] X-40 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นมอดูล เป็นระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน ดังรูปที่ 3 มีสมบัติดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 เคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร
สารละลายป้อน	น้ำทิ้งจากกระบวนการเคลือบผิวโดยสังกะสีฟอสเฟต
สารปรับค่าความเป็นกรด-เบส	กรดฟอสฟอริก กรดไนตริก โซเดียมไฮดรอกไซด์
สารสกัด	D2EHPA
ตัวทำละลายอินทรีย์	ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) โทลูอีน (Toluene) ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) เฮปเทน (n-Heptane)
สารละลายนำกลับ	กรดซัลฟูริก (sulfuric acid)



รูปที่ 3 ระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน
(1) ปัม (2) มาตรวัดอัตราการไหล (3) มาตรวัดความดันขาเข้า (4) มาตรวัดความดันขาออก (5) มอดูลเส้นใยกลวง

ตารางที่ 4 สมบัติของตัวรองรับเส้นใยลวงโพลิโพรพิลีนที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	ชนิด / ขนาด
วัสดุเส้นใยลวง	โพลิโพรพิลีน (Polypropylene)
จำนวนเส้นใยลวง	35,000 เส้น
ความพรุนของเส้นใยลวง	25 %
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m ² (15.2 ft ²)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 cm ² /cm ³ (74.4 m ² /m ³)
มิติของชุดเส้นใยลวง (เส้นผ่านศูนย์กลาง×ความยาว)	2.5×8 inch
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 Kg/cm ² (60 psi)
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1 °C ถึง 60 °C

3.3 การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยลวง

ผสมสารสกัดและตัวทำละลายอินทรีย์ผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่ต้องการทดลอง ปริมาณ 300 มิลลิลิตร จากนั้นบ่อนสารละลายผสมของสารสกัดและตัวทำละลายอินทรีย์ที่เตรียมไว้ เข้าสู่รูพรุนของเยื่อแผ่นเหลว โดยต้องทำการบ่อนทั้งภายในและภายนอกเส้นใยลวง โดยส่วนมากนิยมให้ไหลสวนทางกัน ใช้เวลาประมาณ 50-80 นาที จนให้แน่ใจว่าสารสกัดยัดตรึงอยู่ในรูพรุนตลอดตามแนวยาวของมอดูล จากนั้นชะล้างสารสกัดส่วนเกินออกโดยการบ่อนน้ำปราศจากไอออนทั้งภายในและภายนอกเส้นใยลวง

3.4 การดำเนินการทดลอง

กำหนดปัจจัยควบคุมของระบบปฏิบัติการ ที่ทำการทดลอง เป็นแบบการไหลสวนทางกันโดยให้สารละลายบ่อนเข้าทางด้านท่อและสารละลายนำกลับเข้าทางด้านเปลือก กำหนดให้อัตราการไหลของทั้ง 2 ด้านเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากเป็นอัตราการไหลที่ทำให้เกิดร้อยละการสกัดและการนำกลับสูงสุด [14] จากนั้นทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายบ่อน ปรับค่าความเป็นกรด-เบสโดยใช้กรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ กำหนดปัจจัยอื่นคงที่ ใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรและสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

3.4.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน ทำการทดลองในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 1.7 -10.0 โดยปริมาตร กำหนดปัจจัยอื่นคงที่ โดยใช้ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายบ่อนที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 3.4.1 ใช้สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ

3.4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริก ทำการทดลองในช่วงความเข้มข้น 0.05-0.15 โมลต่อลิตร กำหนดปัจจัยอื่นคงที่ ใช้ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายบ่อนที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 3.4.1 และใช้สารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองหัวข้อ 3.4.2

3.4.4 การศึกษาผลของตัวทำละลาย กำหนดปัจจัยอื่นคงที่ ใช้สภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองดังหัวข้อ 3.4.1, 3.4.2 และ 3.4.3 จากนั้นทำการทดลองหาระยะเวลาการดำเนินงานของเยื่อแผ่นเหลว ทำการทดลองต่อเนื่องติดต่อกันเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยการเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลาย

การทดลองต้องเก็บตัวอย่างสารละลายไอออนโลหะ ทุกๆ 10 นาที ปริมาณอย่างน้อย 20 มิลลิลิตร ในภาชนะที่สามารถวัดความเป็นกรดและเบสได้ เพื่อป้องกันการระเหยออกของสารละลาย อันเป็นผลให้ความเข้มข้นของไอออนโลหะเปลี่ยนแปลง

