

## บทที่ 4



### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

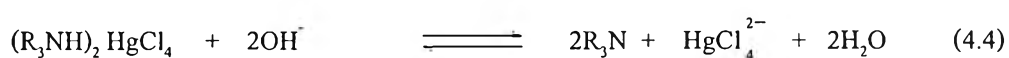
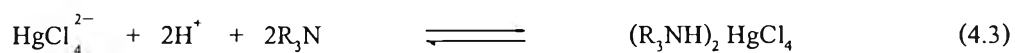
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทโดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความสามารถในการคัดเลือกไอออนปรอทของสารสกัด ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ และอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับ สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทพิจารณาจากค่าร้อยละการสกัด (Percent Extraction, % E) ค่าร้อยละการนำกลับ (Percent Recovery, % R)

ค่าร้อยละการสกัดคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างผลต่างของความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้ากับความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออกกับความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า คูณด้วย 100 ดังสมการที่ 4.1 ค่าร้อยละการนำกลับคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออกกับความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า คูณด้วย 100 ดังสมการที่ 4.2

$$\% E = \frac{C_{\text{feed}} - C_{\text{raf}}}{C_{\text{feed}}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\% R = \frac{C_{\text{st}}}{C_{\text{feed}}} \times 100 \quad (4.2)$$

เมื่อพิจารณาในมอดูลของเส้นใยกลวงซึ่งบรรจุสารสกัด TOA พบว่าเกิดการสกัดไอออนปรอทสารสกัด TOA เป็นสารสกัดชนิดเบสเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยากับไอออนโลหะที่มีประจุลบ ซึ่งไอออนปรอทจะแตกตัวให้ประจุลบ ( $\text{HgCl}_4^{2-}$ ) ปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทแสดงดังสมการที่ 4.3 และ 4.4 โดย  $\text{R}_3\text{N}$  คือ สารสกัด TOA



## 4.1 ผลการทดลอง

### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของไอออนในน้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ

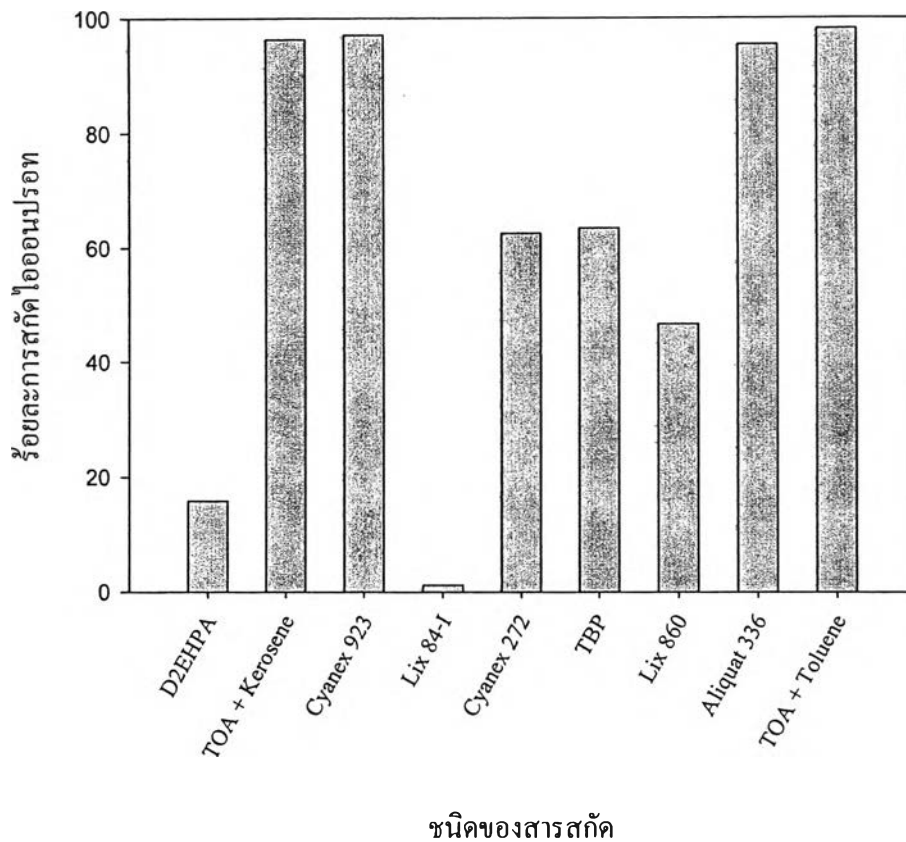
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารละลายป้อนของน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6.8 – 7 โดยไอออนที่วิเคราะห์ได้แก่ สารหนู โปรท เหล็ก แมกนีเซียม แคลเซียม และ โซเดียม ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบไอออนโลหะในน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมเจาะก๊าซธรรมชาติ

