

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

บทนี้แสดงผลการทดลองของการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนซึ่งคือน้ำเสียจากกระบวนการ ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ และอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ นอกจากนี้ทดสอบการใช้เยื่อแผ่นเหลว 2 มอดูล ต่อแบบอนุกรม และศึกษาประสิทธิภาพการนำกลับภายใต้ปัจจัยต่างๆ สุดท้ายเปรียบเทียบการนำกลับไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับน้ำสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยไอออนของโลหะหนักต่างๆ ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

ตารางที่ 4.1 ไอออนโลหะในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

ชนิดของไอออน	ความเข้มข้น (ppm)
Ni ²⁺	88.12
Fe ²⁺	889.45
Cr ₂ O ₃ , HCrO ₄ ⁻ , Cr ₂ O ₇ ²⁻	408.58
Cu ²⁺	2.81
Zn ²⁺	1.56
Na ⁺	1,236.13

การนำกลับไอออนนิกเกิลในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายเทมวลควบคุมแบบสวนทางระหว่างไอออนนิกเกิลและไอออนไฮโดรเนียม โดยไอออนนิกเกิลจะเคลื่อนที่จากเฟสสารละลายป้อนผ่านเฟสเยื่อแผ่นเหลวหรือเฟสเมมเบรนสู่เฟสสารละลายนำกลับ และไอออนไฮโดรเนียมจากเฟสสารละลายนำกลับที่เป็นกรดจะเคลื่อนที่สวนทางกับไอออนนิกเกิลผ่านตัวกลางเฟสเยื่อแผ่นเหลวสู่เฟสสารละลายป้อน ปฏิกริยาการสกัดไอออนนิกเกิล ดังสมการที่ 4.1



ไอออนนิกเกิลที่ถูกสกัดจะเคลื่อนที่ไปยังผิวสัมผัสอีกด้านของเฟสเยื่อแผ่นเหลวกับเฟสสารละลาย นำกลับเพื่อเกิดปฏิกิริยาการนำกลับ ดังสมการที่ 4.2



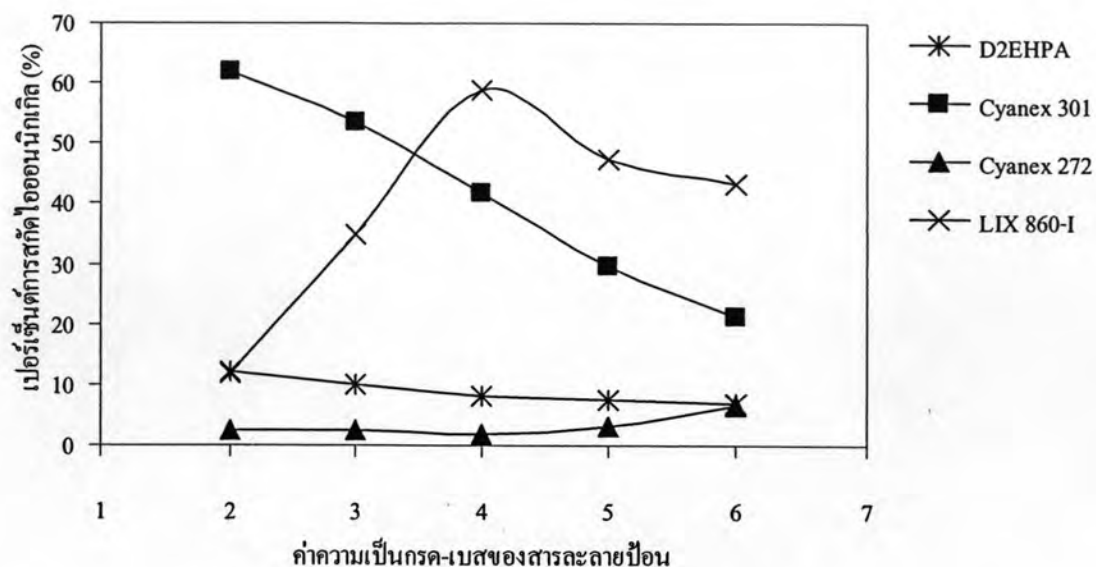
สารสกัดจะปล่อยไอออนนิกเกิลออกมาสู่สารละลายนำกลับและรับไอออนไฮโดรเนียมเข้าแทน และจะวนกลับไปสกัดไอออนนิกเกิลอีก

ตอนที่ 1 ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล

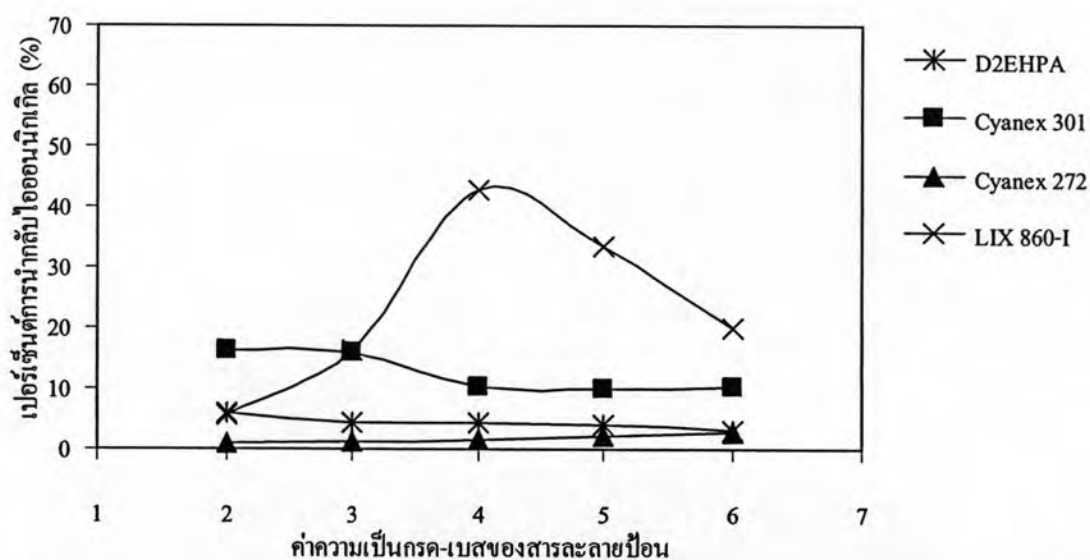
4.1 ผลของชนิดของสารสกัดและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน

