

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนทองแดงด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงอันได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดในวิฤภาคเยื่อแผ่นเหลว ชนิดของสารสกัดในวิฤภาคเยื่อแผ่นเหลว ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิฤภาคสารละลายป้อน ผลของการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของวิฤภาคสารละลายป้อน และผลของการไหลเวียนวิฤภาคสารละลายสตริป และจะอธิบายผลที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการถ่ายเทมวลควบคุมแบบสวนทางคั่งที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3

ประสิทธิภาพของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในงานวิจัยนี้ถูกเปรียบเทียบโดยพิจารณาจากค่าตัวแปร 3 ตัวได้แก่ ค่าฟลักซ์ (μux) ของการนำกลับไอออนทองแดง ค่าร้อยละการสกัด (percent extraction) และค่าร้อยละการนำกลับ (percent recovery) โดยค่าฟลักซ์ของการนำกลับไอออนทองแดงประมาณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่นำกลับได้ทั้งหมดในวิฤภาคสารละลายสตริปกับผลคูณของพื้นที่ผิวสัมผัสที่กำหนดทั้งหมดของเส้นใยกลวงกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง $\left(J = \frac{Cu_{total, recovery}}{A \cdot t} \right)$ ค่าร้อยละการสกัดประมาณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดไปทั้งหมดจากวิฤภาคสารละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงทั้งหมดในวิฤภาคสารละลายป้อนก่อนทำการทดลอง $\left(\%E = \frac{Cu_{total, extract}}{Cu_{total, feed}} \cdot 100 \right)$ ส่วนค่าร้อยละการนำกลับประมาณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่นำกลับได้ทั้งหมดในวิฤภาคสารละลายสตริปกับปริมาณไอออนทองแดงทั้งหมดในวิฤภาคสารละลายป้อนก่อนทำการทดลอง $\left(\%R = \frac{Cu_{total, recovery}}{Cu_{total, feed}} \cdot 100 \right)$ การคำนวณตัวแปรทั้ง 3 มีสมมติฐานร่วมกันว่า ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิฤภาคสารละลายป้อนและวิฤภาคสารละลายสตริปที่ตกค้างในโมดูลของเส้นใยกลวงเท่ากับความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิฤภาคสารละลายป้อนและวิฤภาคสารละลายสตริปที่อยู่ในภาชนะรองรับเมื่อการทดลองสิ้นสุดและพื้นที่

ผิวสัมผัสที่กำหนดของโมดูลเส้นใยถ่วงเป็นพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทมวล (ตัวอย่างการคำนวณดูได้จากภาคผนวก ง)

เนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคสารละลายสตรีปเป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลดังที่ได้อธิบายไว้ใน การถ่ายเทมวลแบบควบคุมในบทที่ 3 ดังนั้นทุก ๆ การทดลองในงานวิจัยนี้จึงถูกควบคุมให้ผลต่างของความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างภูมิภาคสารละลายป้อนกับภูมิภาคสารละลายสตรีปมีค่าสูงโดยจะควบคุมให้ความเป็นกรด-ด่างของภูมิภาคสารละลายป้อนมีค่าประมาณ 5 และความเป็นกรด-ด่างของภูมิภาคสารละลายสตรีปมีค่าประมาณ 1 ทั้งนี้เนื่องจากถ้าให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของภูมิภาคสารละลายป้อนสูงเกินไป ไอออนทองแดงอาจเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวได้ และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างของภูมิภาคสารละลายสตรีปต่ำเกินไป ส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์การทดลองอาจได้รับความเสียหายได้ (Baker และ Blume, 1990)

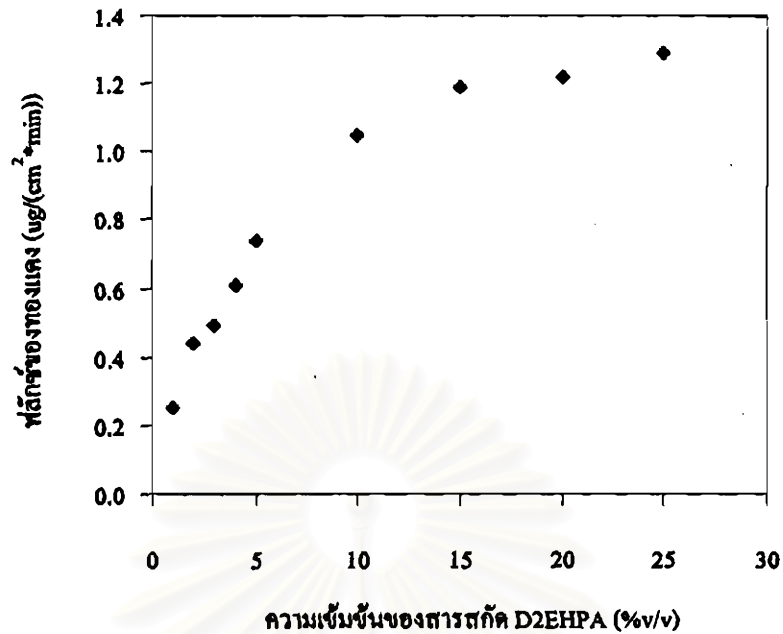
5.1 ผลของความเข้มข้นสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง

การทดลองดำเนินการโดยใช้สารสกัดที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กันสำหรับสารสกัดแต่ละชนิด การทดลองทั้งหมดดำเนินการที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนเท่ากัน (ประมาณ 100 ppm) และมีอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป 200 มิลลิลิตร ต่อนาทีเท่ากัน สารสกัดที่ใช้ในการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ โดยปกติมักคาดหวังว่าปริมาณไอออนโลหะที่สกัดได้ควรจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัดที่เพิ่มขึ้น หรือค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวควรจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัดที่เพิ่มขึ้น แต่ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทมวลมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนกว่านั้น ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของสารสกัดสำหรับกรณีสารสกัด D2EHPA, LIX84-I และ LIX860-I ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.1,

5.2 และ 5.3 ตามลำดับ (ผลการทดลองแสดงในตาราง ข-1 ในภาคผนวก ข ผลการคำนวณค่าฟลักซ์
แสดงในตาราง ค-1 ในภาคผนวก ค)

จากผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดง
ผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ดังรูปที่ 5.1 พบว่าโดยรวมค่าฟลักซ์ของ
การถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้น
(ในการทดลองนี้ค่าฟลักซ์อยู่ในช่วง 0.25 ถึง 1.29 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที แต่อัตรา
การเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์พอจะแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง กล่าวคือในช่วงที่สารสกัดมีความเข้มข้นร้อยละ
1 ถึงร้อยละ 5 โดยปริมาตร ค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงกับ
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วงประมาณ 0.13 ถึง 0.19 และใน
ช่วงความเข้มข้นของสารสกัดจากร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 25 โดยปริมาตร ความชันของกราฟจะลดลง
จาก 0.13 เป็นอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.06 (ผลการคำนวณค่าความชันของกราฟแสดงไว้ในตาราง ค-19
ภาคผนวก ค)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เมื่อ $[D2EHPA]_{\text{membrane}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%$ และ 25% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100 \text{ ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{\text{strip}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตรีปในฝั่งเปลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

ผลที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อน กล่าวคือที่ความเข้มข้นของสารสกัดค่าต่ำ ๆ เมื่อไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมายังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้ ไอออนทองแดงจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออน โดยมีอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนดังสมการ 3.8

$$-r_c = k_1 [Cu^{2+}] [RH]^2 - k_2 [CuR_2] [H^+]^2 \quad (3.8)$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้วิทยาศาสตร์ละลายป้อนที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 เท่ากัน ทั้งหมดทำให้พจน์ที่ 2 ของสมการ 3.8 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก สมการ 3.8 จึงลดรูปเป็น

$$-r_c = k_1 [Cu^{2+}] [RH]^2 \quad (5.1)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด [RH] อัตราการหายไปของ ไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจะมากขึ้น ไอออนทองแดงที่หายไปจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $[CuR_2]$ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับ วิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวมากขึ้น จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจึงแพร่ผ่านวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว ไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายสตรีป ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนได้ ไอออนทองแดงและสารสกัด โดยมีอัตราการเกิด ไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายสตรีปดังสมการ 3.16

$$r_c = k_3 [CuR_2] [H^+]^2 - k_4 [Cu^{2+}] [RH]^2 \quad (3.16)$$

แต่ในงานวิจัยนี้ใช้วิทยาศาสตร์ละลายสตรีปที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 เท่ากันหมด ทำให้พจน์ที่ 1 ของสมการ 3.16 มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับพจน์ที่ 2 สมการ 3.16 จึงลดรูปเป็น

$$r_c = k_3 [CuR_2] [H^+]^2 \quad (5.2)$$

สมการ 5.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนมากขึ้น อัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายสตรีปจะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด จากนั้นสารสกัดที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายสตรีปกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวจะแพร่ผ่านวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกลับไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายป้อน เพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดง

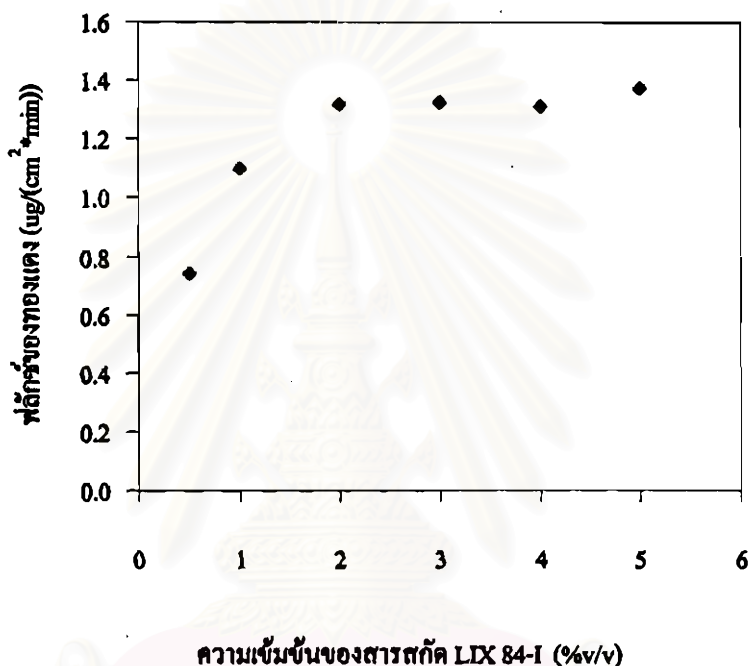
ในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนต่อไปทราบเท่าที่ยังมีผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์ละลายสตริปเป็นแรงขับของการถ่ายเทมวล

อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดต่อไป สัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัดจะมีค่าลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนที่เกิดในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนทองแดงกับสารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวมีค่าสูงขึ้นทำให้พจน์ที่ 2 ของสมการ 3.8 มีค่าสูงขึ้น อัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจึงเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลง และผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้อัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายสตริปเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลงเช่นกัน ดังนั้นค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลจึงเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลง

ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการเจือจางตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนทองแดง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมมูลมวลของผลการทดลองที่ได้ (ตาราง ก-13 ในภาคผนวก ก) จะพบว่าผลต่างระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่วิทยาศาสตร์ละลายสตริปมีค่าน้อย (อยู่ในช่วง -0.58% ถึง 1.42% เมื่อเทียบกับปริมาณไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนทั้งหมด) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่สารละลายสตริปคือปริมาณเดียวกันเพียงแต่พิจารณาจากคนละฝั่งของวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลว

จากผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเชื่อมแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I ดังรูปที่ 5.2 พบว่าโดยรวมค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเชื่อมแผ่นเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้น (ในการทดลองนี้ค่าฟลักซ์อยู่ในช่วง 0.74 ถึง 1.37 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์พอจะแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง กล่าวคือในช่วงที่สารสกัดมีความเข้มข้นน้อย

ละ 0.5 ถึงร้อยละ 2 โดยปริมาตร ค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วงประมาณ 0.22 ถึง 0.72 และในช่วงความเข้มข้นของสารสกัดจากร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความชันของกราฟจะลดลงจาก 0.22 เป็นอยู่ในช่วง -0.01 ถึง 0.06 ในช่วงความเข้มข้นนี้ค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก (ผลการคำนวณค่าความชันของกราฟแสดงไว้ในตาราง ก-19 ภาคผนวก ก)



