บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดและนำกลับโลหะทองแดงและโครเมียมจากสารละลายโลหะผสม โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พยุงด้วยเส้นใยกลวงแบบต่อเนื่อง เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายสตริป และจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง

การสกัดไอออนโลหะทั้งสามชนิด อันได้แก่ ทองแดง โครเมียม และสังกะสีนั้น เมื่อพิจารณาในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งซึ่งบรรจุสารสกัด LIX 84-I จะพบว่าไอออนทองแดงเท่านั้นที่จะเกิดกระบวนการสกัดและนำกลับ เนื่องจากสารสกัด LIX 84-I ผลิตมาเพื่อใช้ในการสกัดไอออนโลหะที่มีประจุบวกโดยเฉพาะโลหะทองแดง เป็นเหตุให้ไอออนสังกะสีจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับ (ภายใต้สภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ศึกษา) แม้ว่าจะมีประจุบวกเช่นกัน ปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับของทองแดง [Rousseau, 1987] แสดงดังสมการ (4.1)

$$Cu^{2+}_{(aq)} + 2\overline{RH}_{(org)} \rightleftharpoons \overline{R_2Cu}_{(org)} + 2H^{+}_{(aq)} \qquad (4.1)$$

โดย RH คือสารสกัด LIX 84-I ซึ่งการถ่ายเทมวลนั้นไอออนทองแดงในสารละลายป้อนกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลายสตริปจะเคลื่อนที่ในทิศทางสวนทางกันในวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

ส่วนในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองซึ่งบรรจุด้วยสารสกัดอะลิควอต จะพบว่าไอออนโครเมียมเท่านั้นที่จะเกิดการสกัดและนำกลับ เนื่องจากสารสกัดอะลิควอตเป็นสารสกัดชนิดเบสที่มีอนุมูลอิสระ (คลอไรด์ไอออน) เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยากับไอออนโลหะที่มีประจุลบ ซึ่งไอออนโครเมียมเท่านั้นที่จะแตกตัวให้ประจุลบ ส่วนไอออนทองแดงและสังกะสีจะแตกตัวให้ประจุบวก ปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับของโครเมียม [Rousseau, 1987] แสดงดังสมการ (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ

$$\overline{R_3CH_3NX}_{(org)} + HCrO_{4\,(org)}^{-} \rightleftharpoons \overline{(R_3CH_3N)\cdot HCrO_4}_{(org)} + X^{-}_{(aq)} \qquad (4.2)$$

$$\overline{(R_3CH_3N)\cdot HCrO_4}_{(org)} + NaX_{(aq)} \rightleftharpoons \overline{(R_3CH_3N)\cdot X}_{(org)} + NaHCrO_{4(aq)} \quad (4.3)$$

โดย R_3CH_3NCl คือสารสกัดอะลิควอต และ X คือ คลอไรด์ไอออน (Cl^-) หรือไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งการสกัดจะเริ่มจากไอออนโครเมียมในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดอะลิควอต (เริ่มต้น X เป็นคลอไรด์ไอออน) ดังสมการ (4.2) ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนกับสารสกัด หลังจากนั้นเกิดการนำกลับด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังสมการ (4.3) ได้ไอออนโลหะมาสู่สารละลายสตริปและสารสกัดที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์แทนที่คลอไรด์ [Galan, 1994] เพื่อนำไปใช้ในการสกัดต่อไป การถ่ายเทมวลนั้นไอออนโครเมียมในสารละลายป้อนกับไฮดรอกไซด์ไอออนจะเคลื่อนที่ในทิศทางสวนทางกันในวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งแรงขับในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวคือผลต่างของความเป็นกรด-ด่างในกระบวนการ ดังนั้นกลไกการถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนกว่าระบบจะเข้าสู่สมดุล

4.1 ผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนที่มีต่อการสกัดและนำกลับโลหะ

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน ทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนเป็น 1.5 2 2.5 3 3.5 และ 4 ตามลำดับ ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดในสารละลายป้อน (ทองแดง โครเมียม และสังกะสี) มีค่า 100 ppm โดยโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งบรรจุสารสกัด LIX 84-I ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป ส่วนโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองบรรจุสารสกัดอะลิควอตและโดเดคคานอล (สารปรับปรุงคุณภาพ) เข้มข้น 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ การอธิบายผลการทดลองจะพิจารณาแต่ละโมดูลเส้นใยกลวง ดังนี้

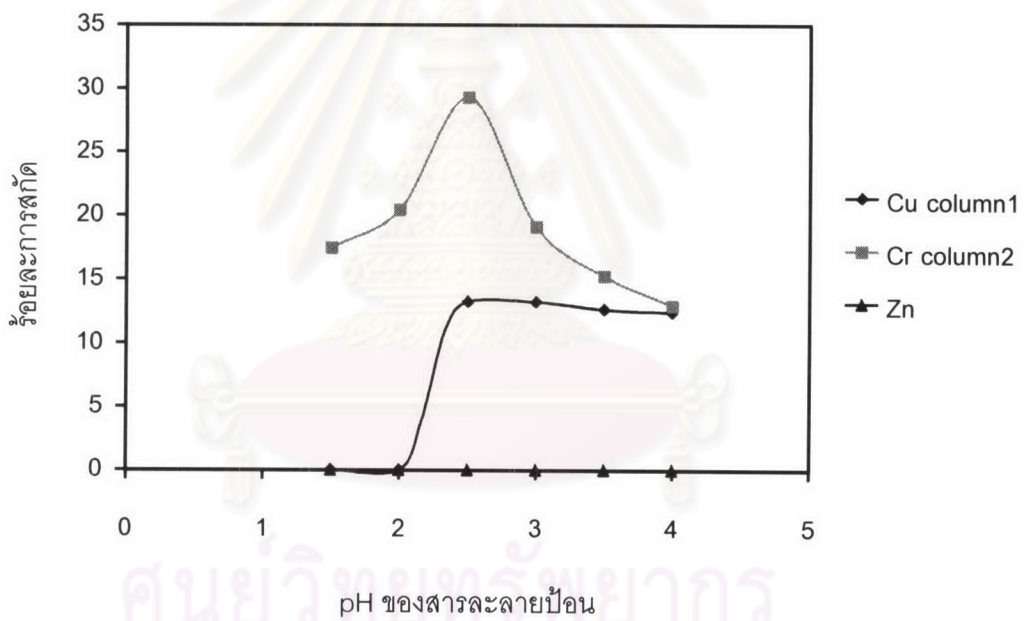
<u>โมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่ง</u>

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าในคอลัมน์ที่หนึ่งจะเกิดการสกัดและนำกลับเฉพาะไอออนทองแดงเท่านั้น โดยเมื่อความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนสูงขึ้น ร้อยละการสกัดและนำกลับมี

แนวโน้มสูงขึ้นและคงที่เมื่อความเป็นกรด-ด่างมีค่ามากกว่า 2.5 สามารถอธิบายผลการทดลองด้วยสมการ (4.1)

$$Cu^{2+}_{(aq)} + 2\overline{RH}_{(org)} \rightleftharpoons \overline{R_2Cu}_{(org)} + 2H^{+}_{(aq)} \qquad (4.1)$$