ชนิดของสารสกัดที่ใช้สกัดไอออนนิกเกิล ได้แก่ D2EHPA, Cyanex 301, Cyanex 272 และ LIX 860-I ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนที่ศึกษาระหว่าง 2-6 ใช้สารสกัดความเข้มข้น 0.6 M สารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1.5 M อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 ml/min เท่ากันทั้งด้านท่อและด้านเปลือก อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับที่ 3500:3500 (ml:ml) เวลาการสกัด 240 นาที ผลการทดลองแสดงด้วยเปอร์เซ็นต์การสกัดและเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนนิกเกิลเรียงตามลำดับคือ LIX 860-I \cong Cyanex 301 > D2EHPA > Cyanex 272 สารสกัด LIX 860-I สามารถสกัดไอออนนิกเกิลได้ประมาณ 60% ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 4 สารสกัด Cyanex 301 สามารถสกัดไอออนนิกเกิลได้ประมาณ 60% ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2 ส่วนสารสกัด D2EHPA และ Cyanex 272 มีสามารถสกัดไอออนนิกเกิลได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนนิกเกิลกับชนิดของสารสกัดที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่างๆ [สารสกัด] = 0.6 M, $[H_2SO_4] = 1.5$ M, $Q_{feed} = Q_{strip} = 100$ ml/min, $V_{feed} = V_{strip} = 3,500$ ml ที่เวลา 240 min



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลกับชนิดของสารสกัดที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่างๆ [สารสกัด] = 0.6 M, $[H_2SO_4] = 1.5$ M, $Q_{feed} = Q_{strip} = 100$ ml/min, $V_{feed} = V_{strip} = 3,500$ ml ที่เวลา 240 min

จากรูปที่ 4.2 พบว่าสารสกัด LIX 860-I มีเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลสูงที่สุดประมาณ 43% ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 4 สารสกัดทั้ง 4 ชนิดที่เลือกมา

ใช้มีรายงานมาแล้วว่าใช้สกัดไอออนนิกเกิลได้ แต่ในงานวิจัยนี้พบว่าความสามารถในการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลของสารสกัดแต่ละชนิดแตกต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

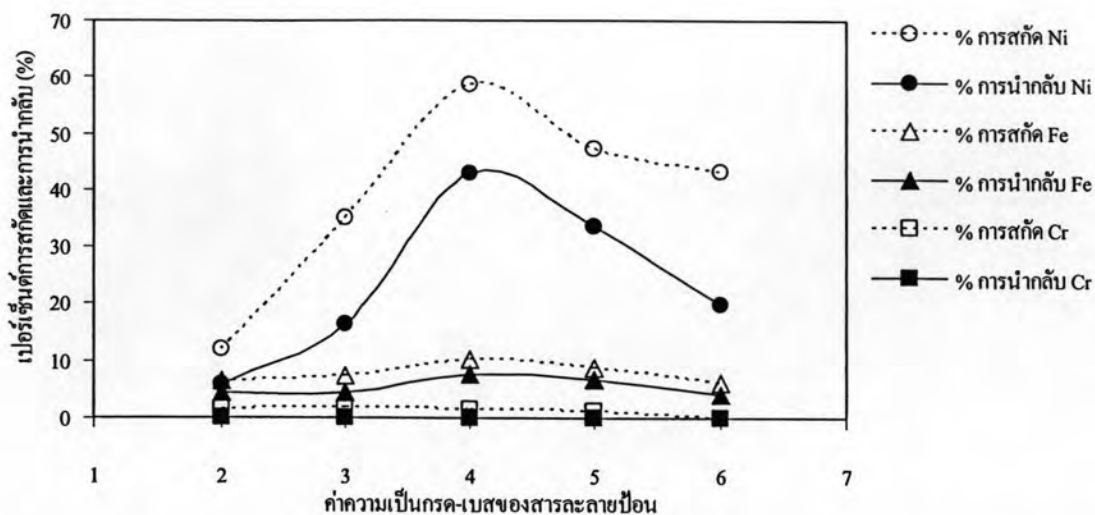
D2EHPA จะไม่สามารถสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนนิกเกิล ถ้าในสารละลายป้อนมีประจุลบ (Van de Voorde, 2008; วิทยา นามสว่าง, 2542) น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีกลุ่มไอออนประจุลบของโครเมียม ดังนั้นสารสกัด D2EHPA จึงสกัดและนำกลับไอออนนิกเกิลได้น้อย

Cyanex 301 จะสามารถสกัดนิกเกิลได้ดีเมื่อสารละลายป้อนมีสภาพเป็นกรด แต่ Cyanex 301 จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความแข็งแรงของพันธะสูงทำให้สารละลายนำกลับไม่สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลจึงค่อนข้างต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจาก Cytec Industries Inc. (2004) และผลงานวิจัยของ Vande Voorde, et al. (2004)

Cyanex 272 จะสกัดไอออนนิกเกิลได้ดีเมื่อสารละลายป้อนมีค่าความเป็นกรด-เบสตั้งแต่ 7 ขึ้นไป (Cytec Industries Inc., 2004) แต่ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนระหว่าง 2-6 เพราะน้ำเสียที่ใช้เป็นสารละลายป้อนมาจากหน่วยปรับสภาพเปลี่ยนโครเมียม (VI) ไปเป็นโครเมียม (III) มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2.2 ดังนั้น Cyanex 272 จึงแทบไม่สามารถสกัดไอออนนิกเกิลได้

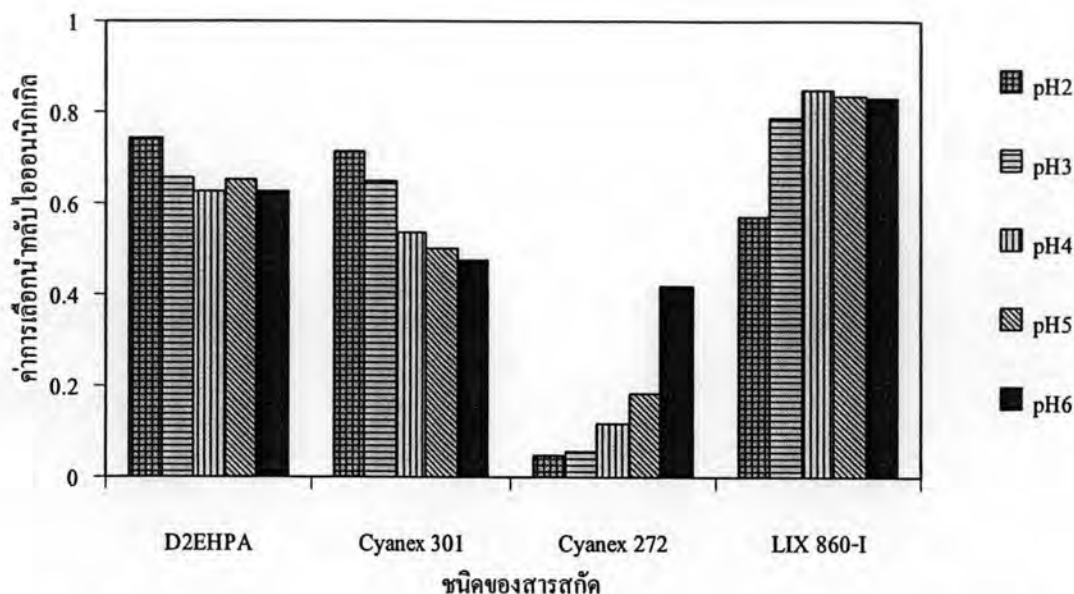
LIX 860-I สามารถสกัดและนำกลับไอออนนิกเกิลได้ดีกว่าสารสกัดตัวอื่นเนื่องจาก LIX 860-I จะทำงานได้ดีในช่วงความเป็นกรดอ่อนๆ และสามารถทำงานได้แม้ในสารละลายป้อนจะมีไอออนโลหะหลายชนิด หรือสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงของพันธะสูง (Vande Voorde, et al., 2004) โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับว่า LIX 860-I มีความเหมาะสมที่จะสกัดไอออนโลหะในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะทองแดง รูปที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิล เหล็ก และโครเมียมด้วยสารสกัด LIX 860-I พบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลสูงสุดเมื่อเทียบกับไอออนเหล็กและโครเมียม ที่ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 4 ประมาณ 60% และ 45% ตามลำดับ กล่าวได้ว่าที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 4 เกิดการคัดเลือกสกัดและนำกลับไอออนนิกเกิลมากที่สุด สารสกัด LIX 860-I จะสกัดไอออนนิกเกิลที่มีประจุสองบวกได้ดี แต่การที่สารสกัด LIX 860-I สามารถสกัดไอออนนิกเกิลได้ดีกว่าไอออนเหล็กและโครเมียมแม้ว่าไอออนนิกเกิลและเหล็กต่างก็มีประจุสองบวกเหมือนกันเนื่องจากสารสกัด LIX 860-I เกิดพันธะกับไอออนนิกเกิลเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีกว่าไอออนเหล็ก จึงทำให้สารสกัด LIX 860-I สามารถสกัดไอออนนิกเกิลได้มากกว่า สำหรับไอออนโครเมียมจะไม่สามารถ