3.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนโลหะ

ไอออนโลหะที่ต้องวิเคราะห์ประกอบด้วยไอออนสังกะสี ไอออนนิกเกิลและไอออนแมงกานีส โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) ยี่ห้อ Varian รุ่น AA 280 FS ข้อจำกัดของเครื่องมือวัดชนิดนี้คือ ไม่สามารถวิเคราะห์ผลความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ต่ำกว่า 0.01 มิลลิกรัม

3.6 การคำนวณร้อยละการสกัดและการนำกลับ

การคำนวณตั้งสมการที่ (9) และ (10)

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{C_{f,0} - C_{f,out}}{C_{f,0}} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{C_{s,out} - C_{s,0}}{C_{f,0}} \times 100 \quad (10)$$

เมื่อ

$C_{f,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน (mg/l)

$C_{f,out}$ = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อน (mg/l)

$C_{s,0}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ (mg/l)

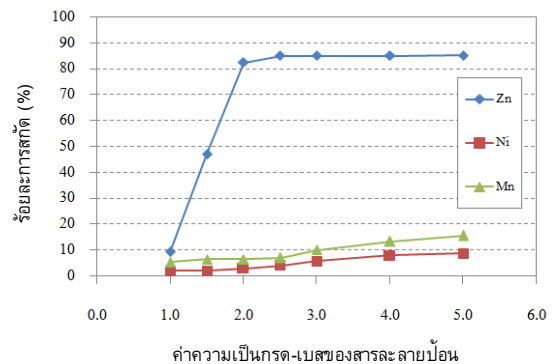
$C_{s,out}$ = ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับ (mg/l)

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลของความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

เมื่อเพิ่มความเป็นกรด-เบส (pH) ส่งผลให้เกิดการสกัดไอออนโลหะได้สูงขึ้น เนื่องจากการลดความเข้มข้นของประจุบวกทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากกว่าตั้งสมการที่ 4 แต่เมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนมากขึ้นสูงกว่า 3.0 พบว่าร้อยละการสกัดของไอออนนิกเกิลและไอออนแมงกานีสเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสีเริ่มคงที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิดกับสารสกัด D2EHPA นั้นต่างกัน โดยพบว่าไอออนสังกะสีประจุสองบวก (Zn^{2+}) เป็นธาตุที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ D2EHPA ได้ดี [15] ดังนั้น

ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนสังกะสี จึงอยู่ในช่วงความเป็นกรด-เบสที่ 2.0-2.5 เพราะมีค่าความสามารถต่อการเลือกสกัดไอออนสังกะสีออกจากไอออนโลหะชนิดอื่น ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบส ของสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะในช่วงความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 1.0-5.0

4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ร้อยละการสกัดของไอออนสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เพิ่มมากขึ้นจนมีค่าร้อยละการสกัดสูงสุดที่ 91.5 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นไปตามหลักของเลอชาเตอลิเยร์ กล่าวคือเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น จากนั้นร้อยละการสกัดจะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของสารสกัดที่สูงมากเกินไป ส่งผลทำให้ความหนืดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวสูงขึ้น ทำให้การถ่ายโอนมวลของไอออนเชิงซ้อนทำได้ช้าลง หรือก็คือส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ (D^*) น้อยลง ดังสมการของ Stokes และ Einstein [16-17] ดังสมการ 11

$$D^* = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} \quad (11)$$

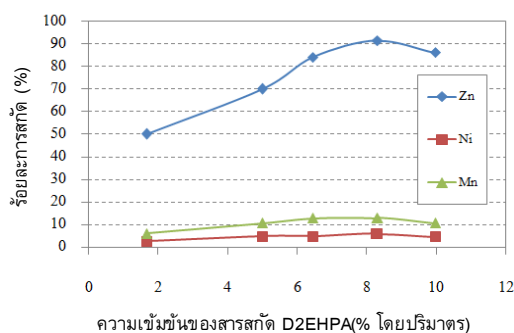
เมื่อ

k_B = ค่าคงที่ของ Boltzman

T = อุณหภูมิ (K)

η = ความหนืดของสารละลายในเยื่อแผ่นเหลว (kg/s)