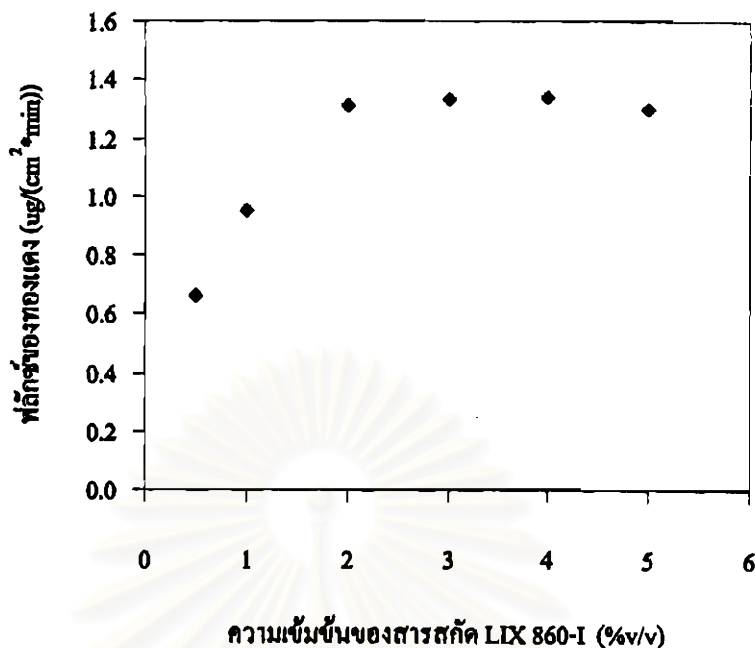
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเททกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด LIX84-I เมื่อ $[LIX84-I]_{\text{สารสกัด}} = 0.5\%, 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{สารละลาย}} = 100$ ppm, $V_{\text{สารละลาย}} = 10$ ลิตร, $Q_{\text{สารละลาย}} = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที, $[H_2SO_4]_{\text{สารละลาย}} = 0.1$ โมลต่อลิตร, $V_{\text{สารละลาย}} = 10$ ลิตร, $Q_{\text{สารละลาย}} = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที โดยป้อนวัตถุดิบสารละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวัตถุดิบสารละลายสกัดในฝั่งเปลือกและให้วัตถุดิบสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

ผลที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัตถุดิบสารละลายป้อนและสมการอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัตถุดิบสารละลายสกัดป้อนเช่นเดียวกับกรณีสารสกัด D2EHPA

ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการ
 เจือจางตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนทองแดง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ
 พิจารณาสมมูลมวลของผลการทดลองที่ได้ (ตาราง ก-13 ในภาคผนวก ก) จะพบว่าผลต่างระหว่าง
 ปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากอิเล็กโทรดสารถายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเท
 เข้าสู่อิเล็กโทรดสารถายสคริปมีค่าน้อย (อยู่ในช่วง -0.63% ถึง 1.95% เมื่อเทียบกับปริมาณไอออน
 ทองแดงในอิเล็กโทรดสารถายป้อนทั้งหมด) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออก
 จากอิเล็กโทรดสารถายป้อนและปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่สารถายสคริปคือปริมาณ
 เดียวกันเพียงแต่พิจารณาจากคนละฝั่งของอิเล็กโทรดเชื่อมแผ่นเหลว

จากผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดง
 ผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I ดังแสดงในรูป 5.3 พบว่าโดยรวม
 ค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสาร
 สกัดเพิ่มขึ้น (ในการทดลองนี้ค่าฟลักซ์อยู่ในช่วง 0.66 ถึง 1.30 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อ
 นาที แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์จะแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง กล่าวคือในช่วงที่สารสกัดมี
 ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 2 โดยปริมาตร ค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ของ
 ไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วงประมาณ
 0.36 ถึง 0.58 และในช่วงความเข้มข้นของสารสกัดจากร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความชัน
 ของกราฟจะลดลงจาก 0.36 เป็นอยู่ในช่วง -0.04 ถึง 0.02 ในช่วงความเข้มข้นนี้ค่าฟลักซ์ของการ
 ถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก (ผลการคำนวณค่าความชันของกราฟแสดงไว้ในตาราง ก-19 ภาค
 ผนวก ก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด LIX860-I เมื่อ $[LIX860-I]_{\text{membrane}} = 0.5\%, 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100$ ppm, $V_{\text{feed}} = 10$ ลิตร, $Q_{\text{feed}} = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที, $[H_2SO_4]_{\text{strip}} = 0.1$ โมลต่อลิตร, $V_{\text{strip}} = 10$ ลิตร, $Q_{\text{strip}} = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝั่งเปลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

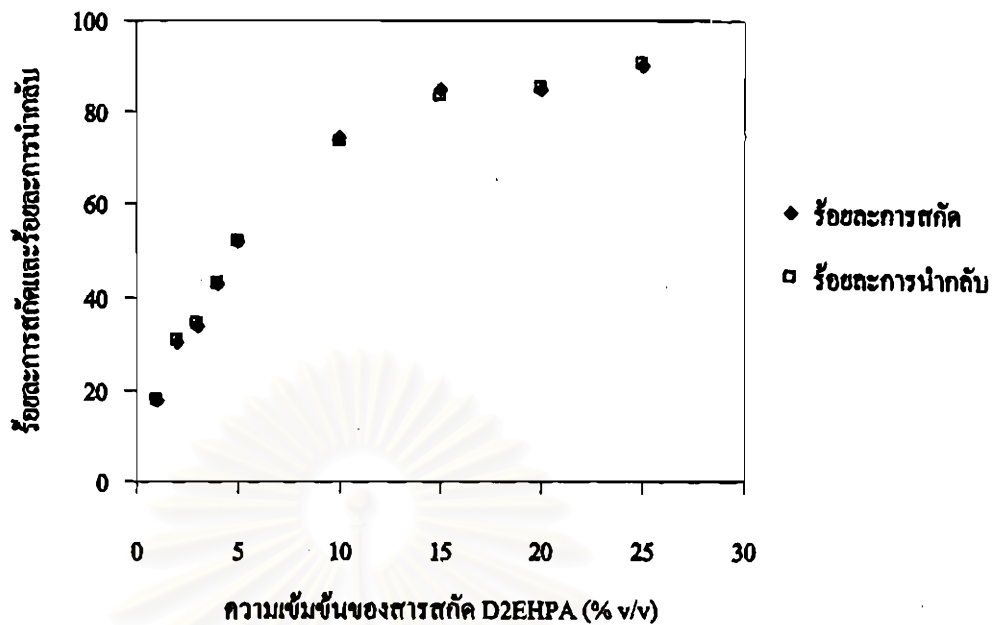
ผลที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนและสมการอัตราการเกิด ไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสตริปเช่นเดียวกับกรณีสารสกัด D2EHPA

ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการเจือจางตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนทองแดง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมมูลมวลของผลการทดลองที่ได้ (ตาราง ก-13 ในภาคผนวก ก) จะพบว่าผลต่างระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่วัฏภาคสารละลายสตริปมีค่าน้อย (อยู่ในช่วง -1.07% ถึง 1.08% เมื่อเทียบกับปริมาณไอออน

ทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนทั้งหมด) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออก จากวัฏภาคสารละลายป้อนและปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสารละลายสรีปคือปริมาณ เดียวกันเพียงแต่พิจารณาจากคนละฝั่งของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับกับความเข้มข้น ของสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลว ผลการทดลองที่ได้สำหรับกรณีสารสกัด D2EHPA, LIX84-I และ LIX860-I แสดงไว้ดังรูป 5.4, 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ (ผลการทดลองแสดงในตาราง ข-1 ในภาค ผนวก ข ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับแสดงในตาราง ค-2 ในภาค ผนวก ค)

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับกับ ความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA ในเยื่อแผ่นเหลวดังแสดงในรูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่า โดยภาพ รวมค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้น (ในการทดลองนี้ค่าร้อยละการสกัดจะอยู่ในช่วง 17.64 ถึง 89.96 และค่าร้อยละการนำกลับจะอยู่ในช่วง 17.80 ถึง 90.48) แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละ การสกัดและร้อยละการนำกลับพอจะแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ค่าสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงกับการ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วงประมาณ 9.01 ถึง 12.62 และค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับการ เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วง 8.83 ถึง 13.04 ใน ช่วงความเข้มข้นของสารสกัดจากร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 25 โดยปริมาตร ค่าสัดส่วนระหว่างการ เปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด อยู่ในช่วงประมาณ 0.98 ถึง 4.45 และค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการนำกลับกับ การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดอยู่ในช่วงประมาณ 1.05 ถึง 4.34 (ผลการคำนวณค่าความชัน ของกราฟแสดงในตาราง ค-20 ในภาคผนวก ค)



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA เมื่อ $[D2EHPA]_{\text{concentration}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%, 5\%, 10\%, 15\%, 20\%$ และ 25% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100 \text{ ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{\text{strip}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งทอให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝั่งเปลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

เนื่องจากค่าร้อยละการสกัดประมาณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดไปทั้งหมดจากวัฏภาคสารละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงทั้งหมดในวัฏภาคสารละลายป้อนก่อนทำการทดลอง ส่วนค่าร้อยละการนำกลับประมาณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่นำกลับได้ทั้งหมดในวัฏภาคสารละลายสตริปกับปริมาณไอออนทองแดงทั้งหมดในวัฏภาคสารละลายป้อนก่อนทำการทดลอง แต่ในการทดลองนี้ใช้เวลาเท่ากันและมีปริมาตรของระบบเท่ากัน ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นจึงอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนและสมการอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสตริปเช่นเดียวกับกรณีพิจารณาจากค่าฟลักซ์ กล่าวคือที่ความเข้มข้นของสารสกัดค่าต่ำ ๆ เมื่อไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมายังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อ

แผ่นเหล็ก ที่ผิวสัมผัสนี้ไอออนทองแดงจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออน โดยมีอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ดังสมการ 3.8

$$-r_c = k_1[Cu^{2+}][RH]^2 - k_2[CuR_2][H^+]^2 \quad (3.8)$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้วัฏภาคสารละลายป้อนที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 เท่ากันทั้งหมดทำให้พจน์ที่ 2 ของสมการ 3.8 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก สมการ 3.8 จึงลดรูปเป็น

$$-r_c = k_1[Cu^{2+}][RH]^2 \quad (5.1)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด [RH] อัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนจะมากขึ้น ไอออนทองแดงที่หายไปจากวัฏภาคสารละลายป้อนจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $[CuR_2]$ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเชื้อแผ่นเหล็กมากขึ้น จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจึงแพร่ผ่านวัฏภาคเชื้อแผ่นเหล็กไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเชื้อแผ่นเหล็กกับวัฏภาคสารละลายสตริป ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนได้ไอออนทองแดงและสารสกัด โดยมีอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสตริปดังสมการ 3.16

$$r_c = k_3[CuR_2][H^+]^2 - k_4[Cu^{2+}][RH]^2 \quad (3.16)$$

แต่ในงานวิจัยนี้ใช้วัฏภาคสารละลายสตริปที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 เท่ากันหมด ทำให้พจน์ที่ 1 ของสมการ 3.16 มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับพจน์ที่ 2 สมการ 3.16 จึงลดรูปเป็น

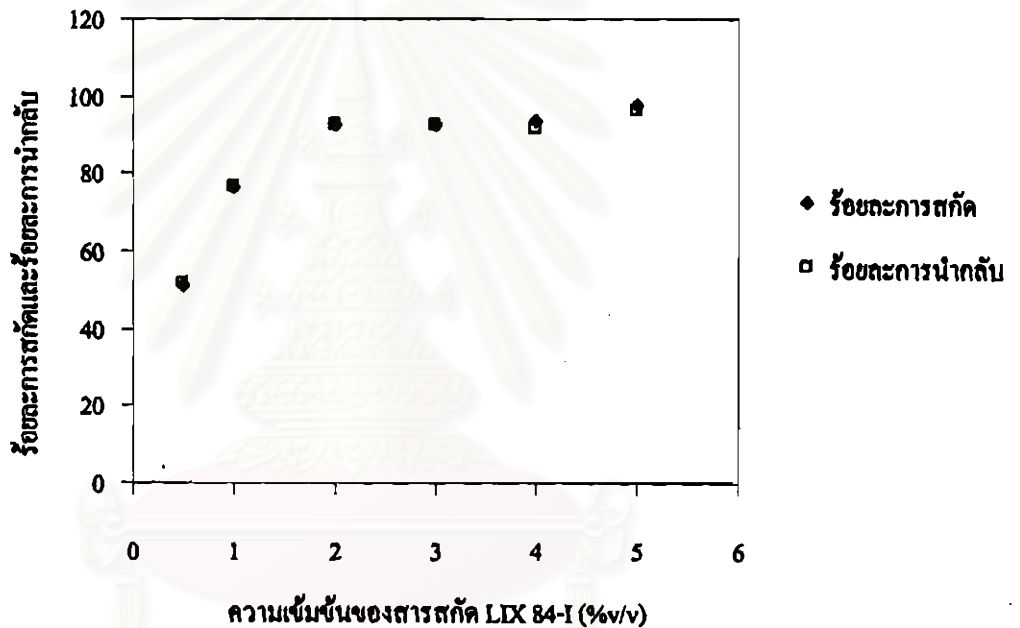
$$r_c = k_3[CuR_2][H^+]^2 \quad (5.2)$$

สมการ 5.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนมากขึ้น อัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าพลังของการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด จากนั้นสารสกัดที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์และเยื่อแผ่นเหลวจะแพร่ผ่านวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกลับไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายป้อน เพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนต่อไปตามเท่าที่ซึ่งมีผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวเป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวล

อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดต่อไป สัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัดจะมีค่าลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนที่เกิดในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างไอออนทองแดงกับสารสกัดที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงขึ้นทำให้พจน์ที่ 2 ของสมการ 3.8 มีค่าสูงขึ้น อัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจึงเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลง และผลที่เกิดขึ้นนี้ทำให้อัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลงเช่นกัน ดังนั้นค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับจึงเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ลดลง

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 84-I ในเยื่อแผ่นเหลวซึ่งแสดงในรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่า โดยภาพรวมค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้น (ในการทดลองนี้ค่าร้อยละการสกัดจะอยู่ในช่วง 51.30 ถึง 97.78 และค่าร้อยละการนำกลับจะอยู่ในช่วง 51.93 ถึง 96.04) แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับพอจะแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 2 โดยปริมาตร ค่าสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วงประมาณ 16.26 ถึง 50.28 และค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับการ

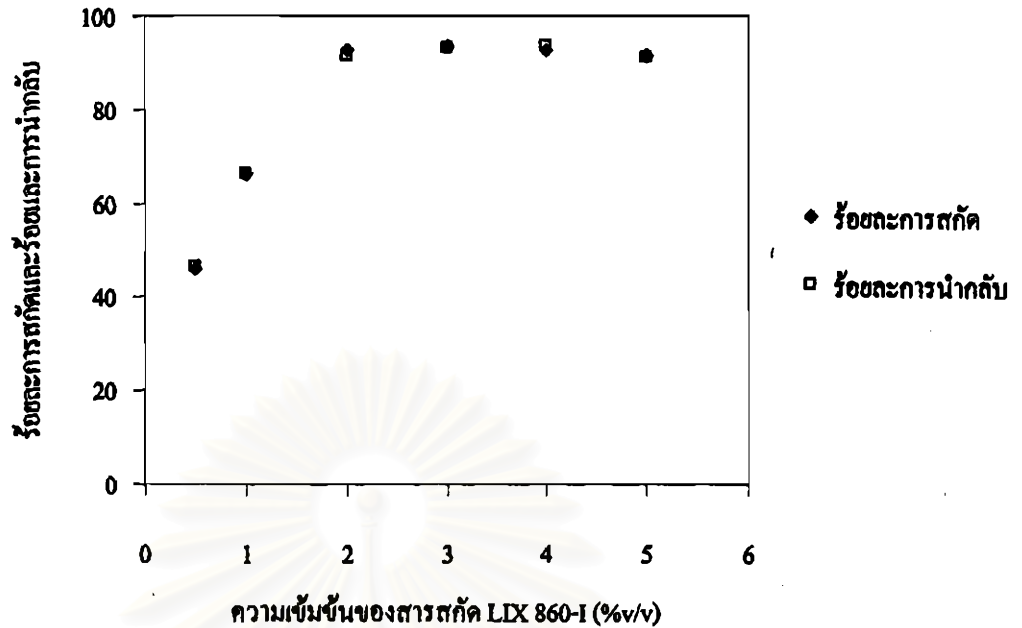
เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วง 15.76 ถึง 49.80 และในช่วงความเข้มข้นของสารสกัดจากร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 5 โดยปริมาตรค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด อยู่ในช่วงประมาณ -0.11 ถึง 4.25 และค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการนำกลับกับการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดอยู่ในช่วงประมาณ -1.14 ถึง 4.45 ในช่วงความเข้มข้นนี้ค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก (ผลการคำนวณค่าความชันของกราฟแสดงในตาราง ค-20 ในภาคผนวก ค)



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด LIX84-I เมื่อ $[LIX84-I]_{\text{สารสกัด}} = 0.5\%, 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{สารสกัด}} = 100 \text{ ppm}$, $V_{\text{สารสกัด}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{สารสกัด}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{\text{สารสกัด}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{สารสกัด}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{สารสกัด}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งทอให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝั่งเป็ลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

ผลที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนและสมการอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายศตริปเช่นเดียวกับกรณีสารสกัด D2EHPA

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับกับความเข้มข้นของสารสกัด LIX 860-I ในเยื่อแผ่นเหลวดังแสดงในรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่า โดยภาพรวมค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้น (ในการทดลองนี้ค่าร้อยละการสกัดจะอยู่ในช่วง 45.98 ถึง 93.62 และค่าร้อยละการนำกลับจะอยู่ในช่วง 46.50 ถึง 93.65) แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับจะพอแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ถึง ร้อยละ 2 โดยปริมาตร ค่าสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วงประมาณ 26.63 ถึง 40.22 และค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วง 25.47 ถึง 39.34 และในช่วงความเข้มข้นของสารสกัดจากร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 5 โดยปริมาตรค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารสกัด อยู่ในช่วงประมาณ -1.04 ถึง 0.90 และค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการนำกลับกับการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสกัดอยู่ในช่วงประมาณ -2.56 ถึง 1.52 ในช่วงความเข้มข้นนี้ค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก (ผลการคำนวณค่าความชันของกราฟแสดงในตาราง ค-20 ในภาคผนวก ค)



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด LIX860-I เมื่อ $[LIX860-I]_{\text{membrane}} = 0.5\%, 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100 \text{ ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{\text{strip}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวิทยาสารละลายป้อนในฝั่งทอให้ไหลสวนทางกับวิทยาสารละลายสตริปในฝั่งเป็ลือกและให้วิทยาสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

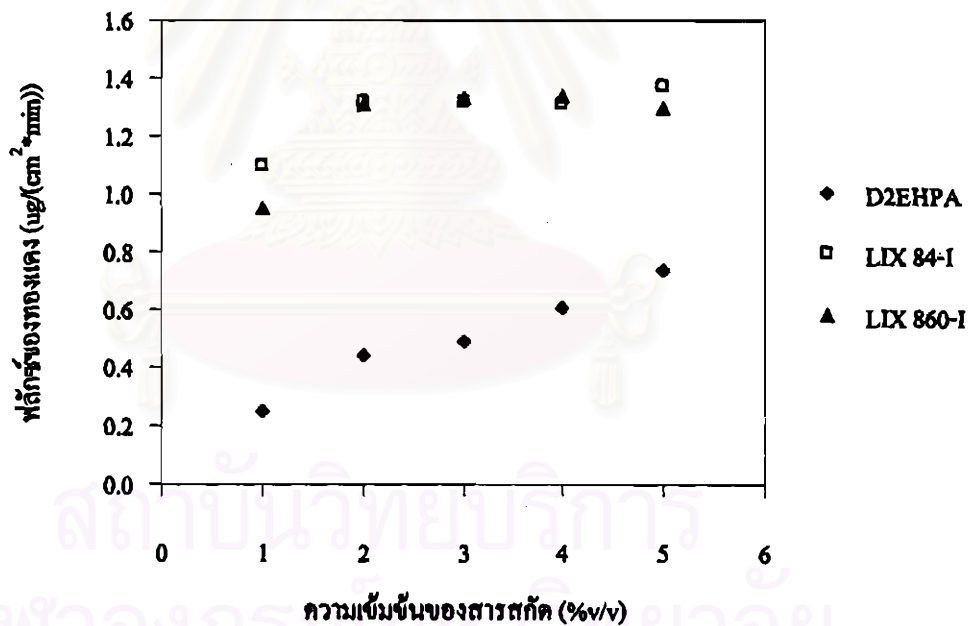
ผลที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวิทยาสารละลายป้อนและสมการอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาสารละลายสตริป เช่นเดียวกับกรณีสารสกัด D2EHPA

จากผลของความเข้มข้นของสารสกัดที่ได้ทำให้เราสามารถกำหนดความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมสำหรับการทดลองศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อการสกัดไอออนทองแดงได้ กล่าวคือใช้สารสกัด D2EHPA เข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร สารสกัด LIX84-I เข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร และสารสกัด LIX860-I เข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร

5. 2 ผลของชนิดของสารสกัดต่อการสกัดไอออนทองแดง

การทดลองดำเนินการโดยใช้สารสกัดหลายชนิด (LIX84-I, LIX 860-I และ D2EHPA) ที่ความเข้มข้นของสารสกัดต่าง ๆ ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในสารละลายป้อนคงที่ (ประมาณ 100 ppm) และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของสารสกัดสำหรับสารสกัดทั้ง 3 ชนิดถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 5.7 (ผลการทดลองแสดงในตาราง ข-2 ในภาคผนวก ข)



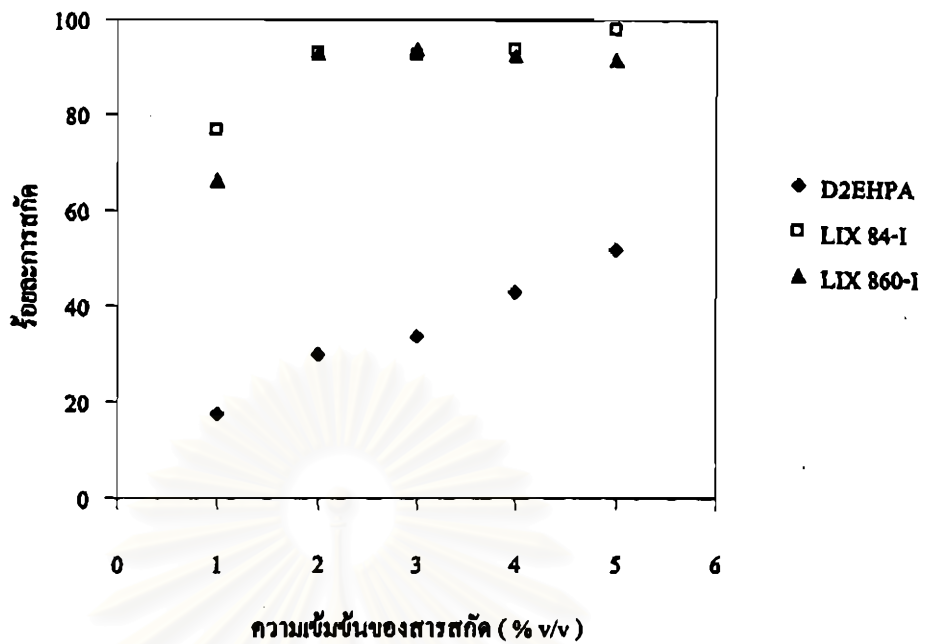
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด เมื่อ $[\text{extractant}]_{\text{feed}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[\text{Cu}^{2+}]_{\text{feed}} = 100 \text{ ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10$ ลิตร, $Q_{\text{feed}} = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_{\text{strip}} = 0.1$ โมลต่อลิตร, $V_{\text{strip}} = 10$ ลิตร, $Q_{\text{strip}} = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที โดยป้อนวฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งท่อกับให้ไหลสวนทางกับวฏภาคสารละลายสกัดในฝั่งเปลือกและให้วฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อพิจารณาในช่วงความเข้มข้นของสารสกัดเท่ากัน (ร้อยละ 1 ถึง 5) ค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลมีความสัมพันธ์อย่างมากกับชนิดของสารสกัด โดยสารสกัด LIX 84-I กับสารสกัด LIX 860-I มีค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงใกล้เคียงกันและมีค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงสูงกว่าสารสกัด D2EHPA กล่าวคือ สารสกัด LIX84-I มีค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 1.10 ถึง 1.37 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที สารสกัด LIX860-I มีค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 0.95 ถึง 1.34 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อ นาที และสารสกัด D2EHPA มีค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.74 ไมโครกรัมต่อ ตารางเซนติเมตรต่อนาที (ผลการคำนวณค่าฟลักซ์แสดงไว้ในตาราง ก-3 ในภาคผนวก ก)

ผลการทดลองที่ได้น่าจะเป็นเพราะสารสกัด LIX 84-I และ LIX 860-I เป็นสารสกัดที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงโดยเฉพาะ (Kordosky et al., 1987) ทำให้สารสกัดในกลุ่มนี้มีความสามารถถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ซึ่งสารสกัด D2EHPA เหมาะสมในการสกัดไอออนโลหะชนิดอื่นมากกว่าไอออนทองแดง (Tavlarides et al., 1987)

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นของสารสกัด ในเยื่อแผ่นเหลวของสารสกัดสำหรับสารสกัดทั้ง 3 ชนิดถูกแสดงไว้ในรูป 5.8 (ผลการทดลองแสดง ในตาราง ข-2 ในภาคผนวก ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