ถูกสกัดและนำกลับเนื่องจากไอออนโครเมียมรวมตัวเป็นกลุ่มไอออนที่มีประจุเป็นลบ เช่น $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ หรือ HCrO_4^-



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิล เหล็ก และโครเมียมกับค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่างๆ [LIX 860-I] = 0.6 M, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 1.5 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min

เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นกรดมีไอออนของเหล็ก โครเมียม และนิกเกิล (ตารางที่ 4.1) จึงพิจารณาค่าการเลือกนำกลับ (Selectivity) ไอออนนิกเกิล ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าโดยรวมแล้วสารสกัด LIX 860-I มีค่าการเลือกนำกลับไอออนนิกเกิลสูงกว่าสารสกัดชนิดอื่นๆ และที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 4 มีค่าการเลือกนำกลับมากที่สุด



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเลือกนำกลับไอออนนิกเกิลกับชนิดของสารสกัดที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนต่างๆ [สารสกัด] = 0.6 M, $[H_2SO_4] = 1.5$ M, $Q_{feed} = Q_{strip} = 100$ ml/min, $V_{feed} = V_{strip} = 3,500$ ml ที่เวลา 240 min

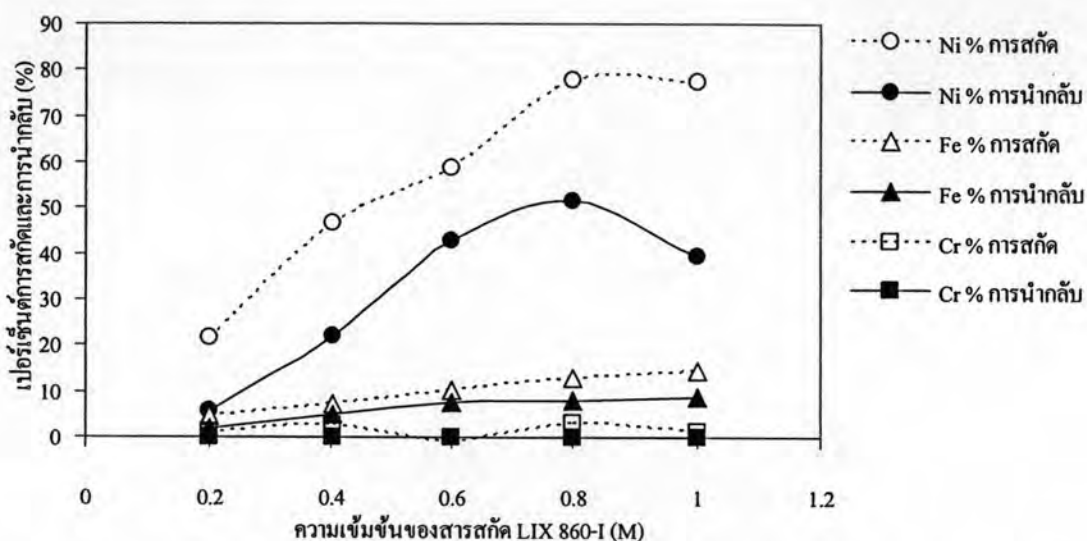
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I

เนื่องจากพบว่า LIX 860-I เป็นสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดและนำกลับไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 4 จึงศึกษาความเข้มข้นของ LIX 860-I ระหว่าง 0.2-1.0 M ในการสกัดและนำกลับไอออนนิกเกิล เหล็ก และ โครเมียม ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I จะสามารถสกัดและนำกลับไอออนนิกเกิลได้มากขึ้น ประมาณ 78% และ 51% ตามลำดับ ที่ความเข้มข้น 0.8 M แต่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมากกว่า 0.8 M พบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับจะลดลง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.3

$$D = \frac{RT}{6\pi\eta r} \quad (4.3)$$

- เมื่อ
- D = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient)
 - T = อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
 - η = ค่าความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
 - R = ขนาดของโมเลกุลที่แพร่ผ่าน

จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แปรผกผันกับค่าความหนืดของสารละลายในเยื่อแผ่นเหลว การเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลทำให้ปฏิกิริยาการสกัด (สมการที่ 4.1) ดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้นตามหลักการของเลอชาเตอริเยอร์จึงเกิดการสกัดไอออนนิกเกิลได้เพิ่มขึ้น แต่ขณะเดียวกันการเพิ่มความเข้มข้นสารสกัดจะทำให้ค่าความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จึงลดลงและเกิดการถ่ายเทมวลช้าส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลลดลง



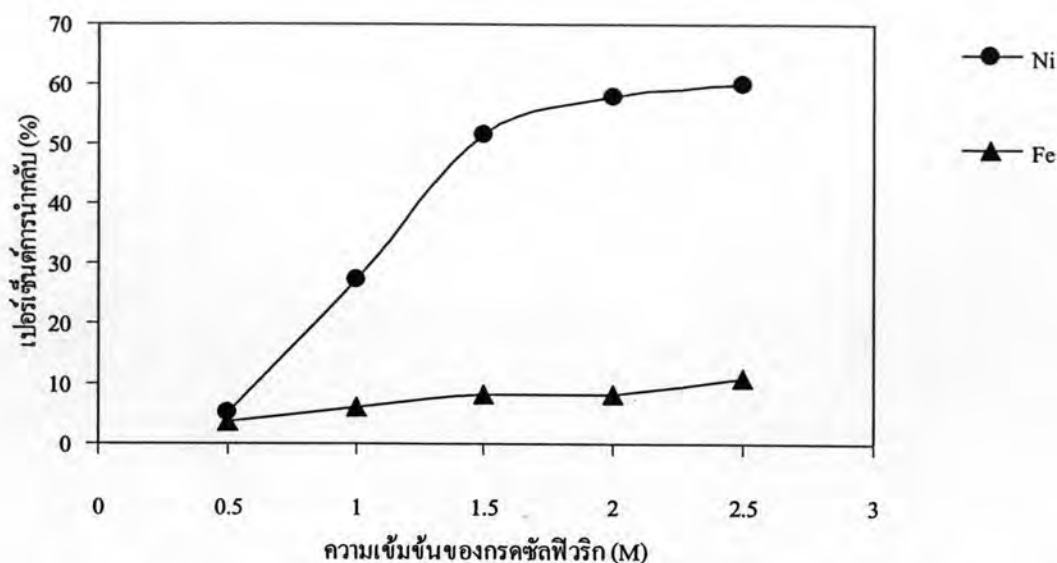
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิล เหล็ก และโครเมียมกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 1.5 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min