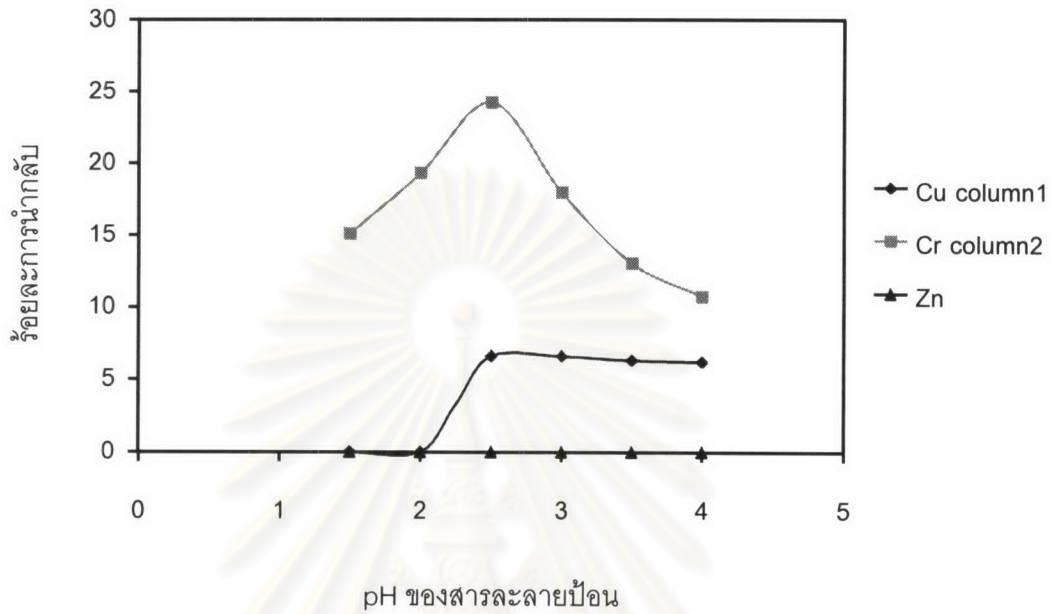
จากสมการ (4.1) จะเห็นว่า เมื่อความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ไฮโดรเนียมไอออน (H^+) มีค่าลดลง ทำให้ปฏิกิริยาจะดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้นตามทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอร์ริเยร์ (Henry Louis Le Chatelier) [ณรรฐพล วิจิตรเฉลิมพงษ์, 2545] ทำให้ได้สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างทองแดงกับสารสกัด (R_2Cu) มากขึ้น เป็นเหตุให้ร้อยละการสกัดเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ผลต่างของความเป็นกรด-ด่างระหว่างสารละลายป้อนกับสารละลายสตริปถือเป็นแรงขับที่สำคัญต่อกลไกการถ่ายเทมวลของกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดของโลหะ เมื่อ $[Cu^{2+}]_F = [HCrO_4^-]_F = [Zn^{2+}]_F = 100$ ppm, $[LIX\ 84\text{-}I]_{M1} = 1\%v/v$, $[Aliquat]_{M2} = 1\%v/v$, $[H_2SO_4]_{S1} = 0.1$ M, $[NaOH]_{S2} = 0.5$ M และ $Q_F = Q_S = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

ส่วนค่าร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับร้อยละการสกัด เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่า ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่เหมาะสมในการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงคือมีค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 2.5 โดยที่ความเป็นกรด-ด่าง 2.5 3 3.5 และ 4 มีค่าร้อยละการสกัด 13.21 13.19 12.61 และ 12.37 ตามลำดับ ส่วนค่าร้อย

ละการนำกลับเป็น 6.60 6.59 6.31 และ 6.19 ตามลำดับ ซึ่งในการตัดสินใจเลือกใช้ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่เหมาะสมในการดำเนินการจะต้องพิจารณาจากผลการทดลองที่มีต่อโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองประกอบด้วย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับของโลหะ เมื่อ $[Cu^{2+}]_F$= $[HCrO_4^-]_F$= $[Zn^{2+}]_F$=100 ppm, $[LIX\ 84\text{-}I]_{M1}$=1%v/v, $[Aliquat]_{M2}$= 1%v/v, $[H_2SO_4]_{S1}$= 0.1 M, $[NaOH]_{S2}$= 0.5 M และ Q_F= Q_S= 100 มิลลิลิตรต่อนาที

<u>โมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สอง</u>

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าในคอลัมน์ที่สองนั้นจะเกิดการสกัดและนำกลับเฉพาะไอออนโครเมียมเท่านั้น ส่วนทองแดงและสังกะสีจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับ สำหรับในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่ทำการทดลอง (pH 2-6) ไอออนโครเมียมในสารละลายป้อนจะปรากฏในรูป $HCrO_4^-$ [Herold et al.,1994] โดยเมื่อความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนสูงขึ้น ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับมีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.5 หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดต่ำลง

เมื่อความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 การสกัดโครเมียมจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสารสกัดที่ใช้ (อะลิควอต) เป็นสารสกัดชนิดเบส ซึ่งเมื่อสารละลายป้อนมีค่าความเป็นกรด-ด่างมากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการสกัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน [Castillo et al., 2002]

ส่วนในกรณีที่ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนมีค่ามากกว่า 2.5 จะมีแนวโน้มการสกัดลดลง สามารถอธิบายได้จากสมการการสกัดด้วยสารสกัดอะลิควอตดังสมการ (4.2)

$$\overline{R_3CH_3NX}_{(org)} + HCrO_{4(org)}^{-} \rightleftharpoons \overline{(R_3CH_3N)\cdot HCrO_4}_{(org)} + X^{-}_{(aq)} \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.2) จะเห็นว่าถ้าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่า X หรือไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ปฏิกิริยาการจะดำเนินย้อนกลับตามหลักเฮนรี หลุยส์ เลอชา เตอร์ริเยร์ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโครเมียมน้อยลงขึ้น ดังนั้นร้อยละการสกัดจึงลดลง นอกจากนี้เมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ผลต่างความเป็นกรด-ด่างระหว่างสารละลายป้อนกับสารละลายสตริป (โซเดียมไฮดรอกไซด์) มีค่าน้อยลง แรงขับของกลไกการถ่ายเทมวลลดลง ดังนั้นค่าการสกัดจึงมีค่าลดลงด้วย

เมื่อพิจารณาผลของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่มีต่อการนำกลับไอออนโครเมียมสามารถอธิบายด้วยปฏิกิริยาการนำกลับไอออนโครเมียมด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ (4.3)

$$\overline{(R_3CH_3N)\cdot HCrO_4}_{(org)} + NaX_{(aq)} \rightleftharpoons \overline{(R_3CH_3N)\cdot X}_{(org)} + NaHCrO_{4(aq)} \quad (4.3)$$

จากสมการ (4.3) จะเห็นว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโครเมียมจะมีผลต่อร้อยละการนำกลับ ตามทฤษฎีของหลุยส์ เลอชาเตอร์ริเยร์ ทำให้ร้อยละการนำกลับมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการสกัด โดยในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่เหมาะสมคือ 2.5 ซึ่งมีค่าร้อยละการสกัดและนำกลับเป็น 29.29 และ 24.24 ตามลำดับ

จากการทดลองข้างต้น จะเห็นว่าไอออนโลหะแต่ละชนิดจะมีการแตกตัวได้ดีในค่าความเป็นกรด-ด่างบางช่วงเท่านั้น ซึ่งจากการทดลองจะดำเนินการในช่วงความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน 1.5 ถึง 4 เท่านั้น เนื่องจากถ้าความเป็นกรด-ด่างมีค่ามากกว่า 4 ไอออนโลหะจะเกิดการตกตะกอน เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้ในโมดูลเส้นใยกลวงทั้งสองคอลัมน์พบว่า ความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อนที่เหมาะสมในการดำเนินการทดลองคือ 2.5 นอกจากนี้ถ้าพิจารณาจากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงค่าฟลักซ์ ค่าการซึมผ่าน และสัมประสิทธิ์การแยก จะเห็นว่าที่ความเป็นกรด-ด่าง 2.5 จะให้ค่าต่างๆ สูงสุด

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายป้อน

ค่า pH	ฟลักซ์ (mol/m^{2}min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก		
	J_{Cu}	J_{Cr}	P_{Cu}	P_{Cr}	$\alpha_{Cu/Cr}$	$\alpha_{Cr/Cu}$	$\alpha_{(Cu\ or\ Cr)/Zn}$
1.5	0	2.06×10^{-5}	0	1.24×10^{-5}	0	∞	∞
2	0	2.47×10^{-5}	0	1.46×10^{-5}	0	∞	∞
2.5	1.57×10^{-5}	3.98×10^{-5}	9.43×10^{-6}	2.09×10^{-5}	0.45	2.22	∞
3	1.35×10^{-5}	2.33×10^{-5}	9.42×10^{-6}	1.36×10^{-5}	0.69	1.44	∞
3.5	1.57×10^{-5}	1.92×10^{-5}	9.01×10^{-6}	1.09×10^{-5}	0.83	1.21	∞
4	1.35×10^{-5}	1.65×10^{-5}	8.83×10^{-6}	9.22×10^{-6}	0.96	1.04	∞