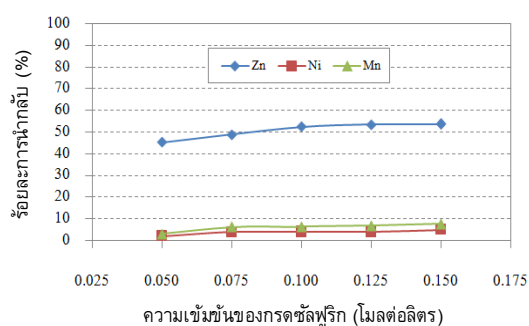
r = รัศมีโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน (cm)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวกับร้อยละการสกัดของไอออนโลหะ ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 1.7-10.0 โดยปริมาตร

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกต่อประสิทธิภาพการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

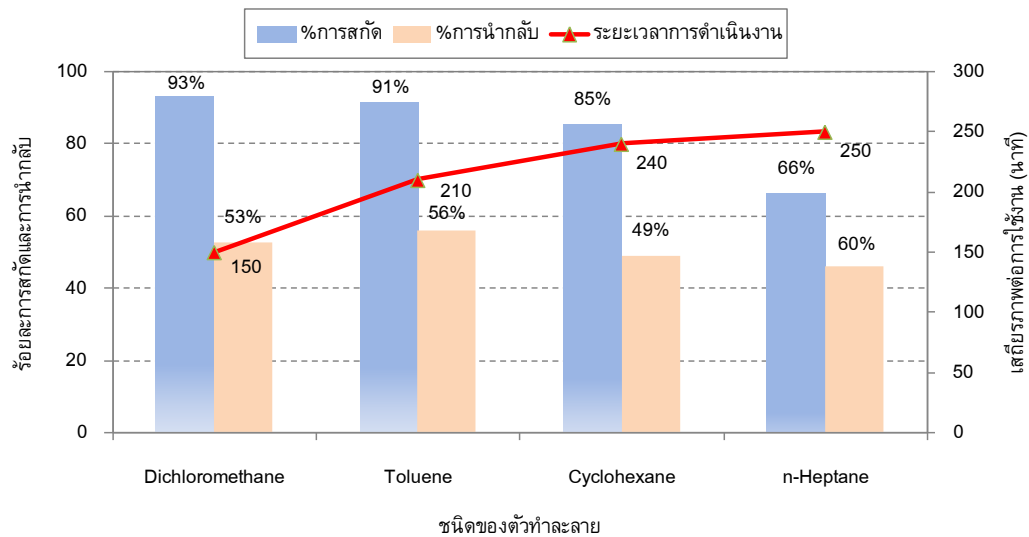
ร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะเพิ่มขึ้น เมื่อสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ในช่วงค่าเริ่มต้นที่ 0.05 โมลต่อลิตร ไปจนถึง 0.125 โมลต่อลิตร โดยให้ร้อยละการนำกลับสูงสุดที่ 53 ดังรูปที่ 6 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าของปฏิกิริยาการนำกลับตามหลักของเลอชาเตอลิเยร์ จากนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกเพิ่มมากขึ้น จะไม่ทำให้ร้อยละการนำกลับเพิ่มมากขึ้น เพราะอัตราการถ่ายเทมวลจำกัดเนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายเทมวลของมอดูลเส้นใยกลวงคงที่ ทำให้ร้อยละการนำกลับไม่เพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกมีค่ามากกว่า 0.125 โมลต่อลิตร



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกกับร้อยละการนำกลับของไอออนโลหะในช่วงความเข้มข้น 0.05-0.15 โมลต่อลิตร

4.4 ผลของชนิดของตัวทำละลายต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสีจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงและระยะเวลาการดำเนินงาน

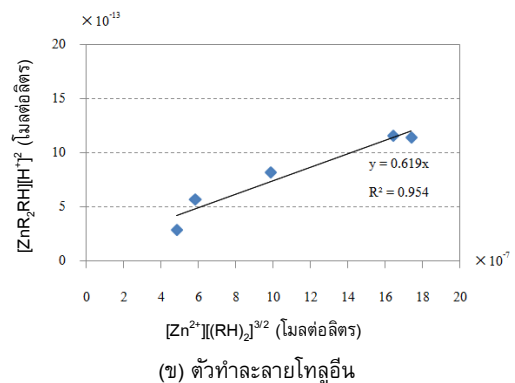
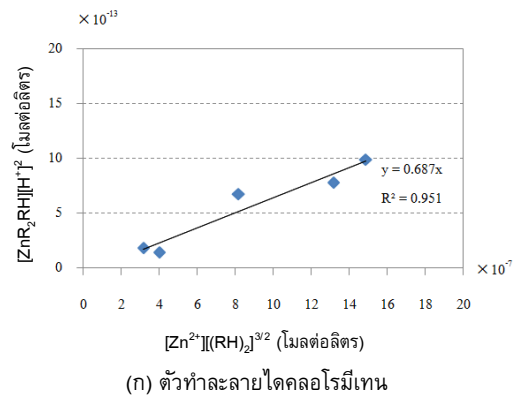
การศึกษาผลของชนิดของตัวทำละลาย ที่มีต่อประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับของไอออนสังกะสี โดยใช้ น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม ตัวทำละลายที่เลือกใช้ในการทดลอง พิจารณาจากคุณค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ คือเลือกตัวทำละลายที่หาง่าย ราคาถูก นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม และพิจารณาจากคุณสมบัติทางเคมีที่อาจส่งผลกระทบต่อระยะเวลาการดำเนินงาน คือค่าความมีขั้ว (polarity) ของตัวทำละลาย [18] โดยงานวิจัยนี้เลือกตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) มีค่าความมีขั้วเท่ากับ 3.1 ตัวทำละลายโทลูอีน (Toluene) มีค่าความมีขั้วเท่ากับ 2.4 ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) มีค่าความมีขั้วเท่ากับ 0.2 และ ตัวทำละลายเฮปเทน (Heptane) มีค่าความมีขั้วเท่ากับ 0.1 ทำการทดลองโดยกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ ใช้สารสกัด D2EHPA ที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5 สารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ศึกษาระยะเวลาการดำเนินงานในช่วงเวลา 0-300 นาที (5 ชั่วโมง) ต่อเนื่อง สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัด ร้อยละการนำกลับและระยะเวลาการดำเนินงานของเยื่อแผ่นเหลวภายใต้ตัวทำละลายแต่ละชนิด ดังรูปที่ 7 พบว่าเมื่อค่าความมีขั้วเพิ่มขึ้น ระยะการดำเนินงานลดลง เนื่องจากมีความสามารถในการละลายในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเพิ่มมากขึ้นและมีความสามารถในการยึดฝังในรูพรุนของเยื่อแผ่นเหลวกับเส้นใยกลวงลดลง โดยเส้นใยกลวงนั้นผลิตจากวัสดุที่ไม่มีขั้ว

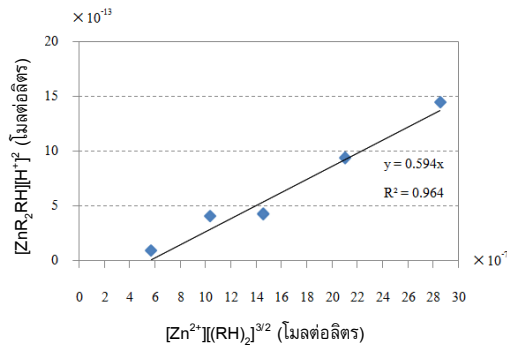


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนสังกะสีกับชนิดของตัวทำละลายและระยะเวลาการดำเนินงานกับชนิดของตัวทำละลาย

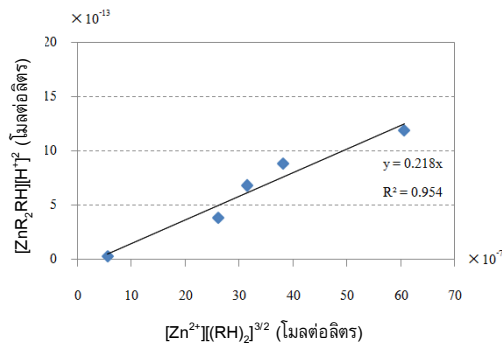
4.5 การคำนวณค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออน สังกะสี