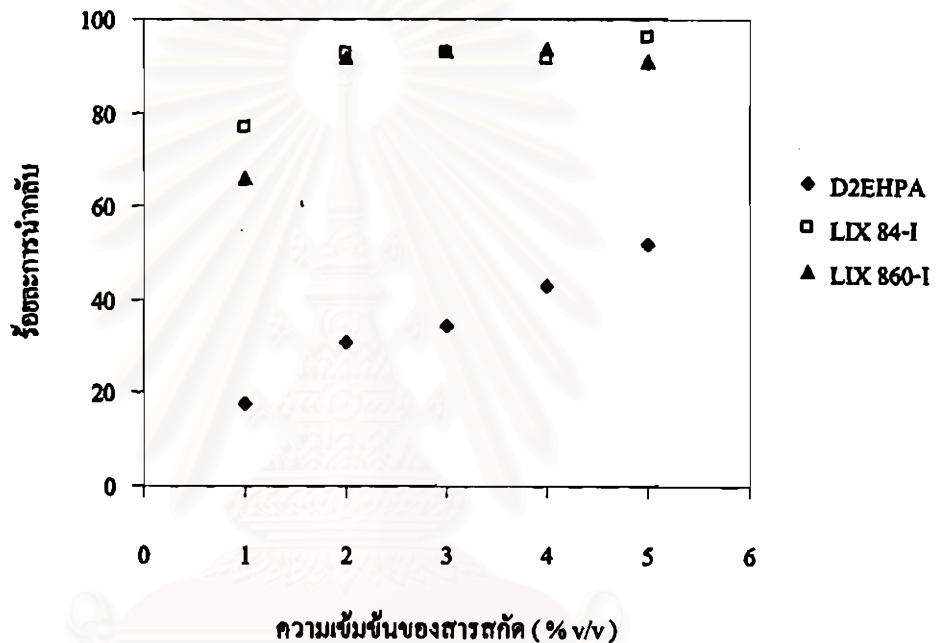
รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด เมื่อ $[\text{extractant}]_{\text{molar}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[\text{Cu}^{2+}]_{\text{feed}} = 100 \text{ ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_{\text{strip}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งท่อกำให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝั่งเปลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

จากรูปจะเห็นว่า สารสกัดในกลุ่ม LIX มีค่าร้อยละการสกัดสูงกว่าสารสกัด D2EHPA โดยที่สารสกัด LIX 84-I กับ สารสกัด LIX 860-I มีค่าร้อยละการสกัดสูงใกล้เคียงกัน กล่าวคือสารสกัด LIX 84-I มีค่าร้อยละการสกัดอยู่ในช่วง 76.44 ถึง 97.78 สารสกัด LIX 860-I มีค่าร้อยละการสกัดอยู่ในช่วง 66.09 ถึง 93.62 และสารสกัด D2EHPA มีค่าร้อยละการสกัดอยู่ในช่วง 17.64 ถึง 52.02 (ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดแสดงในตาราง ก-4 ในภาคผนวก ก)

ผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกับกรณีที่พิจารณาจากค่าฟลักซ์กล่าวคือสารสกัด LIX 84-I และ LIX 860-I เป็นสารสกัดที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงโดยเฉพาะ (Kordosky et al., 1987) ทำให้สารสกัดในกลุ่มนี้มีความสามารถถ่ายเทไอออนทองแดง

ผ่านเยื่อแผ่นเหลวได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ซึ่งสารสกัด D2EHPA เหมาะสมในการสกัดไอออนโลหะชนิดอื่นมากกว่าไอออนทองแดง (Tavlarides et al., 1987)

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการนำกลับกับความเข้มข้นของสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวของสารสกัดสำหรับสารสกัดทั้ง 3 ชนิดถูกแสดงไว้ในรูป 5.8 (ผลการทดลองแสดงในตาราง ข-2 ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด เมื่อ $[\text{extractant}]_{\text{membrane}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[\text{Cu}^{2+}]_{\text{feed}} = 100 \text{ ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_{\text{strip}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งทอให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสทริปในฝั่งเป็ลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

จากรูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นว่า สารสกัดในกลุ่ม LIX มีค่าร้อยละการนำกลับสูงกว่าสารสกัด D2EHPA โดยที่สารสกัด LIX 84-I กับ สารสกัด LIX 860-I มีค่าร้อยละการนำกลับสูงใกล้เคียงกัน กล่าวคือสารสกัด LIX 84-I มีค่าร้อยละการนำกลับอยู่ในช่วง 76.80 ถึง 96.04 สารสกัด LIX 860-I มีค่าร้อยละการนำกลับอยู่ในช่วง 66.17 ถึง 93.65 และสารสกัด D2EHPA มีค่าร้อยละการ

นำกลับอยู่ในช่วง 17.80 ถึง 51.78 (ผลการคำนวณค่าร้อยละการนำกลับแสดงในตาราง ก-4 ในภาคผนวก ก)

ผลการทดลองที่ได้สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกับกรณีที่พิจารณาจากค่าฟลักซ์กล่าวคือสารสกัด LIX 84-I และ LIX 860-I เป็นสารสกัดที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดง โดยเฉพาะ (Kordosky et al., 1987) ทำให้สารสกัดในกลุ่มนี้มีความสามารถถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวได้ดีกว่าสารสกัด D2EHPA ซึ่งสารสกัด D2EHPA เหมาะสมในการสกัดไอออนโลหะชนิดอื่นมากกว่าไอออนทองแดง (Tavlarides et al., 1987)

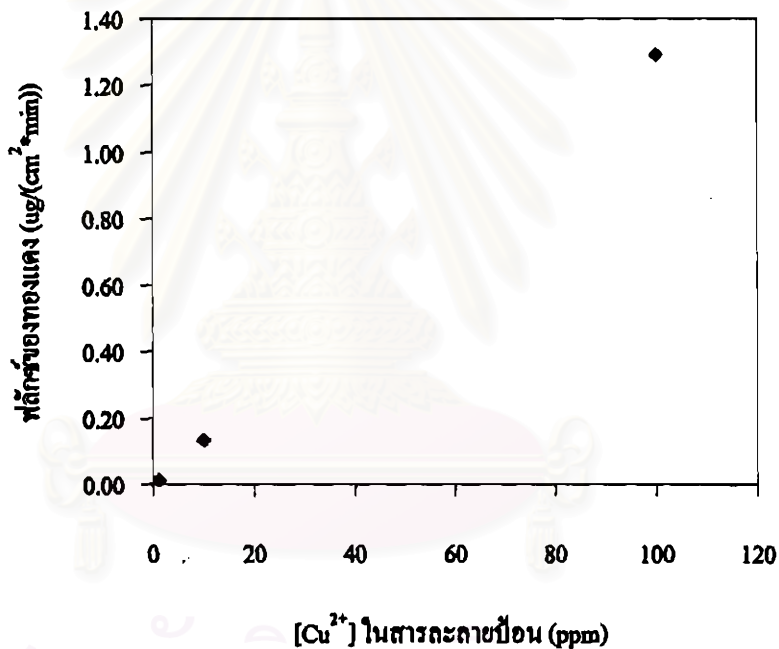
ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการเจือจางตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนทองแดง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมมูลมวลของผลการทดลองที่ได้ (ตาราง ก-14 ในภาคผนวก ก) จะพบว่าผลต่างระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่วัฏภาคสารละลายศตริปมีค่าน้อย (อยู่ในช่วง -1.07% ถึง 1.95% เมื่อเทียบกับปริมาณไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนทั้งหมด) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวัฏภาคสารละลายป้อนและปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่สารละลายศตริปคือปริมาณเดียวกันเพียงแต่พิจารณาจากคนละฝั่งของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

5.3 ผลของความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง

การทดลองดำเนินการโดยใช้ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนต่าง ๆ กัน (1 ppm, 10 ppm และ 100 ppm) โดยใช้สารสกัด D2EHPA เข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตร สารสกัด LIX84-I เข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร และสารสกัด LIX 860-I เข้มข้นร้อยละ 3 โดยปริมาตร ตามลำดับ และมีอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายศตริป 200 มิลลิลิตรต่อ นาทีเท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกับ

ค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากการทดลองสำหรับสารสกัด D2EHPA LIX84-I และ LIX 860-I แสดงไว้ดังรูปที่ 5.10, 5.11 และ 5.12 (ผลการทดลองแสดงไว้ในตาราง ข-3 ในภาคผนวก ข)

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกับค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากการทดลองสำหรับสารสกัด D2EHPA ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.10 (ผลการคำนวณค่าฟลักซ์แสดงไว้ในตาราง ค-5 ในภาคผนวก ค)



รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด D2EHPA เมื่อ $[D2EHPA]_{\text{membrane}} = 25\%$ โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 1 \text{ ppm}, 10 \text{ ppm}$ และ 100 ppm , $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{\text{strip}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งทอให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสทริปในฝั่งเป็ลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

จากผลการทดลองได้ดังรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจากความเข้มข้นประมาณ 1 ppm เป็น 10 ppm และ 100 ppm ค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงจะเพิ่มจาก 0.0136 เป็น 0.1349 และ 1.2916 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ

ผลที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน กล่าวคือที่ความเข้มข้นของสารสกัดค่าต่ำ ๆ เมื่อไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมายังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้ไอออนทองแดงจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออน โดยมีอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ดังสมการ 3.8

$$-r_c = k_1 [Cu^{2+}] [RH]^2 - k_2 [CuR_2] [H^+]^2 \quad (3.8)$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้วิทยาศาสตร์ละลายป้อนที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 เท่ากัน ทั้งหมดทำให้พจน์ที่ 2 ของสมการ 3.8 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก สมการ 3.8 จึงลดรูปเป็น

$$-r_c = k_1 [Cu^{2+}] [RH]^2 \quad (5.1)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด $[RH]$ อัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจะมากขึ้น ไอออนทองแดงที่หายไปจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $[CuR_2]$ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวมมากขึ้น จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจึงแพร่ผ่านวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายสตริป ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบ

เชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนได้ไอออนทองแดงและสารสกัดโดยมีอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายสตริปดังสมการ 3.16

$$r_c = k_3[CuR_2][H^+]^2 - k_4[Cu^{2+}][RH]^2 \quad (3.16)$$

แต่ในงานวิจัยนี้ใช้วิทยาศาสตร์ละลายสตริปที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 เท่ากันหมด ทำให้พจน์ที่ 1 ของสมการ 3.16 มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับพจน์ที่ 2 สมการ 3.16 จึงลดรูปเป็น

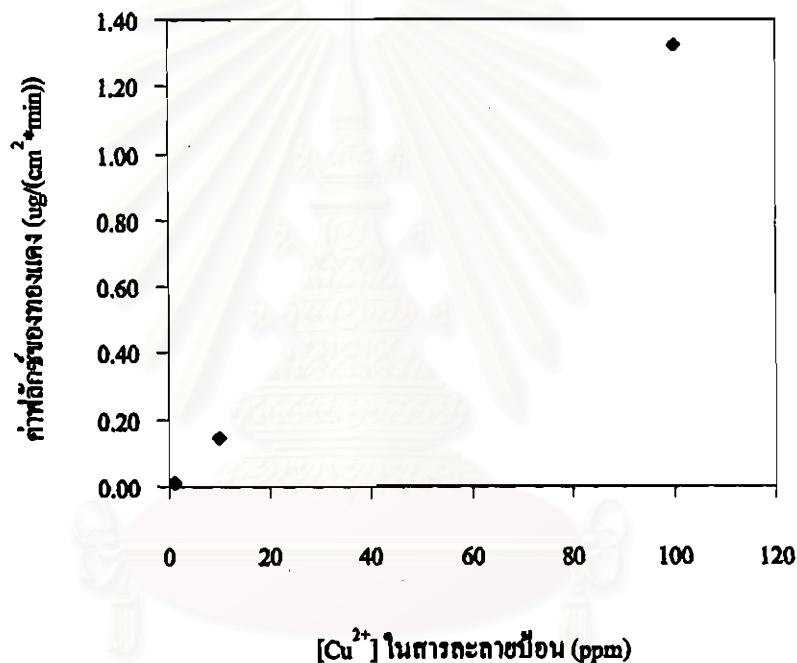
$$r_c = k_3[CuR_2][H^+]^2 \quad (5.2)$$

สมการ 5.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนมากขึ้น อัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายสตริปจะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด จากนั้นสารสกัดที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายสตริปกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวจะแพร่ผ่านวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกลับไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายป้อน เพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนต่อไปครบเท่าที่ยังมีผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์ละลายสตริปเป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวล

ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการเจือจางตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนทองแดง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมมูลมวลของผลการทดลองที่ได้ (ตาราง ก-15 ในภาคผนวก ก) จะพบว่าผลต่างระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่วิทยาศาสตร์ละลายสตริปมีค่าน้อย (อยู่ในช่วง -0.45% ถึง 4.36% เมื่อเทียบกับปริมาณไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนทั้งหมด) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออก

จากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสารละลายตรีปคือปริมาณเดียวกันเพียงแต่พิจารณาจากคนละฝั่งของวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากการทดลองสำหรับสารสกัด LIX84-I ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.11 (ผลการคำนวณค่าฟลักซ์แสดงไว้ในตาราง ก-5 ในภาคผนวก ก)



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I เมื่อ [LIX 84-I]_{สารสกัด} = 3% โดยปริมาตร, [Cu²⁺]_{ป้อน} = 1 ppm, 10 ppm และ 100 ppm, V_{ป้อน} = 10 ลิตร, Q_{ป้อน} = 200 มิลลิลิตรต่อนาที, [H₂SO₄]_{รับ} = 0.1 โมลต่อลิตร, V_{รับ} = 10 ลิตร, Q_{รับ} = 200 มิลลิลิตรต่อนาที โดยป้อนวิทยาศาสตร์ละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวิทยาศาสตร์ละลายตรีปในฝั่งเปลือกและให้วิทยาศาสตร์ละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

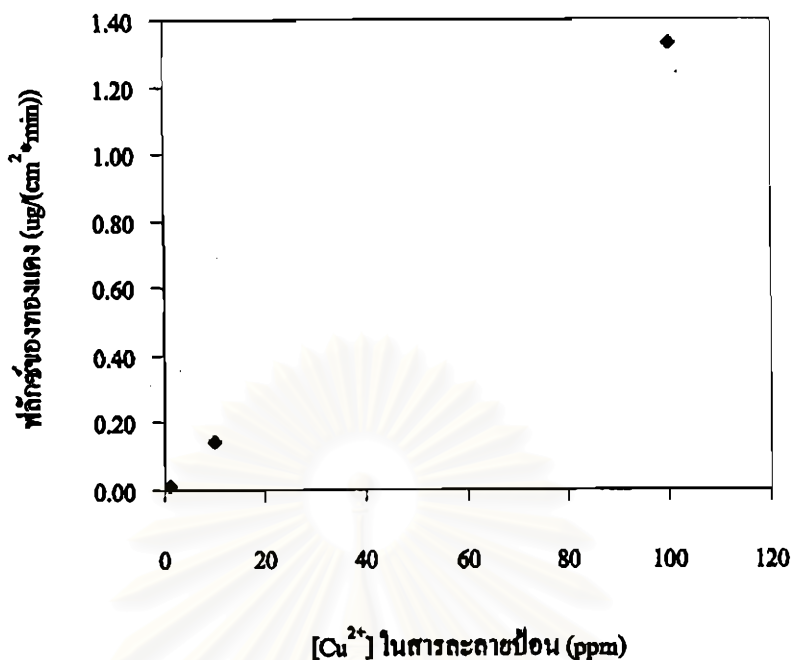
จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนโดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ

ไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจากความเข้มข้นประมาณ 1 ppm เป็น 10 ppm และ 100 ppm ค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงจะเพิ่มจาก 0.0139 เป็น 0.1428 และ 1.3247 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ

ผลที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและสมการอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายสตริปเช่นเดียวกับกรณีสารสกัด D2EHPA

ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการเจือจางตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนทองแดง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมมูลมวลของผลการทดลองที่ได้ (ตาราง ก-15 ในภาคผนวก ก) จะพบว่าผลต่างระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่วิทยาศาสตร์ละลายสตริปมีค่าน้อย (อยู่ในช่วง -0.14% ถึง 2.17% เมื่อเทียบกับปริมาณไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนทั้งหมด) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่สารละลายสตริปคือปริมาณเดียวกันเพียงแต่พิจารณาจากคนละฝั่งของวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ได้จากการทดลองสำหรับสารสกัด LIX 860-I ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.12 (ผลการคำนวณค่าฟลักซ์แสดงไว้ในตาราง ก-5 ในภาคผนวก ก)



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX860-I เมื่อ $[LIX\ 860-I]_{\text{membrane}} = 3\%$ โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 1\ \text{ppm}$, $10\ \text{ppm}$ และ $100\ \text{ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10\ \text{ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200\ \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{\text{strip}} = 0.1\ \text{โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10\ \text{ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200\ \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งทอให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสทริปในฝั่งเป็ลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

จากผลการทดลองที่ได้สำหรับกรณีสารสกัด LIX 860-I ดังแสดงในรูป 5.12 แสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนโดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนจากความเข้มข้นประมาณ $1\ \text{ppm}$ เป็น $10\ \text{ppm}$ และ $100\ \text{ppm}$ ค่าฟลักซ์ของไอออนทองแดงจะเพิ่มจาก 0.0128 เป็น 0.1423 และ 1.3309 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที ตามลำดับ

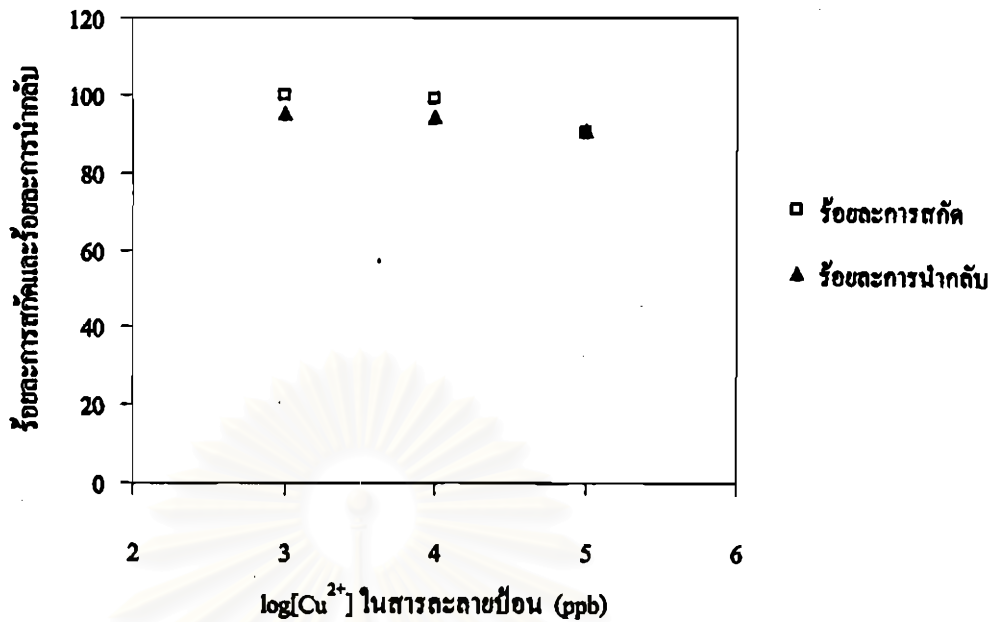
ผลที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนและสมการอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสทริปเช่นเดียวกับกรณีสารสกัด D2EHPA

ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการ
เจือจางตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนทองแดง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ
พิจารณาสมมูลมวลของผลการทดลองที่ได้ (ตาราง ก-15 ในภาคผนวก ก) จะพบว่าผลต่างระหว่าง
ปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวัสดุภาสารถายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเท
เข้าสู่วัสดุภาสารถายสตริปมีค่าน้อย (อยู่ในช่วง 0.04% ถึง 10.30% เมื่อเทียบกับปริมาณไอออน
ทองแดงในวัสดุภาสารถายป้อนทั้งหมด) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออก
จากวัสดุภาสารถายป้อนและปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่สารถายสตริปคือปริมาณ
เดียวกันเพียงแต่พิจารณาจากคนละฝั่งของวัสดุภาสารถายแผ่นเหลว

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับกับความเข้ม
ชั้นของไอออนทองแดงในวัสดุภาสารถายป้อนผลการทดลองที่ได้สำหรับสารสกัดแต่ละชนิด
สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.13, 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับ
กับความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัสดุภาสารถายป้อนสำหรับสารสกัด D2EHPA แสดงดัง
รูปที่ 5.13 (ผลการทดลองแสดงไว้ใน ตาราง ข-3)

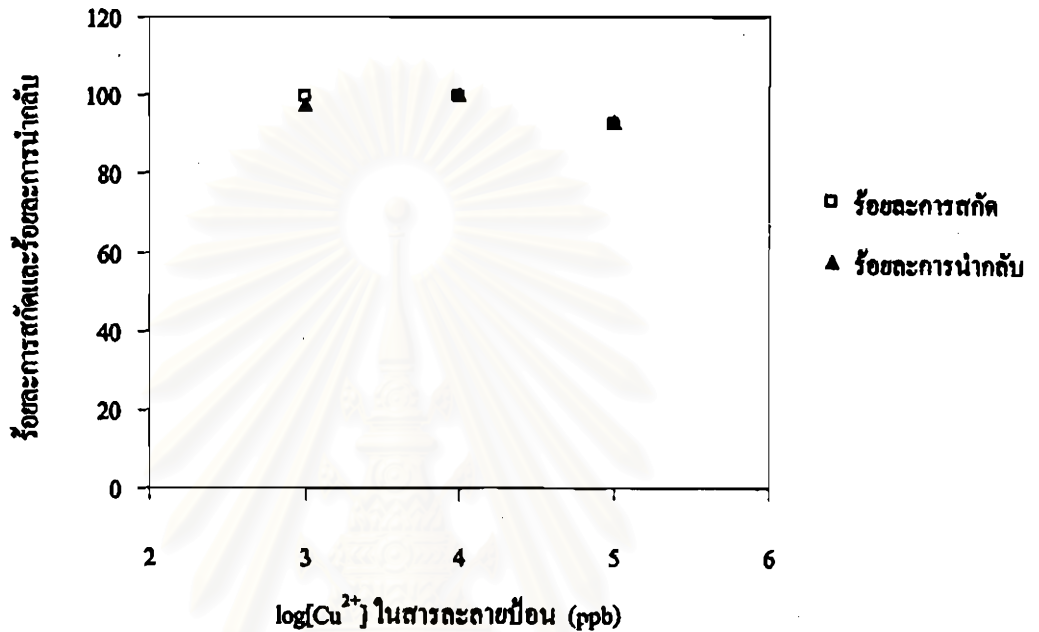
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด D2EHPA เมื่อ $[D2EHPA]_{membrane} = 25\%$ โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{feed} = 1 \text{ ppm}, 10 \text{ ppm}$ และ 100 ppm , $V_{feed} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{feed} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{strip} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{strip} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{strip} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งท่อกำให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝั่งเปลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนมีค่าน้อย ๆ ค่าร้อยละการสกัดจะสูง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงต่อไปจนถึงจุดหนึ่งค่าร้อยละการสกัดมีแนวโน้มลดลง กล่าวคือที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนมีค่า 1 ppm จะมีค่าร้อยละการสกัดเป็น 99.73 และมีค่าร้อยละการนำกลับเป็น 95.38 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนเป็น 10 ppm จะมีค่าร้อยละการสกัดเป็น 99.01 และมีค่าร้อยละการนำกลับเป็น 94.43 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนเป็น 100 ppm จะมีค่าร้อยละการสกัดเป็น 89.96 และมีค่าร้อยละการนำกลับเป็น 90.41 (ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับแสดงในตาราง ก-6 ในภาคผนวก ค)

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับกับความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนสำหรับสารสกัด LIX 84-I แสดงดังรูปที่ 5.14 (ผลการทดลองแสดงไว้ใน ตาราง ข-3)

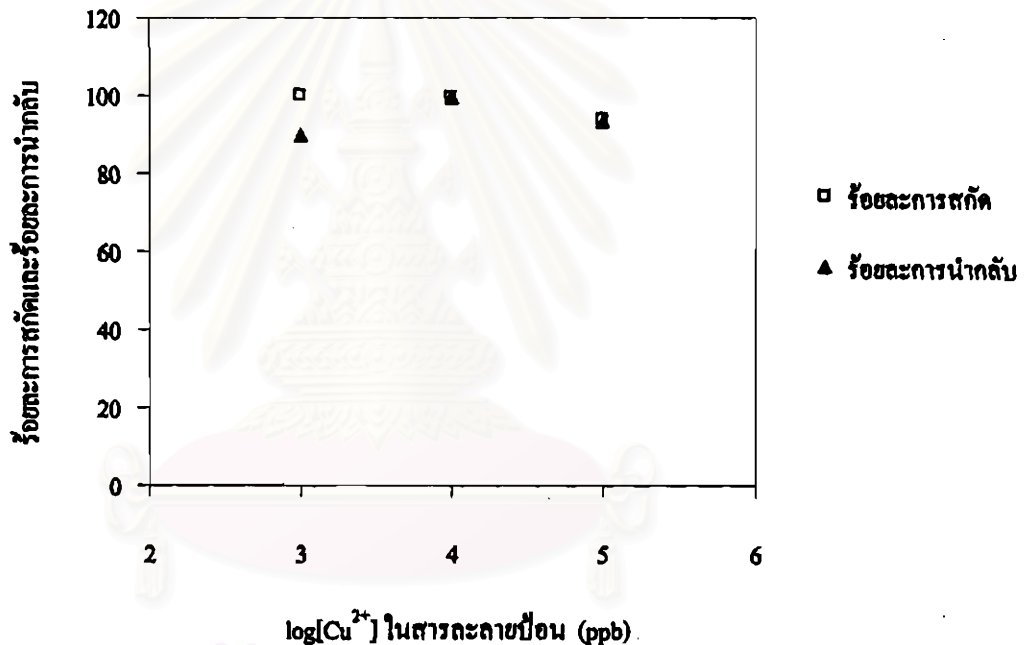


รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I เมื่อ $[\text{LIX 84-I}]_{\text{mobile}} = 3\%$ โดยปริมาตร, $[\text{Cu}^{2+}]_{\text{feed}} = 1 \text{ ppm}, 10 \text{ ppm}$ และ 100 ppm , $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_{\text{strip}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งทอให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสทริปในฝั่งเปลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

จากผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนมีค่าน้อย ๆ ค่าร้อยละการสกัดจะสูง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงต่อไปจนถึงจุดหนึ่งค่าร้อยละการสกัดมีแนวโน้มลดลง กล่าวคือที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนมีค่า 1 ppm จะมีค่าร้อยละการสกัดเป็น 99.80 และมีค่าร้อยละการนำกลับเป็น 97.63 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนเป็น 10 ppm จะมีค่าร้อยละการสกัดเป็น 99.70 และมีค่าร้อยละการนำกลับเป็น 99.94 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น

ชั้นของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนเป็น 100 ppm จะมีค่าร้อยละการสกัดเป็น 92.59 และมีค่าร้อยละการนำกลับเป็น 92.73 (ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ แสดงในตาราง ก-6 ในภาคผนวก ก)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับสำหรับสารสกัด LIX 860-I แสดงดังรูปที่ 5.15 (ผลการทดลองแสดงไว้ใน ตาราง ข-3)

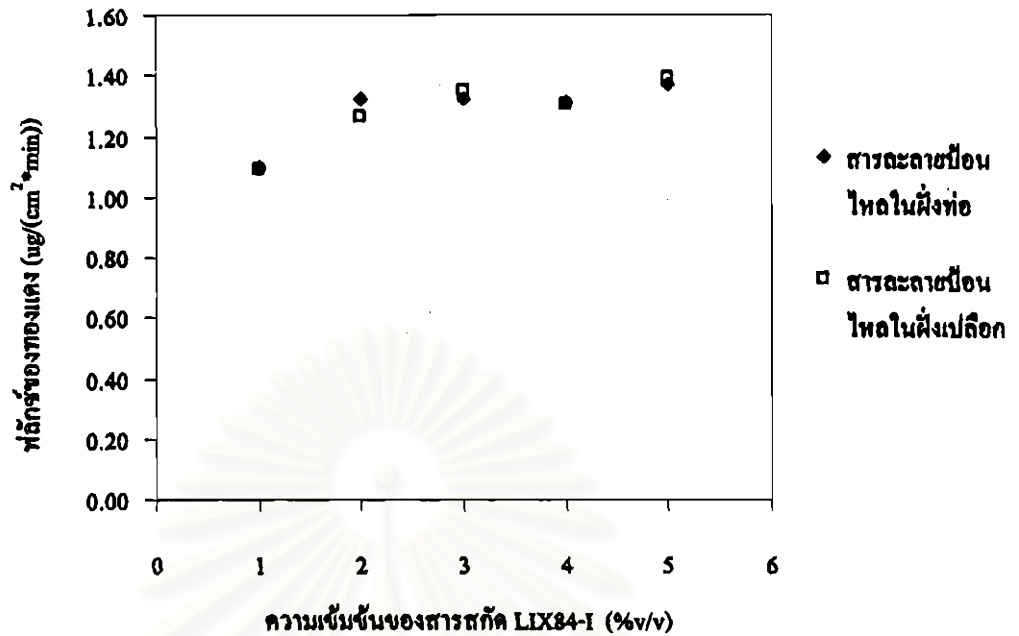


รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงกับค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX860-I เมื่อ $[\text{LIX 860-I}]_{\text{membrane}} = 3\%$ โดยปริมาตร, $[\text{Cu}^{2+}]_{\text{feed}} = 1 \text{ ppm}, 10 \text{ ppm}$ และ 100 ppm , $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_{\text{strip}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวิทยาศาสตร์ละลายป้อนในฝั่งท่อกับให้ไหลสวนทางกับวิทยาศาสตร์ละลายstripperในฝั่งเปลือกและให้วิทยาศาสตร์ละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

จากผลการทดลองที่ดังรูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนมีค่าน้อย ๆ ค่าร้อยละการสกัดจะสูงแต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงต่อไปจนถึงจุดหนึ่งค่าร้อยละการสกัดจะมีแนวโน้มลดลง กล่าวคือที่ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนมีค่า 1 ppm จะมีค่าร้อยละการสกัดเป็น 99.88 และมีค่าร้อยละการนำกลับเป็น 89.58 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนเป็น 10 ppm จะมีค่าร้อยละการสกัดเป็น 99.65 และมีค่าร้อยละการนำกลับเป็น 99.61 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนเป็น 100 ppm จะมีค่าร้อยละการสกัดเป็น 93.62 และมีค่าร้อยละการนำกลับเป็น 93.16 (ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับแสดงในตาราง ก-6 ในภาคผนวก ก)

5.4 ผลของรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนทองแดง

การทดลองในส่วนนี้ดำเนินการโดยให้สารละลายป้อนไหลในฝั่งท่อ (tube side) และสารละลายสตรีปไหลในฝั่งเปลือก (shell side) ของโมดูลเส้นใยกลวง ทำการทดลองโดยใช้สารสกัด LIX84-I ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยปริมาตร ตามลำดับ โดยใช้สารละลายป้อนที่มีความเข้มข้นเท่ากัน (ประมาณ 100 ppm) และมีอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีป 200 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของสารสกัดในกรณีป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งเปลือกและป้อนวัฏภาคสารละลายสตรีปในฝั่งท่อเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในกรณีป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งท่อและป้อนวัฏภาคสารละลายสตรีปในฝั่งเปลือก (จากหัวข้อ 5.2 ที่แสดงผลไว้ในรูป 5.7) ถูกแสดงไว้ในรูป 5.16 (ผลการทดลองแสดงไว้ในตาราง ข-4)



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของสารสกัดและรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I เมื่อ $[LIX\ 84-I]_{\text{membrane}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100\text{ ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10\text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200\text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{\text{strip}} = 0.1\text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10\text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200\text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวิทยาศาสตร์ละลายป้อนในฝั่งเปลือกให้ไหลสวนทางกับวิทยาศาสตร์สตริปในฝั่งท่อและป้อนวิทยาศาสตร์ละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวิทยาศาสตร์สตริปในฝั่งเปลือก และให้วิทยาศาสตร์ละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่านในทั้ง 2 กรณี

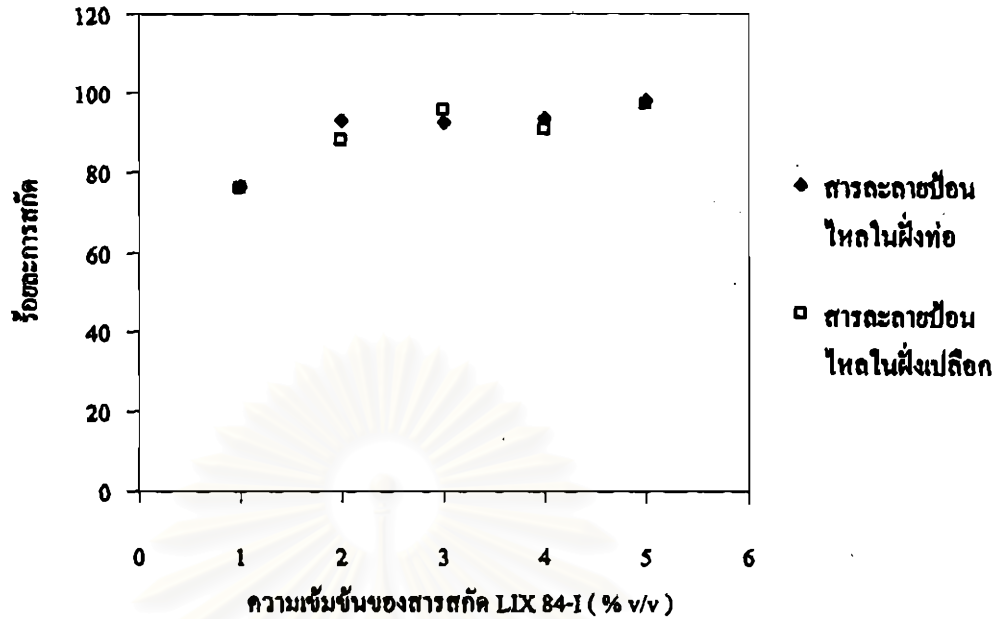
ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบของการไหลของสารละลายป้อนใน 2 ลักษณะนี้ไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทมวล กล่าวคือสำหรับการทดลองที่ป้อนวิทยาศาสตร์ละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวิทยาศาสตร์สตริปในฝั่งเปลือกจะมีค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 1.10 ถึง 1.37 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที แต่เมื่อป้อนวิทยาศาสตร์ละลายป้อนในฝั่งเปลือกให้ไหลสวนทางกับวิทยาศาสตร์สตริปในฝั่งท่อจะมีค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 1.09 ถึง 1.39 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาทีและแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดก็มีลักษณะใกล้เคียงกัน (ผลการคำนวณค่าฟลักซ์แสดงในตาราง ก-7 ในภาคผนวก ก)

ผลที่เกิดขึ้นอาจเพราะว่าพื้นที่ผิวของการถ่ายเทมวลทางด้านท่อและด้านเปลือกของเส้นใย
กลวงมีขนาดเท่า ๆ กัน

ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการ
เจือจางตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนทองแดง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ
พิจารณาสมมูลมวลของผลการทดลองที่ได้ (ตาราง ก-16 ในภาคผนวก ก) จะพบว่าผลต่างระหว่าง
ปริมาณ ไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวัสดุภาสารถายป้อนกับปริมาณ ไอออนทองแดงที่ถ่ายเท
เข้าสู่วัสดุภาสารถายสดริปมีค่าน้อย (อยู่ในช่วง -0.61% ถึง 1.95% เมื่อเทียบกับปริมาณ ไอออน
ทองแดงในวัสดุภาสารถายป้อนทั้งหมด) แสดงให้เห็นว่าปริมาณ ไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออก
จากวัสดุภาสารถายป้อนและปริมาณ ไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่สารถายสดริปคือปริมาณ
เดียวกันเพียงแต่พิจารณาจากคนละฝั่งของวัสดุภาสารถายเยื่อแผ่นเหลว

สำหรับผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดกับความเข้มข้นของ
สารสกัดในสองกรณีนี้ที่ได้จากการทดลองได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

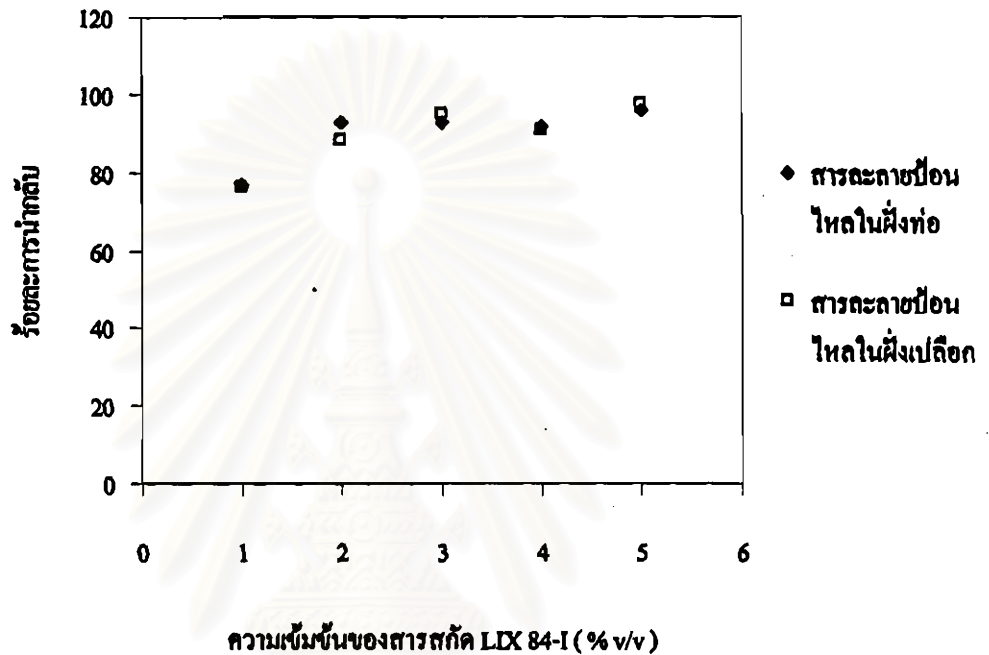


รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดไอออนทองแดงกับความเข้มข้นของสารสกัดและรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I เมื่อ $[LIX\ 84-I]_{\text{membrane}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100\ \text{ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10\ \text{ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200\ \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{\text{strip}} = 0.1\ \text{โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10\ \text{ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200\ \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝิ่งเปลือกให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝิ่งท่อกับป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝิ่งท่อให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝิ่งเปลือก และให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่านในทั้ง 2 กรณี