ในกรณีของการสกัดไอออนเหล็กซึ่งเกิดปฏิกิริยาการสกัดเช่นเดียวกับไอออนนิกเกิล เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารสกัด LIX 860-I ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนเหล็ก เนื่องจากสารสกัด LIX 860-I ว่องไวต่อการสกัดไอออนนิกเกิลเท่านั้น เปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนเหล็กประมาณ 13% และ 8% ตามลำดับ ส่วนไอออนโครเมียมจะถูกสกัดออกมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่จะไม่สามารถนำกลับได้เลย

ดังนั้นในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไปจะใช้สารสกัด LIX 860-I ที่ความเข้มข้น 0.8 M

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก

ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกต่อเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กแสดงดังรูปที่ 4.6

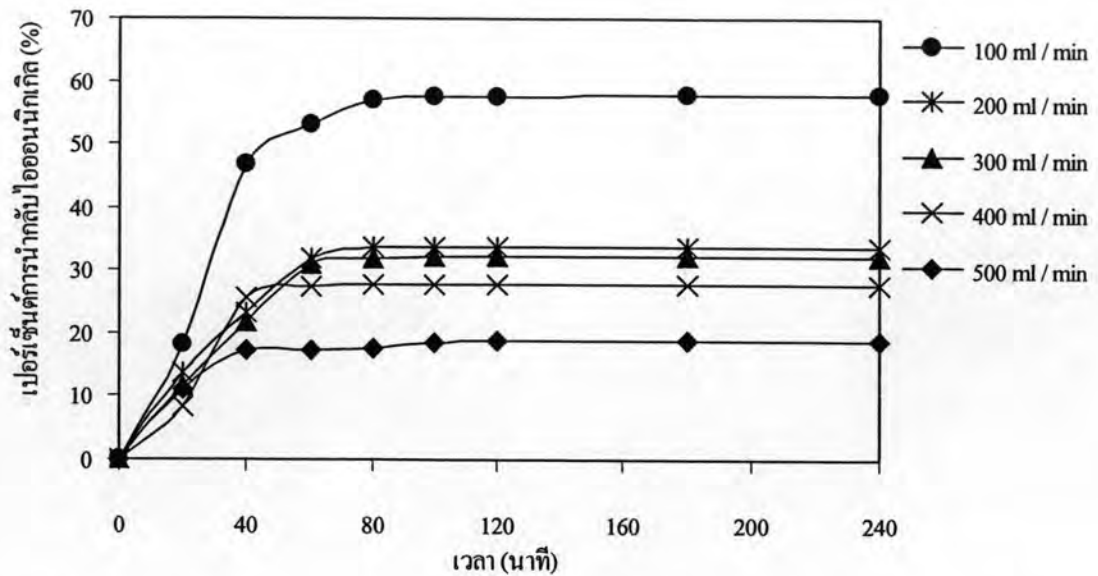


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและไอออนเหล็กจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการนำกลับมากขึ้น (สมการที่ 4.2) ตามหลักการของเลอชาเตอลิเยอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกมากกว่า 2.0 M เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและไอออนเหล็กจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกสามารถนำกลับไอออนเหล็กได้ แต่เนื่องจากสารสกัด LIX 860-I มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับไอออนนิกเกิลได้มากกว่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนเหล็กจึงต่ำกว่า นอกจากนี้ไม่ควรเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกเกิน 2.5 M เพราะอาจทำให้มอดูลเส้นใยกลวงเสียหายได้ ดังนั้นในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไปจะใช้ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกที่ 2 M แทนความเข้มข้น 2.5 M เพราะเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลไม่แตกต่างกัน (58% ที่ 2 M และ 60% ที่ 2.5 M) และการใช้กรดซัลฟิวริกที่ 2 M ประหยัดสารเคมีและมีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานมากกว่า

4.4 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับและเวลาการสกัดต่างๆ

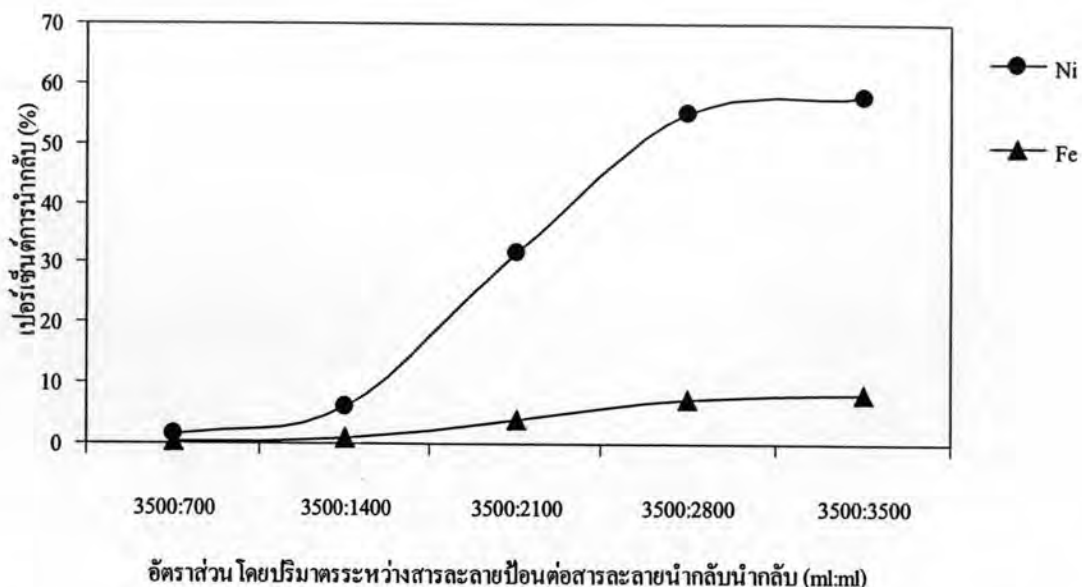


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลกับอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เวลาต่างๆ [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$