การคำนวณค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี หาได้จากความชันของกราฟซึ่งมาจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 5 ความชันของกราฟแตกต่างกันตามชนิดของตัวทำละลายซึ่งตัวทำละลายไดคลอโรเทน (Dichloromethane) ค่าคงที่สมดุลที่ได้จากกราฟรูปที่ 8 (ก) มีค่าเท่ากับ 6.87×10^{-7} (โมลต่อลิตร)^{1/2} ตัวทำละลายโทลูอิน (toluene) ค่าคงที่สมดุลที่ได้จากกราฟรูปที่ 8 (ข) มีค่าเท่ากับ 6.19×10^{-7} (โมลต่อลิตร)^{1/2} ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน (cyclohexane) ค่าคงที่สมดุลที่ได้จากกราฟรูปที่ 8 (ค) มีค่าเท่ากับ 5.94×10^{-7} (โมลต่อลิตร)^{1/2} และตัวทำละลายเฮปเทน (heptane) ค่าคงที่สมดุลที่ได้จากกราฟรูปที่ 8 (ง) มีค่าเท่ากับ 2.18×10^{-7} (โมลต่อลิตร)^{1/2} ค่าคงที่สมดุลที่ได้นั้น บ่งบอกถึงการเข้าสู่สมดุลของการสกัด ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวทำละลายมีผลต่อการสกัดในเยื่อแผ่นเหลวอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี คำนวณได้จากสมการที่ 6 ดังนั้นสามารถแสดงผลของตัวทำละลายสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ดังตารางที่ 4





(ค) ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน



(ง) ตัวทำละลายเฮปเทน

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $[Zn^{2+}][([RH]_2)^{3/2}]$ และ $[ZnR_2RH][H^+]^2$ ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงร้อยละ 1.7–10.0 โดยปริมาตร ที่ตัวทำละลายต่างๆ (ก) ไดคลอโรมีเทน (ข) โทลูอีน (ค) ไซโคลเฮกเซน (ง) เฮปเทน

4.6 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี

จากการทดลองโดยการเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลาย ในความเข้มข้นของสารสกัดร้อยละ 1.7-8.3 โดยปริมาตรแล้วทำการเก็บผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเทียบกับเวลา นำค่าที่ได้แทนในสมการที่ 7 และ 8 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln \left(\frac{C_f}{C_{f,0}} \right)$ เทียบกับเวลา ซึ่ง

ความชันของกราฟ คือ $AP \frac{\phi}{\phi+1}$ สามารถหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสี ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนสังกะสีที่ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงเท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ของตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ตัวทำละลาย	ค่าความมีขั้ว	D	$P \times 10^2$ (cm/s)
ไดคลอโรมีเทน	3.1	16.95	3.81
โทลูอีน	2.4	11.21	3.37
ไซโครเฮกเซน	0.2	8.52	1.52
เฮปเทน	0.1	1.87	1.26

พบว่าค่าความมีขั้วของตัวทำละลายมีผลอย่างเป็นนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายบ่งบอกถึงความสามารถในการสกัด หรือความสามารถในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัด ดังสมการที่ 6 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านบ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่สูงจึงแสดงถึงประสิทธิภาพโดยรวมในการสกัดและการถ่ายเทมวลสูง

เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับ ตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดคือ ไดคลอโรมีเทน และ โทลูอีน แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาการดำเนินงานด้วยแล้ว พบว่าโทลูอีนเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุด และสามารถขยายผลสู่ภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้ ทั้งนี้ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนอาจมีค่าระยะเวลาการดำเนินงานสูงขึ้น หากใช้งานในประเทศเมืองหนาว เพราะในขณะทำการทดลองไดคลอโรมีเทนมีการระเหยออกตลอดเวลา

ผลการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมจากกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายกรดฟอสฟอริก แสดงดังตารางที่ 6 โดยพบว่าค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะหลังการบำบัดนั้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมประเทศไทย และสารละลายนำกลับในรูปสารละลายกรดซัลฟูริกมีองค์ประกอบของไอออนโลหะที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นตัวเติมในกระบวนการชุบโลหะต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์จากการทดลองเทียบกับค่ามาตรฐานกำหนดน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมไทย

ไอออนโลหะ	ปริมาณในน้ำทิ้งก่อนบำบัด (ppm)	ปริมาณหลังบำบัดโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (ppm)	มาตรฐานกำหนดอุตสาหกรรม (ppm)
สังกะสี	15.73	1.22	≤ 5
นิกเกิล	0.97	0.78	≤ 1
แมงกานีส	0.97	0.72	≤ 5

ตารางที่ 7 ค่าองค์ประกอบของไอออนโลหะในสารละลายกรด ซัลฟูริกความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลิตร