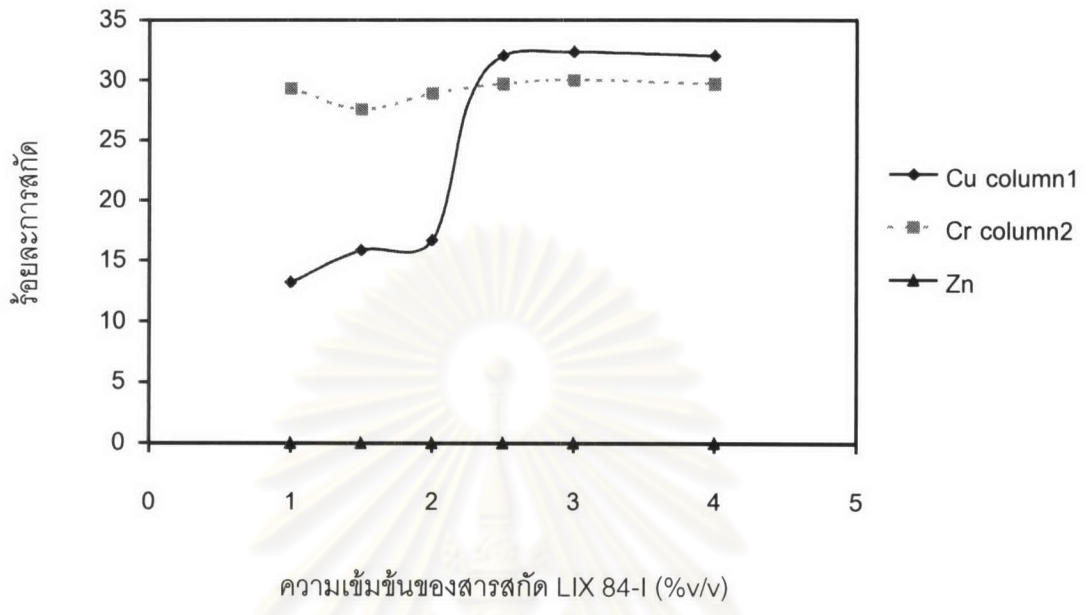
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้สกัดโลหะ

การศึกษาปัจจัยเรื่องความเข้มข้นของสารสกัดนั้น ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ปริมาณสารสกัดที่เหมาะสมในการดำเนินการโดยคำนึงถึงค่าร้อยละการสกัดและนำกลับโลหะที่ได้ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์อีกด้วย ความเข้มข้นของสารสกัดที่ศึกษามี 2 ชนิด คือสารสกัด LIX 84-I สำหรับการสกัดทองแดง และสารสกัดอะลิควอตสำหรับการสกัดโครเมียม ผลการศึกษาที่ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

4.2.1 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I ที่มีต่อการสกัดและนำกลับโลหะทองแดง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของสารสกัด LIX 84-I ต่อการสกัดและนำกลับไอออนทองแดง ทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นสารสกัด LIX 84-I ในตัวทำละลายเคโรซีนที่บรรจุในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งเป็น 1 1.5 2 2.5 3 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดในสารละลายป้อน (ทองแดง โครเมียม และสังกะสี) มีค่า 100 ppm ความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.5 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) โดยสารละลายสตริปสำหรับโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งคือ กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ส่วนโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองบรรจุสารสกัดอะลิควอตและโดเดคคานอล (สารปรับปรุงคุณภาพ) เข้มข้น 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป อัตราการไหลของสาร

ละลายป้อนและสารละลายสตริปมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



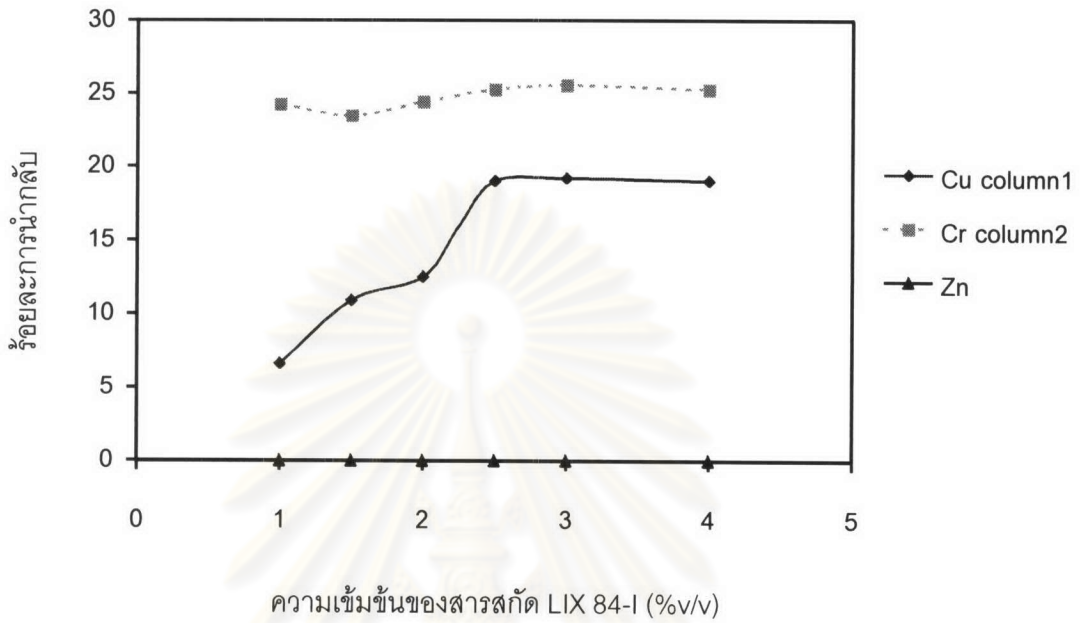
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I ในคอลัมน์ที่หนึ่งกับร้อยละการสกัดไอออนทองแดง เมื่อ $[Cu^{2+}]_F = [HCrO_4^-]_F = [Zn^{2+}]_F$= 100 ppm, pH_F= 2.5, $[Aliquat]_{M2}$= 1%v/v, $[H_2SO_4]_{S1}$= 0.1 M, $[NaOH]_{S2}$= 0.5 M และ $Q_F = Q_S$= 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนทองแดง โครเมียม และสังกะสี เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสารสกัด LIX 84-I ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่ง พบว่าร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนทองแดงในคอลัมน์ที่หนึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I จาก 1 จนถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และหลังจากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองซึ่งสกัดไอออนโครเมียมด้วยสารสกัดอะลิควอตจะให้ค่าร้อยละการสกัดค่อนข้างคงที่ เนื่องจากให้ปัจจัยต่างๆ ในคอลัมน์ที่สองคงที่ สำหรับไอออนสังกะสีจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับดังกล่าวไว้ข้างต้น ผลการทดลองอธิบายได้จากสมการ (4.1)

$$Cu^{2+}_{(aq)} + 2\overline{RH}_{(org)} \rightleftharpoons \overline{R_2Cu}_{(org)} + 2H^{+}_{(aq)} \qquad (4.1)$$

ในช่วงความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งมีค่า 1 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากสมการ (4.1) เมื่อความเข้มข้นสารสกัด (RH) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนิน

ไปข้างหน้ามากขึ้นตามทฤษฎีเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ เกิดการสกัดไอออนทองแดงมากขึ้น หรือก็คือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนทองแดงมากขึ้น ทำให้เกิดการนำกลับเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการนำกลับเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการ (4.1)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I ในคอลัมน์ที่หนึ่งกับร้อยละการนำกลับไอออนทองแดง เมื่อ $[Cu^{2+}]_F = [HCrO_4^-]_F = [Zn^{2+}]_F$= 100 ppm, pH_F= 2.5, $[Aliquat]_{M2}$= 1%v/v, $[H_2SO_4]_{S1}$= 0.1 M, $[NaOH]_{S2}$= 0.5 M และ $Q_F = Q_S$= 100 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I มีค่ามากกว่า 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น [Luccio et al., 2000] ทำให้ขวางกั้นการถ่ายเทมวลไอออนทองแดงจากสารละลายป้อนไปสู่สารละลายเยื่อแผ่นเหลว หรือก็คือจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) ของสารประกอบระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะที่ละลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้มีค่าน้อยลง ดังสมการของ Nernst ดังนี้

$$D = \frac{RT}{6\Pi\eta r} \qquad (4.4)$$

เมื่อ R คือระยะทางในการแพร่ T คืออุณหภูมิของสารละลาย Π คือ ค่าคงที่มีค่า 3.14 η คือความหนืดของสารละลาย และ r คือขนาดโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน

นอกจากนี้สาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการสกัดและนำกลับไอออนที่คงที่ อาจเนื่องมาจากขีดจำกัดของรูพรุนจุลภาคเส้นใยกลวง กล่าวคือเส้นใยกลวงนั้นสามารถบรรจุสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้ในปริมาณจำกัด จึงสอดคล้องกับผลการทดลองที่ว่า เมื่อเพิ่มสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวมากขึ้น จะให้การถ่ายเทมวลที่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงจนกระทั่งมีค่าเกือบคงที่ แสดงให้เห็นถึงขีดจำกัดในการถ่ายเทมวล ดังนั้นความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I ที่จะพิจารณาเลือกใช้คือมีค่ามากกว่า 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่ง

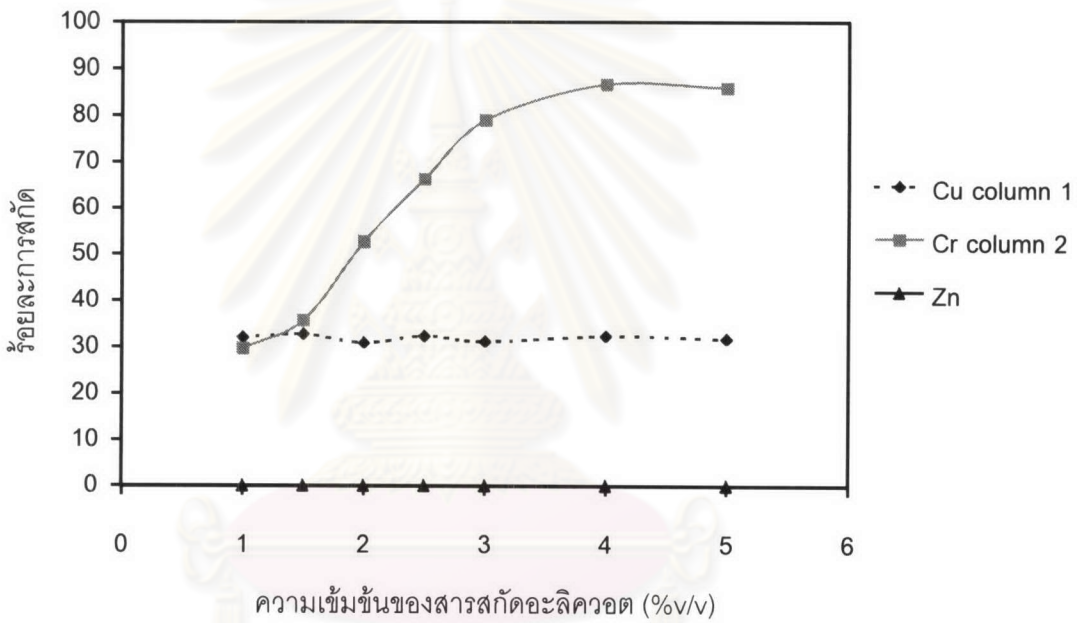
LIX 84-I	ฟลักซ์ (mol/m^2min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก	
(%v/v)	J_{Cu}	J_{Cr}	P_{Cu}	P_{Cr}	$\alpha_{Cu/Cr}$	$\alpha_{(Cu\ or\ Cr)/Zn}$
1	$1.57x10^{-5}$	$3.98x10^{-5}$	$9.43x10^{-6}$	$2.09x10^{-5}$	0.45	∞
1.5	$1.80x10^{-5}$	$3.71x10^{-5}$	$1.13x10^{-5}$	$1.97x10^{-5}$	0.57	∞
2	$1.80x10^{-5}$	$3.57x10^{-5}$	$1.19x10^{-5}$	$2.06x10^{-5}$	0.58	∞
2.5	$3.60x10^{-5}$	$3.71x10^{-5}$	$2.29x10^{-5}$	$2.11x10^{-5}$	1.08	∞
3	$3.60x10^{-5}$	$3.71x10^{-5}$	$2.31x10^{-5}$	$2.14x10^{-5}$	1.08	∞
4	$3.60x10^{-5}$	$3.71x10^{-5}$	$2.29x10^{-5}$	$2.11x10^{-5}$	1.08	∞

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านของไอออนทองแดงจะมีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I มีค่ามากกว่า 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อันเนื่องมาจากขีดจำกัดในการถ่ายเทมวลดังกล่าวข้างต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาผลร่วมกับค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดง และความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจึงเลือกใช้สารสกัด LIX 84-I ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรบรรจุในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งเพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป โดยจากผลการทดลองนี้มีค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงเป็น 32 และ 19 ตามลำดับ

4.2.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตที่มีต่อการสกัดและนำกลับโลหะโครเมียม

การทดลองเพื่อศึกษาผลของสารสกัดอะลิควอตต่อการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียม ทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอต (ใช้โดเดคคานอลความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีนที่บรรจุในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่ง

เป็น 1 1.5 2 2.5 3 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดในสารละลายป้อน (ทองแดง โครเมียม และสังกะสี) มีค่า 100 ppm ความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.5 โดยโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งบรรจุสารสกัด LIX 84-I ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2.1) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป ส่วนสารละลายสตริปสำหรับโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตในคอลัมน์ที่สองกับร้อยละการสกัดไอออนโครเมียม เมื่อ $[Cu^{2+}]_F$= $[HCrO_4^-]_F$= $[Zn^{2+}]_F$= 100 ppm, pH_F= 2.5, $[LIX\ 84\text{-}I]_{M1}$= 2.5%v/v, $[H_2SO_4]_{S1}$= 0.1 M, $[NaOH]_{S2}$= 0.5 M และ Q_F= Q_S= 100 มิลลิลิตรต่อนาที

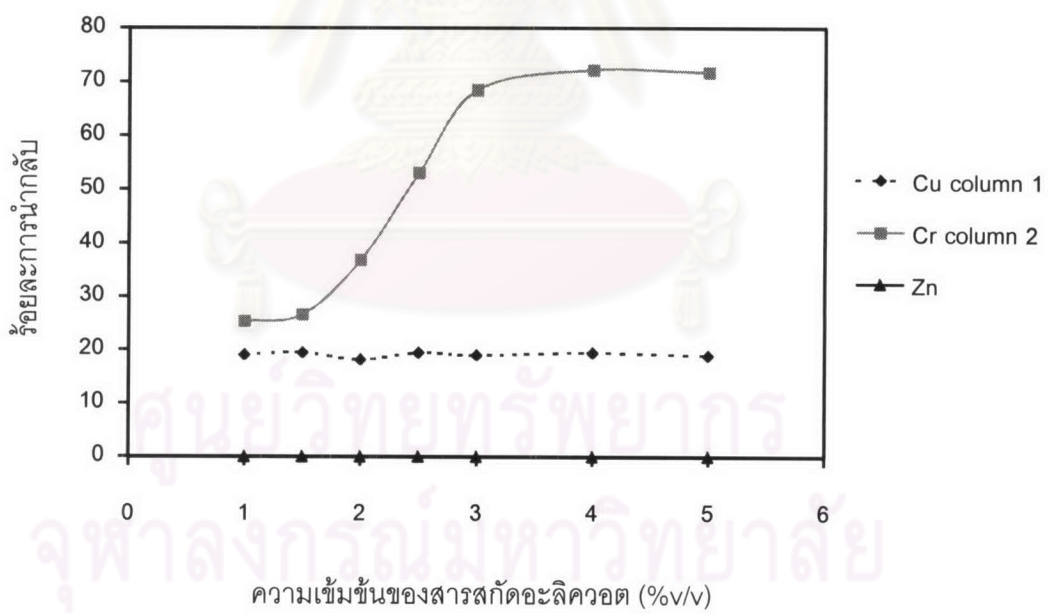
จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดง โครเมียม และสังกะสี เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสารสกัดอะลิควอตในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สอง ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงด้วยสารสกัด LIX 84-I ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากให้ปัจจัยต่างๆ ในคอลัมน์ที่หนึ่งคงที่ ส่วนร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียมด้วยสารสกัดอะลิควอตในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สอง จะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตจาก 1 จนถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และหลังจากนั้นจะ