องค์ประกอบของไอออนในน้ำทิ้ง	ความเข้มข้น (ppm)
As(III)	1.988 $\approx$ 2
Hg(II)	1.248 $\approx$ 1.2
Fe(III)	0.756 $\approx$ 0.8
Mg(I)	2.414 $\approx$ 2.4
Ca(I)	11.64 $\approx$ 11.6
Na(I)	1022.75 $\approx$ 1022.8

### 4.1.2 ผลของชนิดของสารสกัดต่อการสกัดไอออนโปรทด้วยเยื่อแผ่นเหลวด้วยวิธีอิมัลชัน

การทดลองเพื่อศึกษาผลของสารสกัดแต่ละชนิดกับร้อยละการสกัด ทำโดยการเปลี่ยนสารสกัดเป็น TOA, D2EHPA, Cyanex 923, Lix 84-I, Cyanex 272, TBP, Lix 860, Aliquat 336 ที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน (Kerosene Jet A-1) และ TOA ที่ละลายในตัวทำละลายทอลูอิน (Toluene) ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ สารละลายป้อนที่มีไอออนโปรทเจือปน ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิดเป็น 5 % โดยปริมาตร ความเป็นกรด-เบส = 6.8 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ ระยะเวลาในการปั่นกวน 30 นาที ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1