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบของการไหลของสารละลายป้อนใน 2 ลักษณะนี้ไม่มีผลต่อค่าร้อยละการสกัด กล่าวคือสำหรับการทดลองที่ป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝิ่งท่อให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝิ่งเปลือกจะมีค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 76.44 ถึง 97.78 แต่เมื่อป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝิ่งเปลือกให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝิ่งท่อก็จะมีค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 75.58 ถึง 96.76 (ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดแสดงไว้ในตาราง ค-8 ภาคผนวก ค)

ผลที่เกิดขึ้นอาจเป็นเพราะว่าพื้นที่ผิวของการถ่ายเทมวลทางด้านท่อและด้านเปลือกของเส้นใยกลวงมีขนาดเท่า ๆ กัน

สำหรับผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการนำกลับกับความเข้มข้นของสารสกัดในสองกรณีนี้ที่ได้จากการทดลองดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการนำกลับไอออนทองแดงกับความเข้มข้นของสารสกัดและรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนกรณีใช้สารสกัด LIX 84-I เมื่อ $[LIX\ 84-I]_{\text{สารสกัด}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100\ \text{ppm}$, $V_{\text{feed}} = 10\ \text{ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200\ \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[H_2SO_4]_{\text{strip}} = 0.1\ \text{โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10\ \text{ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200\ \text{มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งเปลือกให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝั่งท่อกับป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝั่งเปลือก และให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่านในทั้ง 2 กรณี

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบของการไหลของสารละลายป้อนใน 2 ลักษณะนี้ไม่มีผลต่อค่าร้อยละการนำกลับ กล่าวคือสำหรับการทดลองที่ป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตริปในฝั่งเปลือกจะมีค่าร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 76.80 ถึง 96.04 แต่เมื่อป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งเปลือกให้ไหลสวนทางกับวัฏภาค

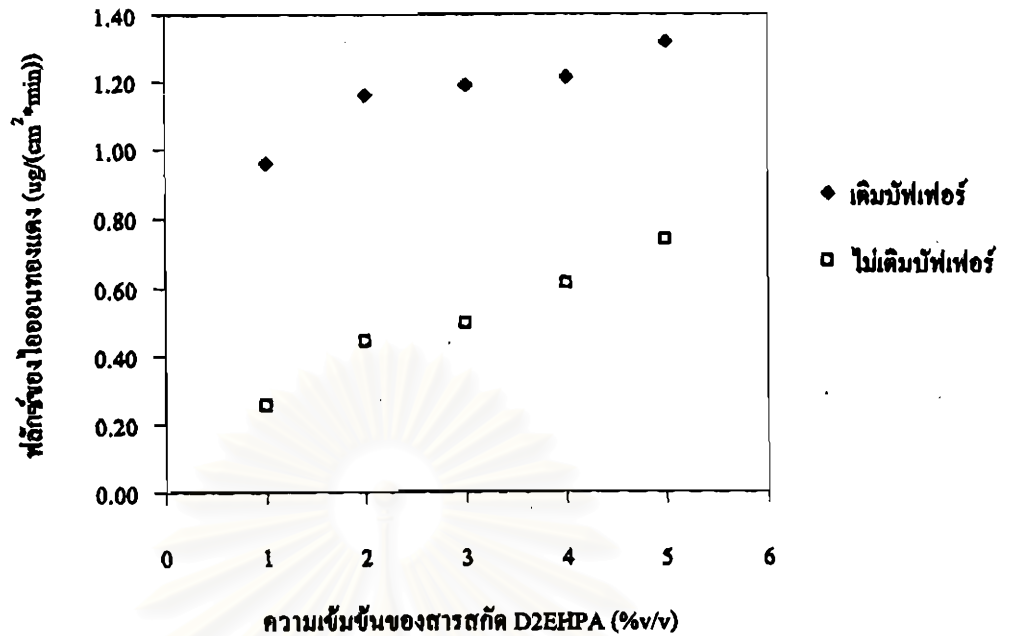
สารละลายสตริปในฝัगत่องจะมีค่าร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 76.19 ถึง 97.26 (ผลการคำนวณค่าร้อยละการนำกลับแสดงไว้ในตาราง ก-8 ภาคผนวก ก)

ผลที่เกิดขึ้นอาจเป็นเพราะว่าพื้นที่ผิวของการถ่ายเทมวลทางด้านท่อและด้านเปิดอกของเส้นใยกลางมีขนาดเท่า ๆ กัน

5.5 ผลของการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ต่อการสกัดไอออนทองแดง

การทดลองดำเนินการโดยใช้สารสกัด D2EHPA เข้มข้นร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยปริมาตร ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนที่ใช้คงที่เท่ากัน (100 ppm) และให้มีสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตริปคงที่ที่ประมาณ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองที่ได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.19, 5.20 และ 5.21 ตามลำดับ (ผลการทดลองแสดงไว้ในตาราง ข-5 ในภาคผนวก ข)

ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัดดังรูปที่ 5.19 นี้ให้เห็นว่าการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน มีผลช่วยให้ไอออนทองแดงถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวได้ดีขึ้น กล่าวคือ สำหรับการทดลองที่วัฏภาคสารละลายป้อนไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์จะมีค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.74 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที แต่เมื่อเตรียมวัฏภาคสารละลายป้อนให้มีสารละลายบัฟเฟอร์ด้วยจะมีค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 0.96 ถึง 1.32 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที (ผลการคำนวณแสดงไว้ในตาราง ก-9 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กรณีเติมสารละลายบัฟเฟอร์และไม่เติมสารละลายบัฟเฟอร์ในวัฏภาคสารละลายป้อน เมื่อ $[D2EHPA]_{\text{feed}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100 \text{ ppm}$, $[\text{buffer}]_{\text{feed}} = 5\%$ โดยปริมาตร, $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_{\text{strip}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{strip}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{strip}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งทอให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสทริปในฝั่งเพลตอกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

ผลที่เกิดขึ้นอาจอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อน กล่าวคือที่ความเข้มข้นของสารสกัดค่าต่ำ ๆ เมื่อไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมายังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้ไอออนทองแดงจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและไฮโดรเนียมไอออน โดยมีอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในสารละลายป้อน ดังสมการ 3.8

$$-r_c = k_1 [Cu^{2+}] [RH]^2 - k_2 [CuR_2] [H^+]^2 \quad (3.8)$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้วิทยาศาสตร์ละลายป้อนที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5 เท่ากัน ทั้งหมดทำให้พจน์ที่ 2 ของสมการ 3.8 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก สมการ 3.8 จึงลดรูปเป็น

$$-r_c = k_1 [Cu^{2+}] [RH]^2 \quad (5.1)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด [RH] อัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจะมากขึ้น ไอออนทองแดงที่หายไปจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $[CuR_2]$ ที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวมมากขึ้น จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจึงแพร่ผ่านวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายสตรีป ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนได้ไอออนทองแดงและสารสกัด โดยมีอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายสตรีปดังสมการ 3.16

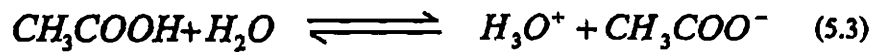
$$r_c = k_1 [CuR_2] [H^+]^2 - k_2 [Cu^{2+}] [RH]^2 \quad (3.16)$$

แต่ในงานวิจัยนี้ใช้วิทยาศาสตร์ละลายสตรีปที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 เท่ากันหมด ทำให้พจน์ที่ 1 ของสมการ 3.16 มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับพจน์ที่ 2 สมการ 3.16 จึงลดรูปเป็น

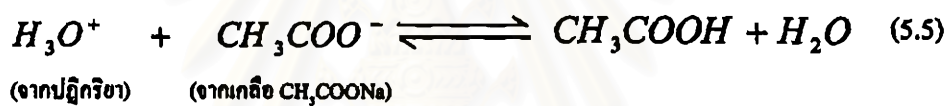
$$r_c = k_1 [CuR_2] [H^+]^2 \quad (5.2)$$

สมการ 5.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนมากขึ้น อัตราการเกิดไอออนทองแดงในวิทยาศาสตร์ละลายสตรีปจะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าพลังขับเคลื่อนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด จากนั้นสารสกัดที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายสตรีปกับวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวจะแพร่ผ่านวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวลกลับไปยังผิวสัมผัสระหว่างวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายป้อน เพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดง

ในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนต่อไปทราบเท่าที่ซึ่งมีผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนระหว่างวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์ละลายสตริปเป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวล ถ้าวิทยาศาสตร์ละลายป้อนมีสารละลายบัฟเฟอร์ละลายอยู่สารละลายบัฟเฟอร์จะแตกตัวดังปฏิกิริยา



เมื่อเกิดไฮโดรเนียมไอออนขึ้นที่วิทยาศาสตร์ละลายป้อนไฮโดรเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับ CH_3COO^- ที่มาจากการแตกตัวของเกลือ CH_3COONa ดังปฏิกิริยา

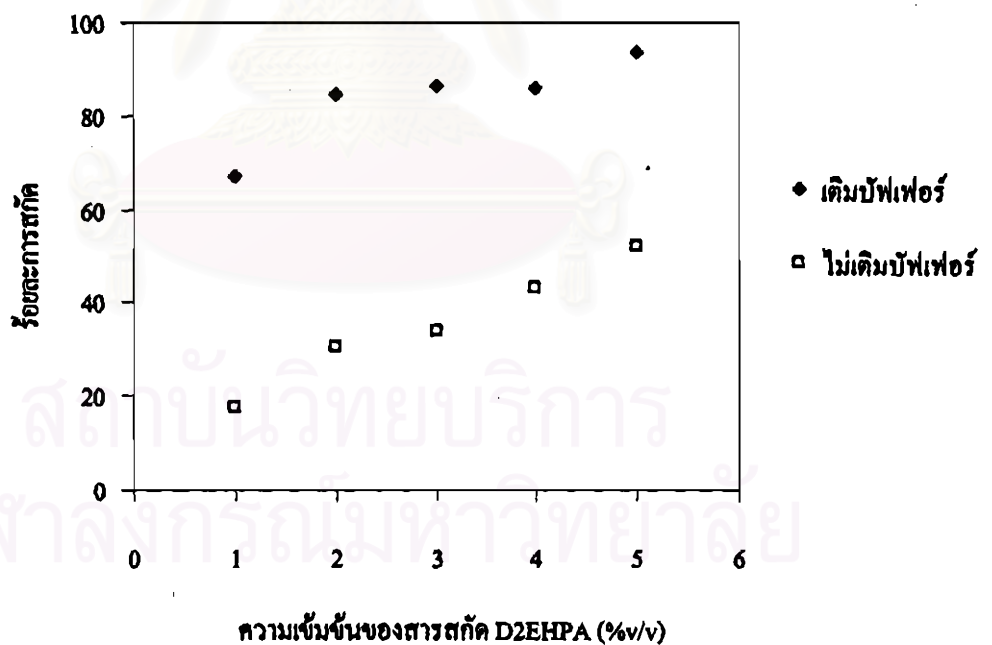


ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของวิทยาศาสตร์ละลายป้อนมีการเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ดังนั้นดังนั้นการที่วิทยาศาสตร์ละลายป้อนมีสารละลายบัฟเฟอร์ละลายอยู่จะช่วยรักษาให้ความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปน้อย เมื่อเกิดการถ่ายเทมวลแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลจึงลดลงน้อยกว่ากรณีที่วิทยาศาสตร์ละลายป้อนไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์ละลายอยู่ ไฮโดรเนียมไอออนจึงสามารถถ่ายเทจากวิทยาศาสตร์ละลายสตริปถ่ายเทมายังวิทยาศาสตร์ละลายป้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไอออนทองแดงสามารถถ่ายเทไปยังวิทยาศาสตร์ละลายสตริปได้มากขึ้น

ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างและการเจือจางตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอออนทองแดง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมมูลมวลของผลการทดลองที่ได้ (ตาราง ก-17 ในภาคผนวก ก) จะพบว่าผลต่างระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเท

เข้าสู่ภูมิภาคสารละลายตรีปมีค่าน้อย (อยู่ในช่วง -0.58% ถึง 3.16% เมื่อเทียบกับปริมาณไอออนทองแดงในภูมิภาคสารละลายป้อนทั้งหมด) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากภูมิภาคสารละลายป้อนและปริมาณไอออนทองแดงที่ถ่ายเทเข้าสู่สารละลายตรีปคือปริมาณเดียวกันเพียงแต่พิจารณาจากคนละฝั่งของภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว

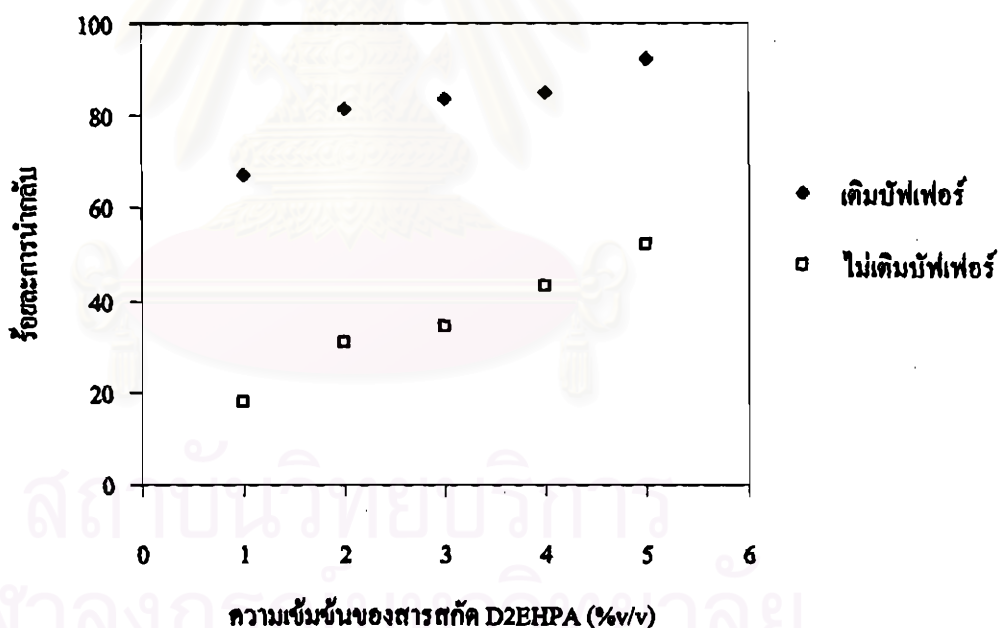
ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดกับค่าความเข้มข้นของสารสกัดดังแสดงในรูป 5.20 ซึ่งให้เห็นว่าการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อน มีผลช่วยให้ไอออนทองแดงถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวได้ดีขึ้น กล่าวคือสำหรับการทดลองที่ภูมิภาคสารละลายป้อนไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์จะมีค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 17.64 ถึง 52.02 แต่เมื่อเตรียมภูมิภาคสารละลายป้อนให้มีสารละลายบัฟเฟอร์ด้วยจะมีค่าร้อยละการสกัดของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 66.90 ถึง 93.69 (ผลการคำนวณค่าร้อยละการสกัดแสดงไว้ในตาราง ก-10 ภาคผนวก ก)



รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กรณีเติมสารละลายบัฟเฟอร์และไม่เติมสารละลายบัฟเฟอร์ในภูมิภาคสารละลายป้อน เมื่อ $[D2EHPA]_{\text{membrane}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100 \text{ ppm}$, $[\text{buffer}]_{\text{feed}} = 5\%$ โดยปริมาตร, $V_{\text{feed}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{feed}} = 200$

มิลลิลิตรต่อนาที, $[H_2SO_4]_{\text{sup}} = 0.1$ โมลต่อลิตร, $V_{\text{sup}} = 10$ ลิตร, $Q_{\text{sup}} = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที โดยป้อนวัฏภาคสารละลายป้อนในฝั่งท่อกับให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตรีปในฝั่งเปลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

ส่วนผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการนำกลับกับค่าความเข้มข้นของสารสกัดดังแสดงในรูป 5.21 ซึ่งให้เห็นว่าการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายป้อนมีผลช่วยให้ไอออนทองแดงถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวได้ดีขึ้น กล่าวคือสำหรับการทดลองที่วัฏภาคสารละลายป้อนไม่มีสารละลายบัฟเฟอร์จะมีค่าร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 17.80 ถึง 51.78 แต่เมื่อเตรียมวัฏภาคสารละลายป้อนให้มีสารละลายบัฟเฟอร์ด้วยจะมีค่าร้อยละการนำกลับของไอออนทองแดงอยู่ในช่วง 67.23 ถึง 92.19 (ผลการคำนวณค่าร้อยละการนำกลับแสดงไว้ในตาราง ก-10 ภาคผนวก ก)



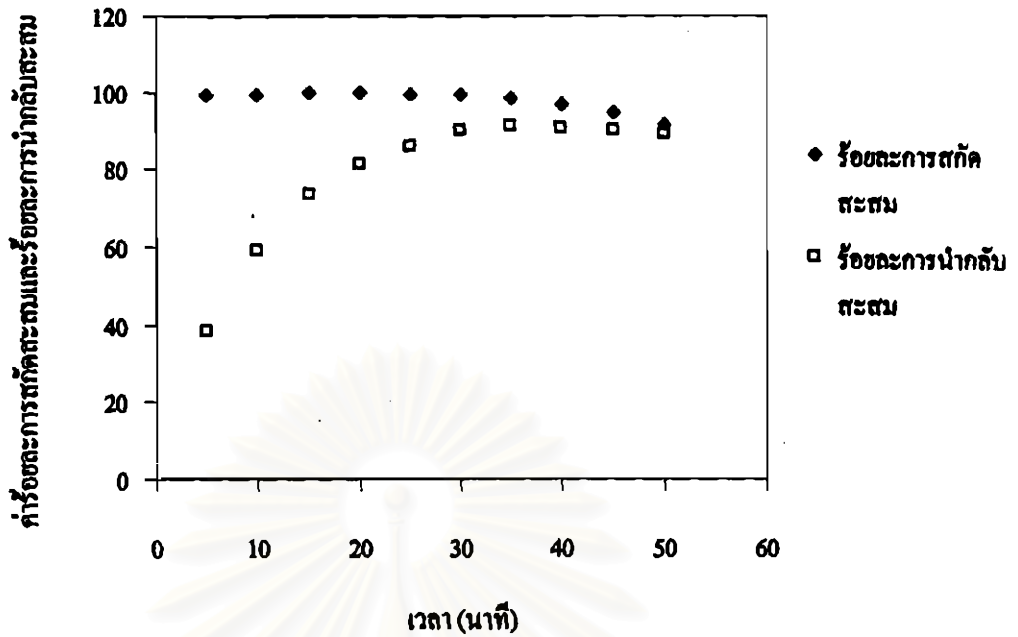
รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการนำกลับกับค่าความเข้มข้นของสารสกัด D2EHPA กรณีเติมสารละลายบัฟเฟอร์และไม่เติมสารละลายบัฟเฟอร์ในวัฏภาคสารละลายป้อน เมื่อ $[D2EHPA]_{\text{membrane}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{feed}} = 100$ ppm, $[\text{buffer}]_{\text{feed}} = 5\%$ โดยปริมาตร, $V_{\text{feed}} = 10$ ลิตร, $Q_{\text{feed}} = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที, $[H_2SO_4]_{\text{sup}} = 0.1$ โมลต่อลิตร, $V_{\text{sup}} = 10$ ลิตร, $Q_{\text{sup}} = 200$ มิลลิลิตรต่อนาที โดยป้อนวัฏภาค

สารละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวัฏภาคสารละลายสตรีปในฝั่งเปลือกและให้วัฏภาคสารละลายทั้งสองไหลแบบไหลผ่าน

เนื่องจากค่าร้อยละการสกัดประมาณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่ถูกสกัดไปทั้งหมดจากวัฏภาคสารละลายป้อนกับปริมาณไอออนทองแดงทั้งหมดในวัฏภาคสารละลายป้อนก่อนทำการทดลอง ส่วนค่าร้อยละการนำกลับประมาณจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอออนทองแดงที่นำกลับได้ทั้งหมดในวัฏภาคสารละลายสตรีปกับปริมาณไอออนทองแดงทั้งหมดในวัฏภาคสารละลายป้อนก่อนทำการทดลอง แต่ในการทดลองนี้ใช้เวลาเท่ากันและมีปริมาตรของระบบเท่ากัน ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นจึงอธิบายได้จากสมการอัตราการหายไปของไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายป้อนและสมการอัตราการเกิดไอออนทองแดงในวัฏภาคสารละลายสตรีปเช่นเดียวกับกรณีพิจารณาจากค่าฟลักซ์

5.6 ผลของการไหลเวียนวัฏภาคสารละลายสตรีปต่อการสกัดไอออนทองแดง

การทดลองนี้ดำเนินการโดยใช้สารสกัด D2EHPA เข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร สารละลายป้อนประกอบไปด้วยไอออนทองแดงเข้มข้น 100 ส่วนในล้านส่วน และมีสารละลายบัฟเฟอร์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสตรีปคงที่ที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ผลที่ได้จากการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 5.22 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดสะสมและค่าร้อยละการนำกลับสะสมกับเวลาที่ใช้ในการทดลอง (ผลการทดลองแสดงไว้ในตาราง ข-6 และตาราง ข-7 ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการสกัดตะกอนและค่าร้อยละการนำกลับตะกอนกับเวลาที่ใช้ในการทดลองสำหรับกรณีเติมสารละลายบัฟเฟอร์ในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน เมื่อ $[D2EHPA]_{\text{bed}} = 1\%, 2\%, 3\%, 4\%$ และ 5% โดยปริมาตร, $[Cu^{2+}]_{\text{bed}} = 100 \text{ ppm}$, $[\text{buffer}]_{\text{bed}} = 5\%$ โดยปริมาตร, $V_{\text{bed}} = 1 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{bed}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4]_{\text{top}} = 0.1 \text{ โมลต่อลิตร}$, $V_{\text{top}} = 10 \text{ ลิตร}$, $Q_{\text{top}} = 200 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$ โดยป้อนวิทยาศาสตร์ละลายป้อนในฝั่งท่อให้ไหลสวนทางกับวิทยาศาสตร์ละลายสตรีปในฝั่งเปลือกและให้วิทยาศาสตร์ละลายป้อนไหลผ่านและให้วิทยาศาสตร์ละลายสตรีปไหลเวียน

จากการทดลองเมื่อพิจารณาค่าร้อยละการสกัดตะกอนแสดงให้เห็นว่า โดยภาพรวมค่าร้อยละการสกัดตะกอนและค่าร้อยละการนำกลับตะกอนมีค่าแตกต่างกันในช่วงแรกของการทดลอง เมื่อเวลาผ่านไปค่าร้อยละการสกัดตะกอนและร้อยละการนำกลับตะกอนมีแนวโน้มเข้าใกล้กันมากขึ้น (ในการทดลองนี้ค่าร้อยละการสกัดตะกอนจะอยู่ในช่วง 91.49 ถึง 99.46 และค่าร้อยละการนำกลับตะกอนจะอยู่ในช่วง 38.15 ถึง 88.77) แต่อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการสกัดตะกอนพอจะแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือ ในช่วงเวลา 5 ถึง 30 นาทีแรกค่าสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสกัดตะกอนของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงของเวลา (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วงประมาณ 0.02 ถึง -0.01 ในช่วงเวลา 30 ถึง 50 นาทีค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการสกัด

สะสมของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาอยู่ในช่วงประมาณ -0.19 ถึง -0.62 ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการนำกลับสะสมทองจะแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ในช่วงเวลา 5 ถึง 15 นาทีแรกค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการนำกลับสะสมของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงของเวลา (หรือค่าความชันของกราฟ) อยู่ในช่วง 3.13 ถึง 1.51 ในช่วงเวลา 15 ถึง 30 นาทีค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการนำกลับสะสมของไอออนทองแดงกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.89 และในช่วงเวลา 30 ถึง 50 นาทีค่าสัดส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละการนำกลับสะสมกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาอยู่ในช่วงประมาณ -0.23 ถึง -0.11 (ผลการคำนวณค่าความชันของกราฟแสดงในตาราง ก-21 ในภาคผนวก ก)

ผลที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องจากไอออนทองแดงที่ถ่ายเทออกจากภูมิภาคสารละลายป้อนต้องใช้เวลาหนึ่งในการถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลว Hann และคณะ (Hann et al., 1989) ทดลองพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนสตรีปเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนสกัด ดังนั้นในช่วงแรกของการทดลองค่าร้อยละการสกัดสะสมจึงมีค่าสูงกว่าค่าร้อยละการนำกลับสะสม และเมื่อเวลาผ่านไปค่าร้อยละการสกัดสะสมและค่าร้อยละการนำกลับสะสมจะมีแนวโน้มลดลงอาจเพราะผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนที่เป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทไอออนทองแดงผ่านเยื่อแผ่นเหลวมีค่าลดลง