มีค่าค่อนข้างคงที่ สำหรับไอออนสังกะสีจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับได้ดังกล่าวข้างต้น ผลการทดลองสามารถอธิบายได้โดยสมการการสกัดและนำกลับ (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ

$$\overline{R_3CH_3NX}_{(org)} + HCrO_{4\,(org)}^{-} \rightleftharpoons \overline{(R_3CH_3N)\cdot HCrO_4}_{(org)} + X^{-}_{(aq)} \quad (4.2)$$

$$\overline{(R_3CH_3N)\cdot HCrO_4}_{(org)} + NaX_{(aq)} \rightleftharpoons \overline{(R_3CH_3N)\cdot X}_{(org)} + NaHCrO_{4\,(aq)} \quad (4.3)$$

ในช่วงความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองมีค่า 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียมมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากสมการ (4.2) เมื่อสารสกัด (R_3CH_3NX) มากขึ้นจะส่งผลให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้นตามทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอร์ริเยร์ เกิดการสกัดไอออนโครเมียมมากขึ้น หรือก็คือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโครเมียม ($(R_3CH_3N)HCrO_4$) มากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาการนำกลับด้วยสมการ (4.3) ถ้าสารประกอบเชิงซ้อนนี้มากขึ้นจะเกิดการนำกลับมากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตในคอลัมน์ที่สองกับร้อยละการนำกลับไอออนโครเมียม เมื่อ $[Cu^{2+}]_F = [HCrO_4^-]_F = [Zn^{2+}]_F$= 100 ppm, pH_F= 2.5, $[LIX\ 84\text{-}I]_{M1}$= 2.5%v/v, $[H_2SO_4]_{S1}$= 0.1 M, $[NaOH]_{S2}$= 0.5 M และ $Q_F = Q_S$= 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตมีค่ามากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะให้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับค่อนข้างคงที่ เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสารสกัดอะลิควอตนั้นเป็นสารสกัดชนิดเบส (พวกเอมีน) ซึ่งสามารถเกิดการรวมตัวกันเองเกิดเป็นวัฏภาคที่สามขึ้นมาขัดขวางการถ่ายเทมวล ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.3.1 แม้ว่าในที่นี้จะมีการใช้สารปรับปรุงคุณภาพ (โดเดคคานอลเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ในทุกๆ การทดลอง แต่เมื่อความเข้มข้นสารสกัดมากขึ้น ปริมาณสารปรับปรุงคุณภาพที่ใช้นี้อาจไม่เพียงพอต่อการขัดขวางการเกิดวัฏภาคที่สามได้ และอาจมีเหตุผลอื่นๆ ร่วมด้วยดังกล่าวในหัวข้อ 4.2.1 ดังนั้นถ้าพิจารณาเฉพาะค่าร้อยละการสกัดและนำกลับจะเห็นว่าความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตที่จะพิจารณาเลือกใช้คือมีค่ามากกว่า4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สอง

Aliquat	ฟลักซ์ (mol/m^{2}min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก	
(%v/v)	J_{Cu}	J_{Cr}	P_{Cu}	P_{Cr}	$\alpha_{Cr/Cu}$	$\alpha_{(Cu\ or\ Cr)/Zn}$
1	3.60×10^{-5}	3.71×10^{-5}	2.28×10^{-5}	2.12×10^{-5}	0.93	∞
1.5	3.60×10^{-5}	4.81×10^{-5}	2.33×10^{-5}	2.55×10^{-5}	1.09	∞
2	3.26×10^{-5}	6.87×10^{-5}	2.20×10^{-5}	3.76×10^{-5}	1.71	∞
2.5	3.37×10^{-5}	8.93×10^{-5}	2.30×10^{-5}	4.74×10^{-5}	2.06	∞
3	3.15×10^{-5}	1.03×10^{-4}	2.22×10^{-5}	5.64×10^{-5}	2.54	∞
4	3.37×10^{-5}	1.15×10^{-4}	2.30×10^{-5}	6.18×10^{-5}	2.69	∞
5	3.6×10^{-5}	1.08×10^{-4}	2.26×10^{-5}	6.13×10^{-5}	2.71	∞

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านของไอออนโครเมียมจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดอะลิควอตในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองเป็น 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาผลร่วมกับค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียมและความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นจึงเลือกใช้สารสกัดอะลิควอตความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรบรรจุในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สอง จากผลการทดลองค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียมเป็น 86.60 และ 72.16 ตามลำดับ

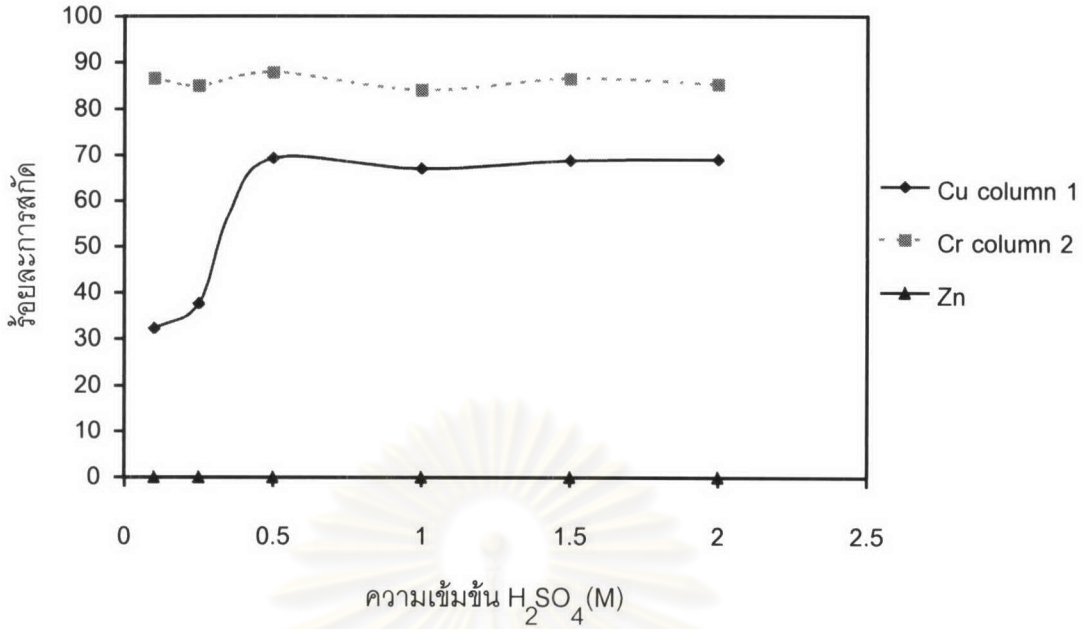
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายสตริปในการนำกลับโลหะ

การศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายสตริปจะใช้ข้อมูลจากผลการทดลองของสารสกัดข้างต้น โดยเลือกใช้ปริมาณสารสกัดทั้งสองชนิดที่ทำให้เกิดค่าร้อยละการสกัดสูงสุด และนำมาศึกษาถึงความเข้มข้นของสารละลายสตริปที่มีต่อการนำกลับ ซึ่งยังคงแบ่งการสกัดและนำกลับเป็นสองโมดูลเช่นเดิม ดังนี้

4.3.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายสตริปกรดซัลฟูริกในการนำกลับโลหะทองแดง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของสารละลายสตริปกรดซัลฟูริกในโมดูลเส้นใยกลวงที่หนึ่ง ทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายสตริปเป็น 0.1 0.25 0.5 1 1.5 และ 2 โมลต่อลิตรตามลำดับ ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดในสารละลายป้อน (ทองแดง โครเมียม และสังกะสี) มีค่า 100 ppm ความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.5 โดยโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งบรรจุสารสกัด LIX 84-I ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2.1) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน ส่วนโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองบรรจุสารสกัดอะลิควอตและโดเดคคานอล (สารปรับปรุงคุณภาพ) เข้มข้น 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2.2) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายสตริปกรดซัลฟูริกที่มีต่อการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่ง ซึ่งแนวโน้มของร้อยละการสกัดและนำกลับเป็นไปเช่นเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกจาก 0.1 จนถึง 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและหลังจากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียมด้วยสารสกัดอะลิควอตในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองมีค่าค่อนข้างคงที่โดยเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ เนื่องจากให้ปัจจัยต่างๆ ในคอลัมน์ที่สองคงที่ และสำหรับไอออนสังกะสีจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับดังกล่าวไว้ข้างต้น