พบว่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลสูงที่สุดประมาณ 60% ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ 100 ml/min แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ระยะเวลาที่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าไปอยู่ในมอดูลเยื่อแผ่นเหลวน้อยลง ส่งผลให้เวลาในการสัมผัสระหว่างเฟสเพื่อเกิดปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับมีน้อย ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลจึงลดลง ที่อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากับ 500 ml/min ปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับจะยุติลงเร็วที่สุดประมาณ 40 นาที (80 นาที ในกรณี 100 ml/min) คาดว่าอาจเป็นเพราะแรงเฉือน (Shear force) ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่กระทำกับผิวสัมผัสของเฟสเยื่อแผ่นเหลวทั้งด้านสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ หรือการเกิดโพลาไรเซชันของความเข้มข้น (Concentration polarization) ที่เกิดขึ้นมากเมื่อมีอัตราการไหลสูง จึงมีฟิล์มบางที่ผิวสัมผัสกั้นการถ่ายเทมวล (สุทธิชัย อัสสะบารุงรัตน์, 2544; B'erub'e a., et al., 2006)

4.5 ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ

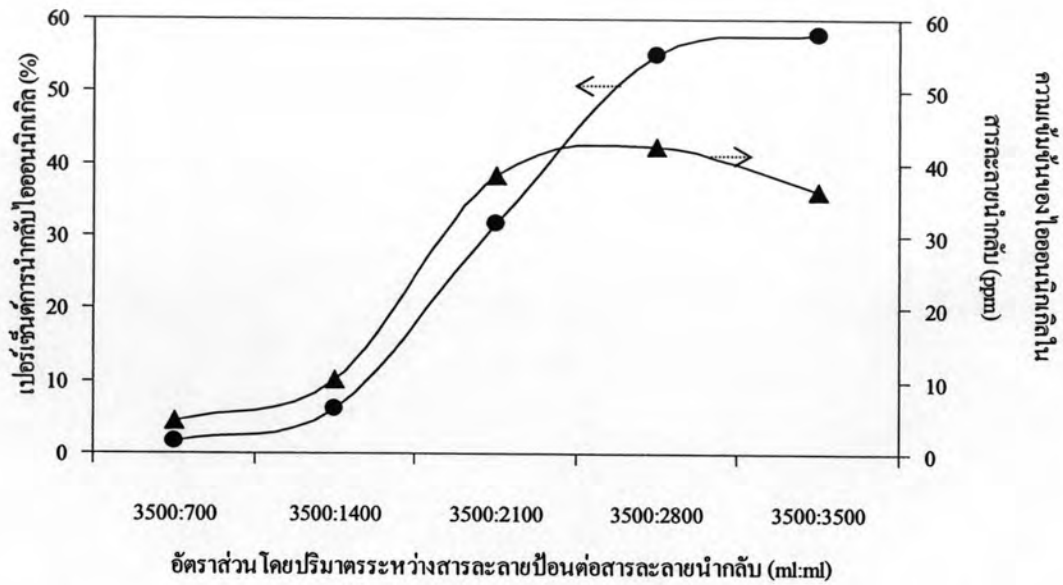
การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับที่อัตราส่วนต่างๆ ต่อเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็ก แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$ ที่เวลา 240 min

เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลที่อัตราส่วนระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับโดยปริมาตร 3500:2800 (ml:ml) และ 3500:3500 (ml:ml) มีค่าใกล้เคียงกันคือ 54% และ 60% ตามลำดับ เมื่อปริมาตรของสารละลายนำกลับลดลงเป็น 2100, 1400 และ 700 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ปริมาณไอออนไฮโดรเนียมลดลง การนำกลับไอออนนิกเกิลจะลดลงตามลำดับทำให้ปฏิกิริยาการนำกลับเกิดได้น้อย ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลจึงลดลง แต่อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณสารละลายนำกลับน้อยกว่าสารละลายป้อนก็มีข้อดีหลายประการ เช่น ประหยัดสารละลายนำกลับ และไอออนนิกเกิลที่ถูกนำกลับมีความเข้มข้นสูง เป็นต้น ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดจากรูปที่ 4.9 ที่อัตราส่วนของสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับโดยปริมาตรเท่ากับ 3500:3500 (ml:ml) และ 3,500:2,800 (ml:ml) มีความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลในถังของสารละลายนำกลับเท่ากับ 36 ppm และ 42 ppm ตามลำดับ

การสกัดไอออนนิกเกิลด้วย 1 มอดูล มีปริมาณไอออนนิกเกิลเหลือในถังสารละลายป้อนประมาณ 11 ppm ซึ่งยังสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล ต่อแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิล

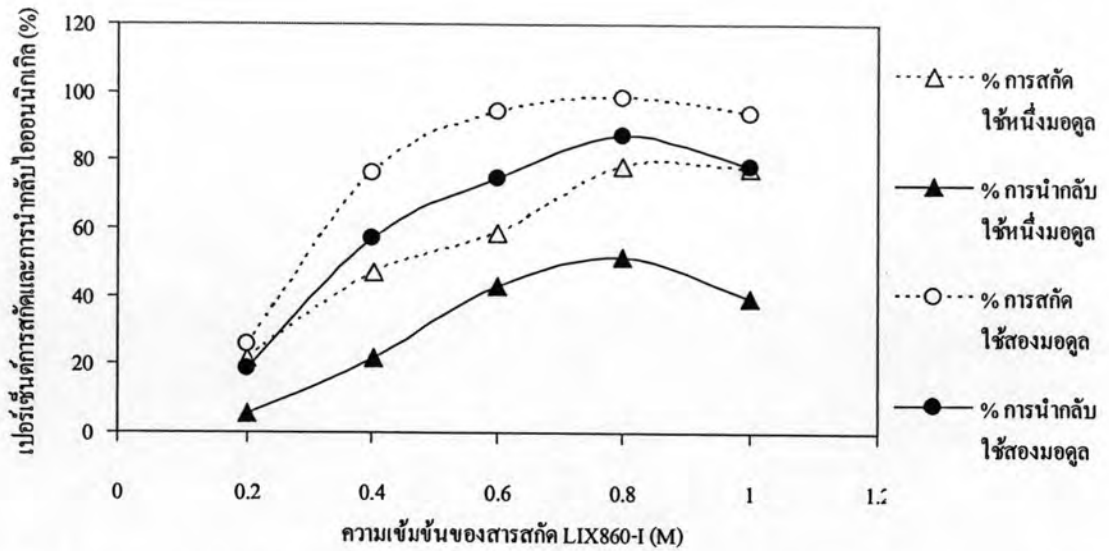


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอโอดีนิกเกิดและความเข้มข้นของไอโอดีนิกเกิดในสารละลายนำกลับกับอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0$ M, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100$ ml/min ที่เวลา 240 min