ไอออนโลหะ	ความเข้มข้นในสารละลายกรดซัลฟูริก (ppm)
สังกะสี	40
นิกเกิล	3
แมงกานีส	3

5. สรุปผลการทดลอง

ผลลัพธ์จากสภาวะที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่า เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ในระบบปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่องบนสารละลายป้อน ซึ่งใช้สารสกัด D2EHPA ในตัวทำละลายโทลูอีน และกรดซัลฟูริกเป็นสารละลายนำกลับที่ระยะเวลาการดำเนินงาน 210 นาที ทำให้ได้ร้อยละการสกัดสูงสุดที่ 91.5 และร้อยละการนำกลับที่ 53 ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอต่อการบำบัดน้ำทิ้งอุตสาหกรรมจากกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต โดยพบว่าสารละลายฟอสเฟตหลังการบำบัดมีความเป็นไปได้สูงต่อการนำกลับไปใช้ในกระบวนการเคลือบสังกะสีฟอสเฟต และองค์ประกอบของสารละลายนำกลับกรดซัลฟูริกเหมาะต่อการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นตัวเติมในกระบวนการชุบโลหะ โดยน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตควรผ่านการกรองเพื่อเอาสิ่งปนเปื้อนออก เพื่อป้องกันการอุดตันในมอดูลเส้นใยกลวง และควรศึกษาการเพิ่มขนาดของมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง เพื่อประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

ด้วยผลลัพธ์ดังกล่าว สิ่งที่มาอุตสาหกรรมจะได้รับคือ สามารถลดปริมาณน้ำทิ้ง อันเป็นผลให้สามารถลดต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ลดค่าบำบัดกากตะกอน และลดต้นทุนด้านวัตถุดิบได้ และยิ่งไปกว่านั้นยัง

ส่งเสริมภาพลักษณ์องค์กรต่อการเป็นโรงงานสีเขียว ลดปริมาณกากโลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และสมาชิกกลุ่มงานวิจัย Mass Separation ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาที่ดีตลอดมา จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jegannathan, S., Narayanan, T.S., Ravichandran, K., and Rajeswari, S. 2006. Formation of zinc phosphate coating by anodic electrochemical treatment. Surface Coating Technology, 200: 6014–6021.
- [2] Charemtanyarak, L. 1999. Heavy metals removal by chemical coagulation and precipitation. Water Science Technology, 39: 135–138.
- [3] Bose, P., Bose, M.A., and Kumar, S. 2002. Critical evaluation of treatment strategies involving adsorption and chelation for wastewater containing copper, zinc, and cyanide. Advance Environment Resolution, 7: 179–195.
- [4] Valenzuela, F., Basualto, C., Tapia, C., and Sapag, J. 1999. 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: 163–168.
- [5] Marr, R. and Kop, P. 1982. A. Liquid membrane technology a survey of phenomena, mechanism and models. International Chemical Engineering, 22: 44–59.
- [6] Schultz, G. 1988. Separation techniques with supported liquid membrane. Desalination, 68: 191–202.

- [7] Bockholt, M.S. and Schuster, M. 2008. 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: 172–178.
- [8] Kobya, M., Demirbas, E., Dedeli, A., and Sensoy, M.T. 2010. Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 173: 326–334.
- [9] เอกพิชญ์ ทรงคุณ. 2548. การถ่ายเทมวลโคบอลต์ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] Mellah, A. and Benachour, D. 2006. 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: 684-690.
- [11] Seader, J.D. and Ernest, J.H. 1984. *Separation Process Principles*. USA: John Wiley & Sons Inc.
- [12] Rathore, N.S., Sonawane, J.V., Kumar, A., Vanugopalan, A.K., Singh, R.K., Bajpai, D.D. and Shukla, J.P. 2001. Hollow fiber supported liquid membrane: a novel technique for separation and recovery of plutonium from aqueous acidic wastes. *Journal of Membrane Science*, 189: 119-128.
- [13] Danesi, P.R. and Rickert, P.G. 1986. Some observation on the performance of hollow fiber supported liquid membrane for Co-Ni separation. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 4: 149-164.
- [14] Pharannalak, W., Srestha, C., Pancharoen, U., Anchaleeporn, W.L. and Weerawat, P. 2011. 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: 354-361.
- [15] Cheng, C.Y. 2000. Purification of synthetic laterite leach solution by solvent extraction using D2EHPA. *Hydrometallurgy*, 56: 369–386.
- [16] Schultz, G. 1988. Separation techniques with supported liquid membrane, *Desalination* 68: 191-202.
- [17] Cussler, E.L. 1997. *Diffusion mass transfer in fluid system*, USA: Cambridge University Press.
- [18] Szpakowska, M., and Nagy, O.B. 1997. Stability of supported liquid membranes containing Acorga P-50 as carrier. *Journal of Membrane Science*, 129: 251-261.