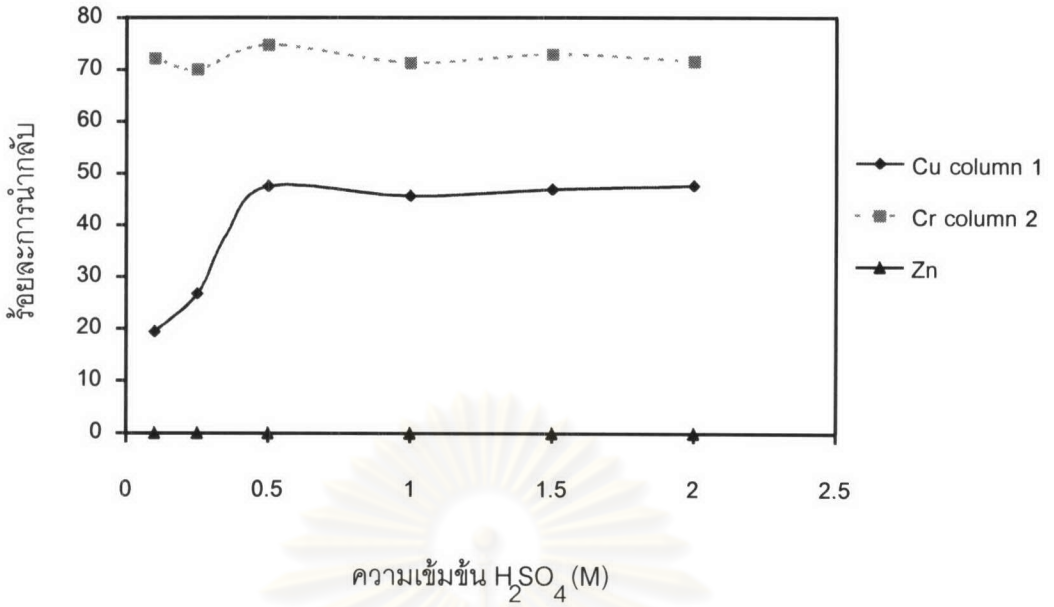
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสตริปกรดซัลฟูริกในคอลัมน์ที่หนึ่งกับร้อยละการสกัดไอออนทองแดง เมื่อ $[Cu^{2+}]_F$= $[HCrO_4^-]_F$= $[Zn^{2+}]_F$= 100 ppm, pH_F= 2.5, $[LIX\ 84\text{-}I]_{M1}$=2.5%v/v,$[Aliquat]_{M2}$=4%v/v, $[NaOH]_{S2}$=0.5 M และ Q_F=Q_S=100มิลลิลิตรต่อนาที

ผลการทดลองที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายโดยสมการ (4.1)

$$Cu^{2+}_{(aq)} + 2\overline{RH}_{(org)} \rightleftharpoons \overline{R_2Cu}_{(org)} + 2H^+_{(aq)} \qquad (4.1)$$

ในช่วงความเข้มข้นของสารละลายสตริปกรดซัลฟูริกในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งมีค่า 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยถ้าพิจารณาจากปฏิกิริยาย้อนกลับของสมการ (4.1) ซึ่งคือปฏิกิริยาการนำกลับไอออนทองแดง เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น ค่าไฮโดรเนียมไอออน (H^+) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดการนำกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาการสกัด อาจกล่าวได้ว่าการนำกลับที่ดีจะสตริปไอออนทองแดงออกจากเยื่อแผ่นเหลวได้ดี ทำให้สารสกัดสามารถสกัดไอออนทองแดงในฝั่งของสารละลายป้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสตริปกรดซัลฟูริกมีค่ามากกว่า 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายเทมวลของโมดูลเส้นใยกลวงมีค่าคงที่ จึงมีอัตราการถ่ายเทมวลที่จำกัด พิสูจน์ได้จากค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านจากตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสตริปกรดซัลฟูริกในคอลัมน์ที่หนึ่งกับร้อยละการนำกลับทองแดง เมื่อ$[Cu^{2+}]_F$= $[HCrO_4^-]_F$= $[Zn^{2+}]_F$=100 ppm,pH_F= 2.5,$[LIX\ 84\text{-}I]_{M1}$= 2.5%v/v, $[Aliquat]_{M1}$= 4%v/v, $[NaOH]_{S2}$= 0.5 M และ Q_F= Q_S = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

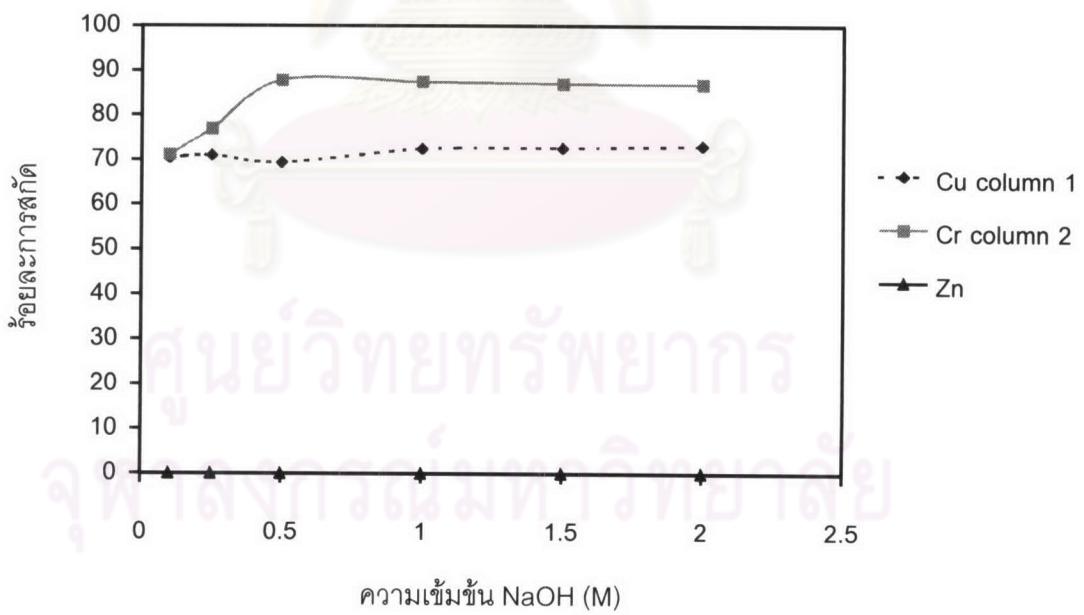
จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านของไอออนทองแดงมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกจาก 0.1 จนถึง 0.5 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าจากตารางที่ 4.4 ร่วมกับค่าร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนทองแดงจากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริกที่เหมาะสมในการใช้ศึกษาปัจจัยอื่นต่อไปคือ 0.5 โมลต่อลิตร โดยให้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงเป็น 69.31 และ 47.52 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายสตริปกรดซัลฟูริกในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่ง