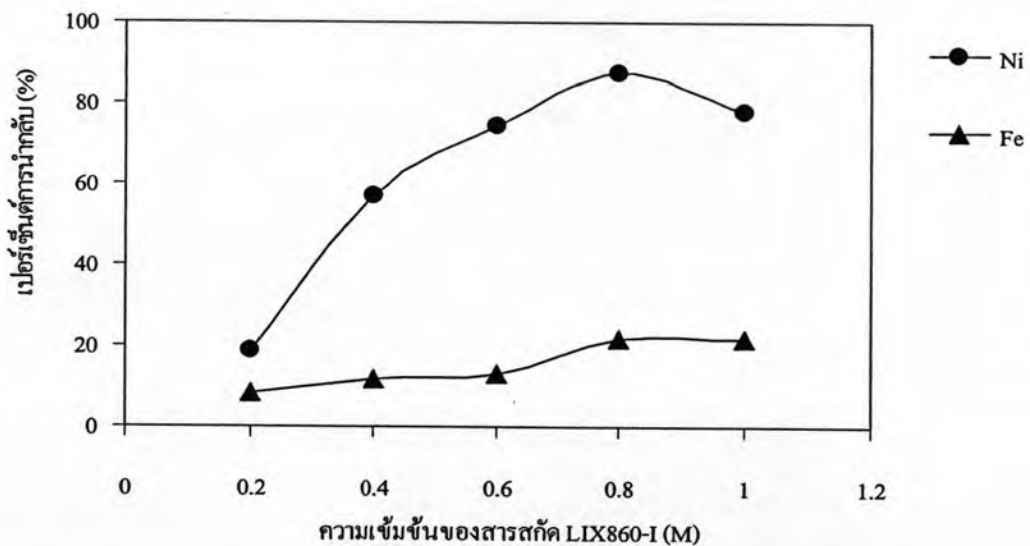
ตอนที่ 2 ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอโอดีนิกเกิดโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล

4.6 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I

ผลของความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I ต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอโอดีนิกเกิด และไอโอดีนหนักแสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I เมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล และ 2 มอดูล $pH_{\text{feed}} = 4$, $[H_2SO_4] = 1.5 \text{ M}$ (1 มอดูล), $[H_2SO_4] = 2.0 \text{ M}$ (2 มอดูล), $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min



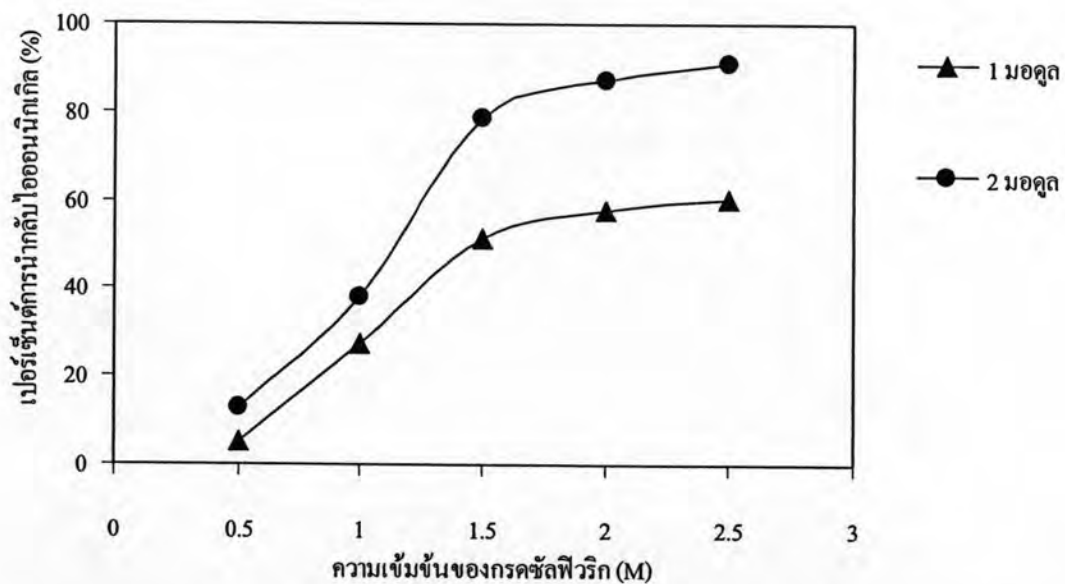
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I เมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 2 มอดูล $pH_{\text{feed}} = 4$, $[H_2SO_4] = 2.0 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{strip}} = V_{\text{feed}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min

จากรูปที่ 4.10 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลเพิ่มขึ้น การใช้ 2 มอดูล ทำให้มีพื้นที่ในการถ่ายเทมวลมากขึ้น ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับจึงสูงกว่า พบว่าเมื่อใช้ 2 มอดูล เปอร์เซ็นต์การสกัดและการนำกลับไอออนนิกเกิลที่ความเข้มข้นของสารสกัด 0.8 M เท่ากับ 98% และ 87% ตามลำดับ และลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดสูงกว่า 0.8 M เพราะสารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดมากขึ้นทำให้การถ่ายเทมวลช้าลง

ความสามารถในการนำกลับไอออนนิกเกิลมากกว่าเหล็กเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารสกัด ดังรูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I ไม่เกิน 0.8 M

4.7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก

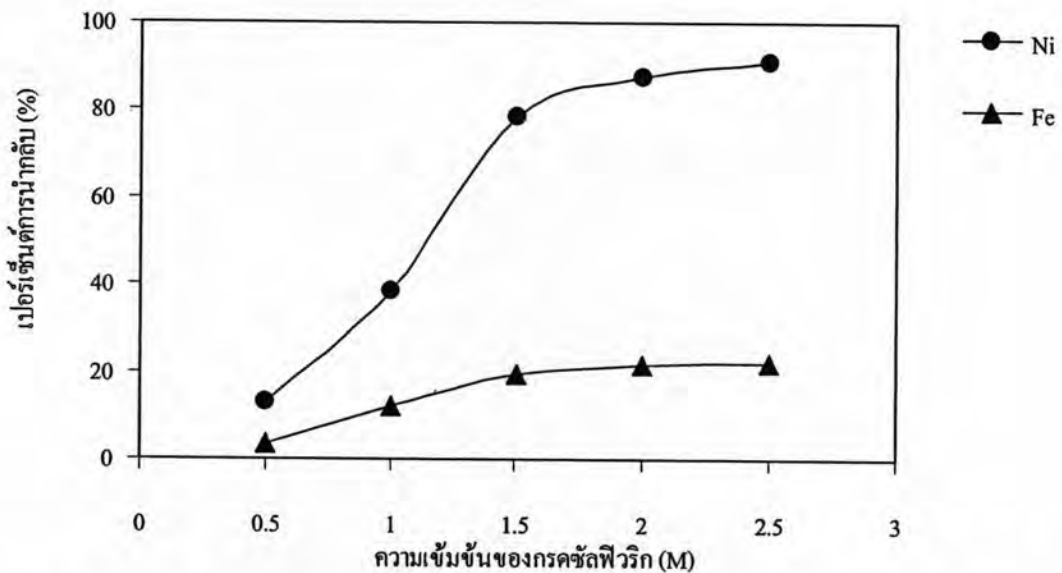
รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลที่ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกต่างๆ เมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล และ 2 มอดูล



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลกับความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกเมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล และ 2 มอดูล [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100$ ml/min, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500$ ml ที่เวลา 240 min

พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลจะเพิ่มขึ้น 91% สำหรับ 2 มอดูล ที่ความเข้มข้น 2.5 M (60% สำหรับ 1 มอดูล) และ 87% สำหรับ 2 มอดูล ที่ความเข้มข้น 2.0 M (58% สำหรับ 1 มอดูล) ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลในถังของสารละลายป้อนและถังสารละลายนำกลับเมื่อสิ้นสุดการทดลองวัดได้ 1 ppm (มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม ไอออนนิกเกิลต้องไม่เกิน 1 ppm) และ 53 ppm ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสกัดไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 2 มอดูล ต่อแบบอนุกรมได้ แต่ความเข้มข้นของไอออนนิกเกิลที่นำกลับยังไม่สูงพอที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

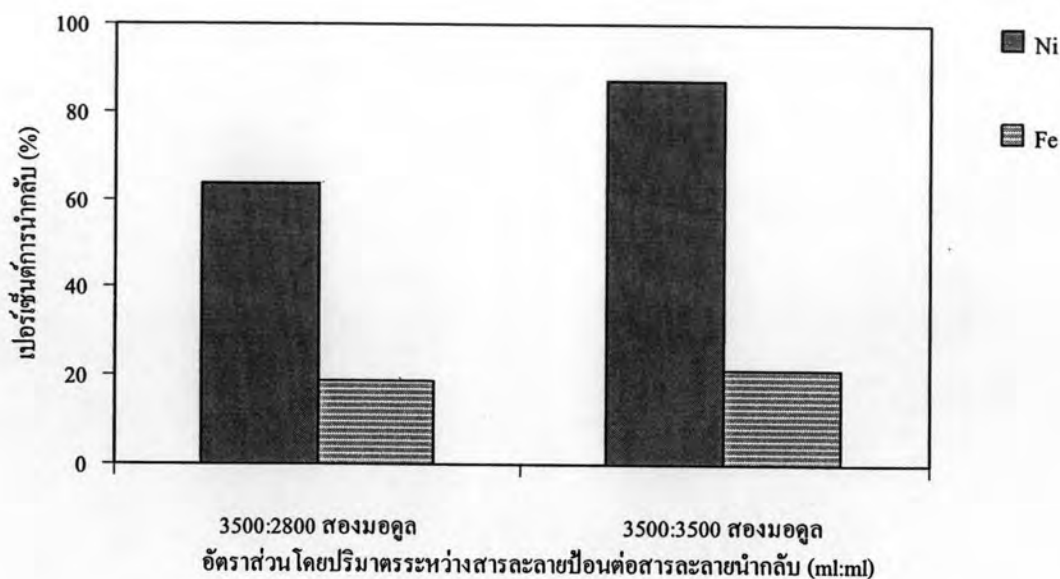
รูปที่ 4.13 การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริกจะทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนนิกเกิลและเหล็กสูงขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลสูงกว่าเหล็ก



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับความเข้มข้นของสารละลายนำกลับกรดซัลฟิวริก [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min

4.8 ผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ

ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับที่ 3500:3500 และ 3500:2800 (ml:ml) แสดงในรูปที่ 4.14

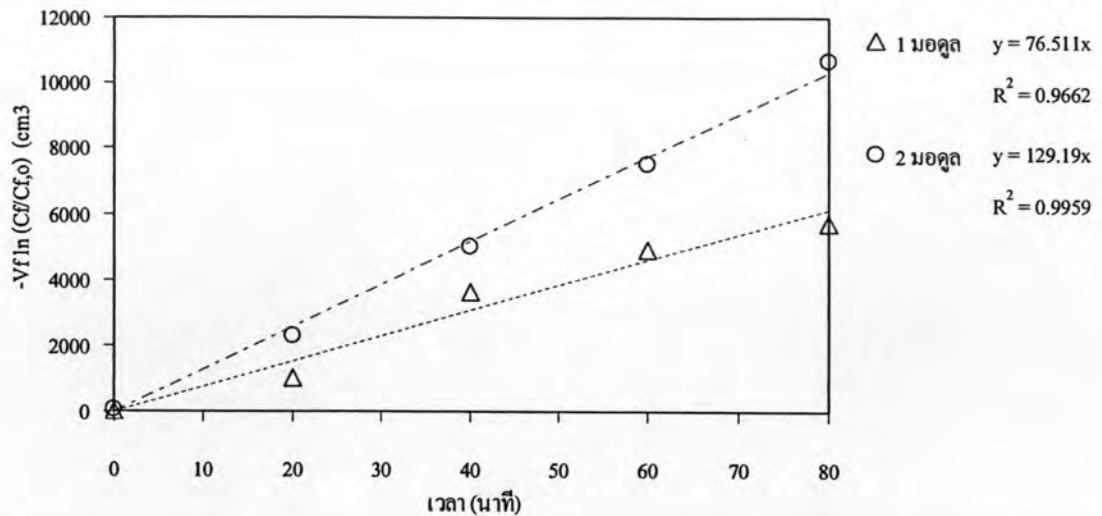


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์นำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กกับอัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับเมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 2 มอดูล [LIX 860-I] = 0.8 M, $pH_{\text{feed}} = 4$, $[H_2SO_4] = 2.0$ M, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100$ ml/min ที่เวลา 240 min

จากรูปพบว่าที่อัตราส่วนระหว่างสารละลายป้อนต่อสารละลายนำกลับ 3500:3500 (ml:ml) สามารถนำกลับไอออนนิกเกิลและเหล็กได้ 87% และ 22% ตามลำดับ และเมื่อใช้อัตราส่วน 3500:2800 (ml:ml) เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิลลดลงมาก ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนเหล็กลดลงเพียงเล็กน้อย เพราะสารสกัด LIX 860-I วงไวต่อการสกัดไอออนนิกเกิล ดังนั้นเมื่อภาวะการสกัดเปลี่ยนไปจึงส่งผลต่อการสกัดไอออนนิกเกิลมากกว่า และก็จะมีผลต่อการนำกลับไอออนนิกเกิลเช่นกัน

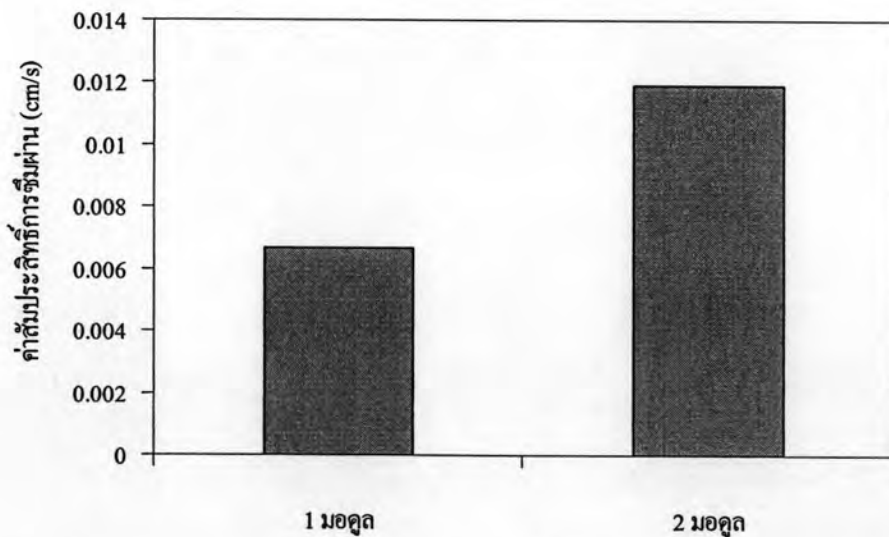
4.9 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient, P)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) คำนวณได้จากสมการที่ 2.14 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right)$ กับเวลา แสดงผลในรูปที่ 4.15 และ 4.16 พิจารณาที่เวลาในการสกัด 80 นาที ซึ่งเป็นช่วงที่มีการซึมผ่านของไอออนนิกเกิลเกิดขึ้นมากและกราฟเป็นเส้นตรง หลังจาก 80 นาที จะมีการซึมผ่านของไอออนนิกเกิลน้อยลง