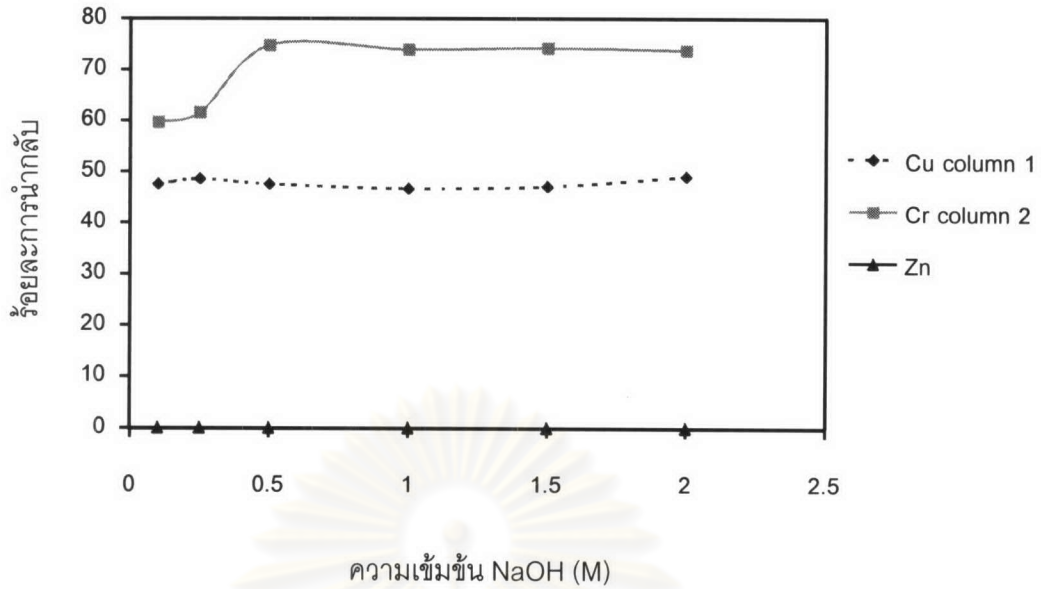
H_2SO_4	ฟลักซ์ (mol/m^2min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก	
(M)	J_{Cu}	J_{Cr}	P_{Cu}	P_{Cr}	$\alpha_{Cu/Cr}$	$\alpha_{(Cu\ or\ Cr)/Zn}$
0.1	$3.37x10^{-5}$	$1.15x10^{-4}$	$2.30x10^{-5}$	$6.19x10^{-5}$	0.37	∞
0.25	$4.27x10^{-5}$	$1.17x10^{-4}$	$2.69x10^{-5}$	$6.07x10^{-5}$	0.44	∞
0.5	$7.87x10^{-5}$	$1.19x10^{-4}$	$4.95x10^{-5}$	$6.28x10^{-5}$	0.79	∞
1	$7.75x10^{-5}$	$1.08x10^{-4}$	$4.78x10^{-5}$	$6.00x10^{-5}$	0.80	∞
1.5	$7.42x10^{-5}$	$1.14x10^{-4}$	$4.91x10^{-5}$	$6.17x10^{-5}$	0.79	∞
2	$7.98x10^{-5}$	$1.12x10^{-4}$	$4.92x10^{-5}$	$6.09x10^{-5}$	0.8	∞

4.3.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการนำกลับโลหะโครเมียม

การทดลองเพื่อศึกษาผลของสารละลายสตริปโซเดียมไฮดรอกไซด์ในโมดูลเส้นใยกลวงที่สอง ทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายสตริปเป็น 0.1 0.25 0.5 1 1.5 และ 2 โมลต่อลิตรตามลำดับ ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดในสารละลายป้อน (ทองแดง โครเมียม และสังกะสี) มีค่า 100 ppm ความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.5 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1) โดยโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งบรรจุสารสกัด LIX 84-I ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2.1) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.3.1) ส่วนโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองบรรจุสารสกัดอะลิควอตและโดเดคคานอล (สารปรับปรุงคุณภาพ) เข้มข้น 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2.2) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์ที่สองกับร้อยละการสกัดไอออนโครเมียม เมื่อ $[Cu^{2+}]_F$= $[HCrO_4^-]_F$=$[Zn^{2+}]_F$= 100 ppm, pH_F= 2.5, $[LIX\ 84\text{-}I]_{M1}$= 2.5%v/v, $[Aliquat]_{M1}$= 4%v/v, $[H_2SO_4]_{S1}$= 0.5 M และ Q_F= Q_S= 100 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์ที่สองกับร้อยละการนำกลับไอออนโครเมียม เมื่อ $[Cu^{2+}]_F=[HCrO_4^-]_F=[Zn^{2+}]_F=$ 100 ppm, pH_F=2.5, $[LIX\ 84\text{-}I]_{M1}$=2.5%v/v, $[Aliquat]_{M1}$= 4%v/v, $[H_2SO_4]_{S1}$= 0.5 M และ $Q_F= Q_S$= 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงผลของความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียมในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สอง ซึ่งแนวโน้มของร้อยละการสกัดและนำกลับเป็นไปเช่นเดียวกัน โดยค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนทองแดงด้วยสารสกัด LIX 84-I ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่ง มีค่าค่อนข้างคงที่โดยเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ เนื่องจากให้ปัจจัยต่างๆ ในคอลัมน์ที่หนึ่งคงที่ ส่วนโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.1 จนถึง 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และหลังจากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ สำหรับไอออนสังกะสีจะไม่เกิดการสกัดและนำกลับดังกล่าวไว้ข้างต้น ผลการทดลองที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายโดยใช้สมการ (4.3)

$$\overline{(R_3CH_3N)\cdot HCrO_{4\,(org)}} + NaX_{(aq)} \rightleftharpoons \overline{(R_3CH_3N)\cdot X_{(org)}} + NaHCrO_{4(aq)} \quad (4.3)$$

ในช่วงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองมีค่า 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนโครเมียมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยถ้าพิจารณาจากปฏิกิริยาการนำกลับจากสมการ (4.3) จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของ

โซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้ามากขึ้น หรือการนำกลับมากขึ้นนั่นเอง ซึ่งการนำกลับที่ดีขึ้นนี้จะส่งผลต่อการสกัด เป็นผลให้การสกัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากกว่า 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียมมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายเทมวลของโมดูลเส้นใยกลวงมีค่าคงที่ จึงมีอัตราการถ่ายเทมวลที่จำกัด พิสูจน์ได้จากค่าฟลักซ์และค่าการซึมผ่านจากตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารละลายสตริปโซเดียมไฮดรอกไซด์ในโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สอง

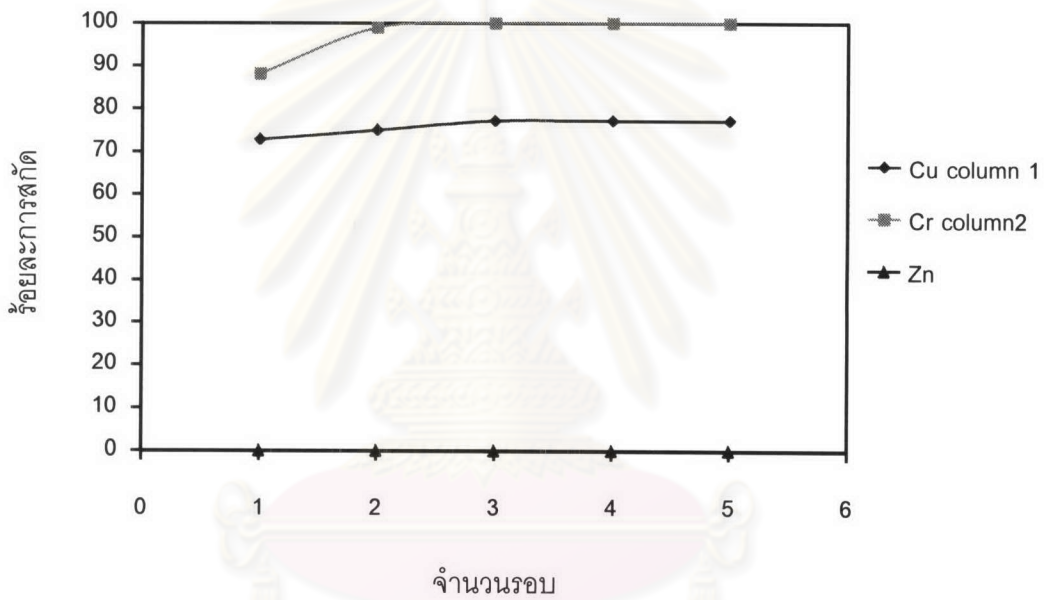
NaOH	ฟลักซ์ (mol/m^2min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก	
(M)	J_{Cu}	J_{Cr}	P_{Cu}	P_{Cr}	$\alpha_{Cr/Cu}$	$\alpha_{(Cu\ or\ Cr)/Zn}$
0.1	$7.98x10^{-5}$	$1.02x10^{-4}$	$5.02x10^{-5}$	$5.08x10^{-5}$	1.01	∞
0.25	$8.20x10^{-5}$	$1.10x10^{-4}$	$5.06x10^{-5}$	$5.49x10^{-5}$	1.08	∞
0.5	$7.87x10^{-5}$	$1.19x10^{-4}$	$4.95x10^{-5}$	$6.28x10^{-5}$	1.27	∞
1	$8.54x10^{-5}$	$1.15x10^{-4}$	$5.17x10^{-5}$	$6.25x10^{-5}$	1.21	∞
1.5	$8.32x10^{-5}$	$1.11x10^{-4}$	$5.18x10^{-5}$	$6.22x10^{-5}$	1.20	∞
2	$8.20x10^{-5}$	$1.18x10^{-4}$	$5.21x10^{-5}$	$6.20x10^{-5}$	1.19	∞

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าค่าฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านของไอออนโครเมียมมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.1 จนถึง 0.5 โมลต่อลิตร หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าจากตารางที่ 4.5 ร่วมกับค่าร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนทองแดงจากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการใช้ศึกษาปัจจัยอื่นต่อไปคือ 0.5 โมลต่อลิตร โดยให้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับไอออนโครเมียมเป็น 87.88 และ 74.75 ตามลำดับ

4.4 ผลของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงที่มีต่อการสกัดและนำกลับโลหะ

การทดลองเพื่อศึกษาผลของจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง ทำโดยนำสารละลายป้อนและสารละลายสตริปขาออกกลับมาไหลเวียนผ่านโมดุลเส้นใยกลวงอีกครั้ง ทำเช่นนี้จำนวน 5 รอบ ส่วนปัจจัยอื่นๆ จะมีค่าคงที่ ดังนี้คือ ความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดในสารละลายป้อน (ทองแดง โครเมียม และสังกะสี) มีค่า 100 ppm ความเป็นกรด-ด่างเป็น 2.5 (ค่าที่เหมาะสม

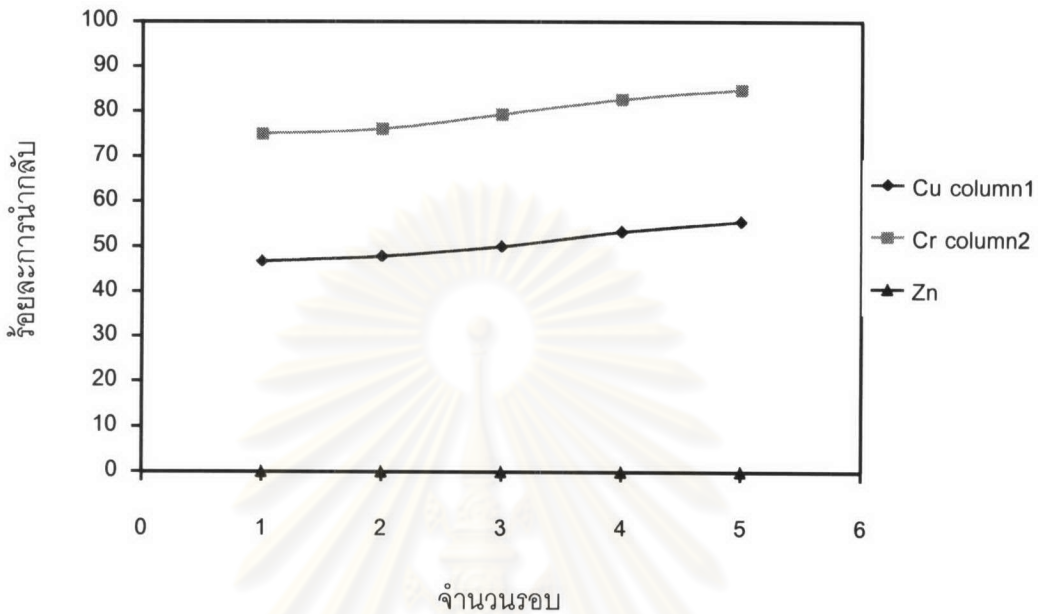
จากหัวข้อ 4.1) โดยโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่หนึ่งบรรจุสารสกัด LIX 84-I ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2.1) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้กรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.3.1) ส่วนโมดูลเส้นใยกลวงคอลัมน์ที่สองบรรจุสารสกัดอะลิควอตและโดเดคคานอล (สารปรับปรุงคุณภาพ) เข้มข้น 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.2.2) ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายสตริป (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.3.2) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการผ่านโมดูลกับร้อยละการสกัดของโลหะ เมื่อ $[Cu^{2+}]_F = [HCrO_4^-]_F = [Zn^{2+}]_F$= 100 ppm, pH_F=2.5, $[\text{LIX 84-I}]_{M1}$ = 2.5%v/v, $[\text{Aliquat}]_{M1}$= 4%v/v, $[H_2SO_4]_{S1}$= 0.5 M, $[NaOH]_{S2}$= 0.5 M และ $Q_F = Q_S$= 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าร้อยละการสกัดเมื่อผ่านเส้นใยกลวงรอบแรกนั้นทองแดงมีค่า 72.83 และโครเมียม 88.04 ส่วนร้อยละการนำกลับทองแดงมีค่า 46.74 และโครเมียม 75 ในกรณีสังกะสีจะไม่เกิดทั้งการสกัดและนำกลับได้เลยดังอธิบายข้างต้น และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงจะทำให้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับของทองแดงและโครเมียมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนรอบในการเพิ่มโมดูลเส้นใยกลวงเป็นการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา (Resident time) ทำให้สารละลายป้อนสามารถสัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลว และเยื่อแผ่นเหลวสามารถสัมผัสกับสารละลายสตริปได้นานขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับได้เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.11

จะพบว่าจำนวนในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวงที่เหมาะสมคือ 3 รอบ โดยมีค่าร้อยละการสกัดของทองแดงและโครเมียม 77.17 และ 100 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.12 ร้อยละการนำกลับมีค่า 50 และ 79.35 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการผ่านโมดูลกับร้อยละการนำกลับของโลหะ เมื่อ $[Cu^{2+}]_F = [HCrO_4^-]_F = [Zn^{2+}]_F$= 100 ppm, pH_F= 2.5, $[LIX\ 84\text{-}I]_{M1}$ = 2.5%v/v, $[Aliquat]_{M1}$= 4%v/v, $[H_2SO_4]_{S1}$= 0.5 M, $[NaOH]_{S2}$= 0.5 M และ $Q_F = Q_S$= 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จากตารางที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพในการเพิ่มของจำนวนรอบของโมดูลเส้นใยกลวงที่มีต่อค่าฟลักซ์ ค่าการซึมผ่าน และสัมประสิทธิ์การแยก จะพบว่าค่าทั้งสามจะคงที่เมื่อผ่านโมดูลเส้นใยกลวงในรอบที่สาม ซึ่งสอดคล้องกับการเลือกใช้เมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับของโลหะในรูปที่ 4.11 และ 4.12

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การแยกของโลหะเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านโมดูลเส้นใยกลวง

จำนวนรอบ	ฟลักซ์ (mol/m^{2}min)		การซึมผ่าน (m/min)		สัมประสิทธิ์การแยก		
	J_{Cu}	J_{Cr}	P_{Cu}	P_{Cr}	$\alpha_{Cu/Cr}$	$\alpha_{Cr/Cu}$	$\alpha_{(Cu\ or\ Cr)/Zn}$
1	7.53×10^{-5}	1.11×10^{-4}	5.20×10^{-5}	6.29×10^{-5}	0.83	1.21	∞
2	7.76×10^{-5}	1.25×10^{-4}	5.36×10^{-5}	7.06×10^{-5}	0.76	1.32	∞
3	7.98×10^{-5}	1.26×10^{-4}	5.51×10^{-5}	7.14×10^{-5}	0.77	1.29	∞
4	7.98×10^{-5}	1.26×10^{-4}	5.51×10^{-5}	7.14×10^{-5}	0.77	1.29	∞
5	7.98×10^{-5}	1.26×10^{-4}	7.98×10^{-5}	7.14×10^{-5}	0.77	1.29	∞