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln(C_f/C_{f,0})$ ของไอออนนิกเกิลในสารละลายเทียบกับเวลาการสกัดเมื่อใช้เยื่อแผ่นเหลว 1 มอดูล และ 2 มอดูล $[LIX\ 860-I] = 0.8\ M$, $pH_{feed} = 4$, $[H_2SO_4] = 2.0\ M$, $Q_{feed} = Q_{strip} = 100\ ml/min$, $V_{feed} = V_{strip} = 3,500\ ml$ ที่เวลา 80 min

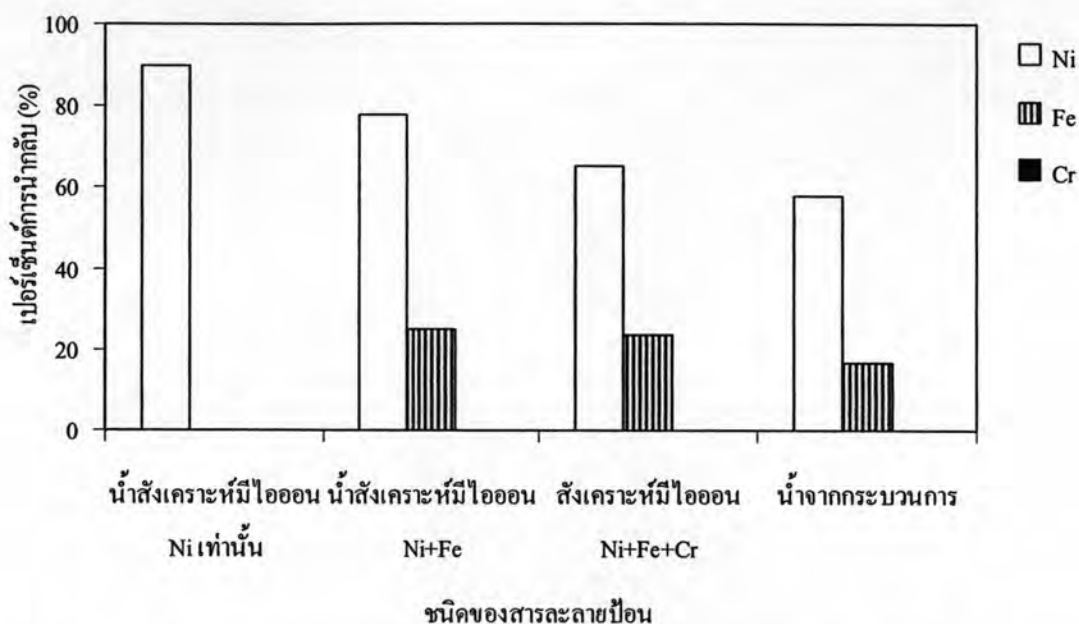
ความชันของกราฟ คือ $AP \frac{\alpha}{\alpha + 1}$ ค่าการซึมผ่านของไอออนนิกเกิลที่คำนวณได้สำหรับ 1 มอดูล และ 2 มอดูล เท่ากับ $0.00666\ cm/s$ และ $0.01194\ cm/s$ เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลว 2 มอดูล มีพื้นที่ของการถ่ายเทมวลมากกว่าทำให้ไอออนนิกเกิลสามารถซึมผ่านเข้ามาในเยื่อแผ่นเหลวได้มากขึ้น



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนนิกเกิลกับการใช้เยื่อแผ่นเหลวหนึ่งมอดูลและสองมอดูล $[LIX\ 860-I] = 0.8\ M$, $pH_{feed} = 4$, $[H_2SO_4] = 2.0\ M$, $Q_{feed} = Q_{strip} = 100\ ml/min$, $V_{feed} = V_{strip} = 3,500\ ml$ ที่เวลา 80 min

4.10 การเปรียบเทียบการนำกลับไอออนนิกเกิลจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับน้ำสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล

น้ำสังเคราะห์ที่ใช้มี 3 ประเภท ได้แก่ น้ำสังเคราะห์ที่มีเฉพาะไอออนนิกเกิลเท่านั้น น้ำสังเคราะห์ที่มีไอออนนิกเกิลและเหล็ก และน้ำสังเคราะห์ที่มีไอออนนิกเกิล เหล็ก และโครเมียม แสดงผลดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนนิกเกิล เหล็ก และ โครเมียมกับชนิดของสารละลายป้อน [LIX 860-I] = 0.8 M, $\text{pH}_{\text{feed}} = 4$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2.0 \text{ M}$, $Q_{\text{feed}} = Q_{\text{strip}} = 100 \text{ ml/min}$, $V_{\text{feed}} = V_{\text{strip}} = 3,500 \text{ ml}$ ที่เวลา 240 min

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารละลายป้อนมีไอออนหลายชนิด จะมีผลกระทบต่อ การสกัดและการนำกลับไอออนโลหะที่ต้องการ ดังนั้นในการกำจัดไอออนโลหะออกจากน้ำเสียของ กระบวนการผลิตที่มีไอออนโลหะหลายชนิดของแต่ละอุตสาหกรรมและการนำกลับไอออนโลหะนั้น การเลือกชนิดของสารสกัดและสารละลายนำกลับได้อย่างเหมาะสมเป็นปัจจัยที่สำคัญ จึงจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบและปริมาณของไอออนต่างๆ ที่มีในน้ำเสียนั้น และสมบัติทาง เคมีของสารสกัดและสารละลายนำกลับแต่ละชนิด ค่าแฟกเตอร์การแยก (Separation Factor: S.F.) ระหว่างไอออน 2 ชนิด ในสารละลายป้อนที่มีไอออนโลหะหลายชนิด จะบอกความสามารถ ในการคัดเลือกสกัดและนำกลับไอออนได้

ในงานวิจัยนี้สารสกัด LIX 860-I มีเหมาะสมมากที่สุดในการสกัดและนำกลับไอออน
นิกเกิลจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ประกอบด้วยไอออนโลหะหลายชนิด
ทั้งที่มีประจุบวกและที่รวมตัวเป็นกลุ่มไอออนที่มีประจุลบ