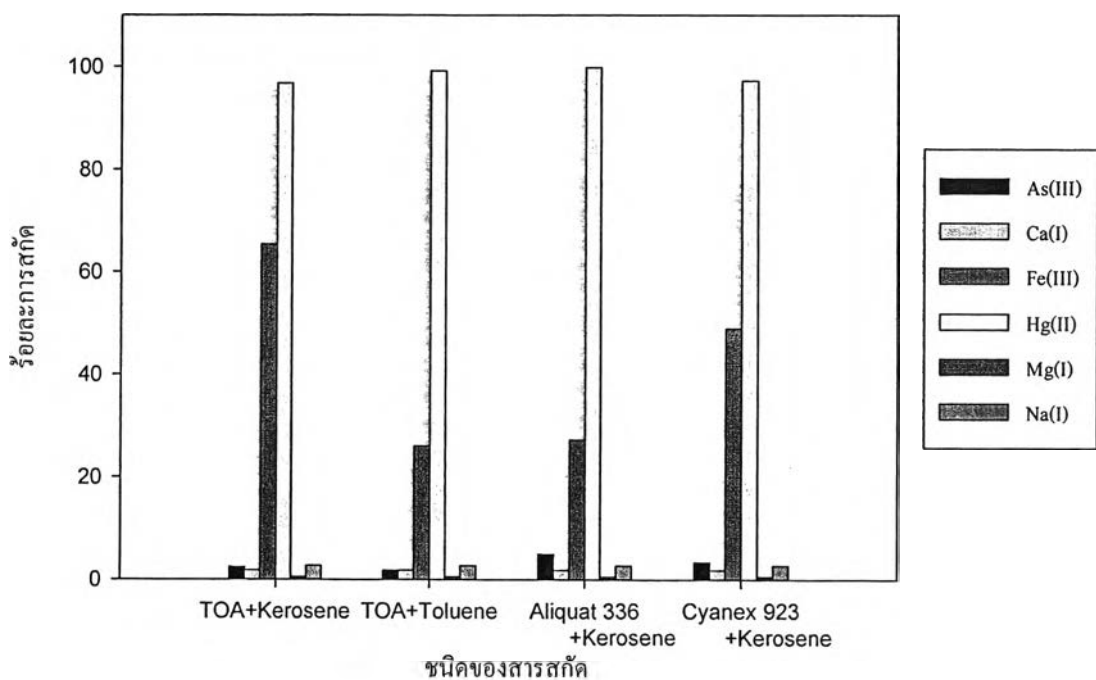


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารสกัดกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิด = 5 % โดยปริมาตร ความเป็นกรด-เบส = 6.8 โดยปั่นด้วยอัตราเร็ว = 100 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 4.1 เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารสกัด พบว่าร้อยละการสกัดของไอออนปรอทของสารสกัดแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยจะเห็นได้ว่าสารสกัดชนิด TOA, Cyanex 923, Aliquat 336 ที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และ TOA ที่ละลายในตัวทำละลายทอลูอิน สามารถสกัดไอออนปรอทได้สูงที่สุด

#### 4.1.3 ผลของสารสกัดที่มีการคัดเลือกที่มีผลต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวด้วยวิธีอิมัลชัน

การทดลองเพื่อศึกษาผลการคัดเลือกไอออนปรอทสูงสุดของสารสกัด 4 ชนิดกับร้อยละการสกัด ทำโดยการเปลี่ยนสารสกัดเป็น TOA, Cyanex 923, Aliquat 336 ที่ละลายในตัวทำละลายเคโรซีน และ TOA ที่ละลายในตัวทำละลายทอลูอิน ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ สารละลายป้อนที่มีไอออนปรอทเจือปน ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิดเป็น 5 % โดยปริมาตร ความเป็นกรด-เบส = 6.8 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ ระยะเวลาในการปั่นกวน 30 นาที ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2

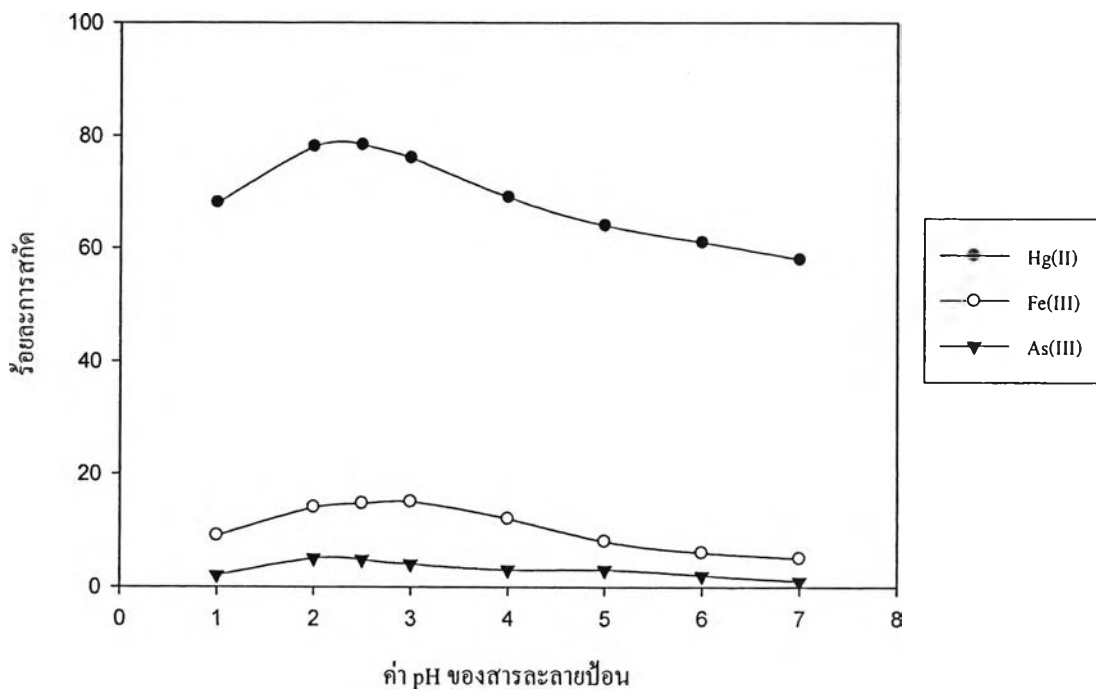


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการคัดเลือกของสารสกัดกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิดเป็น 5 % โดยปริมาตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6.8  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร ระยะเวลาในการปั่นกวน 30 นาที

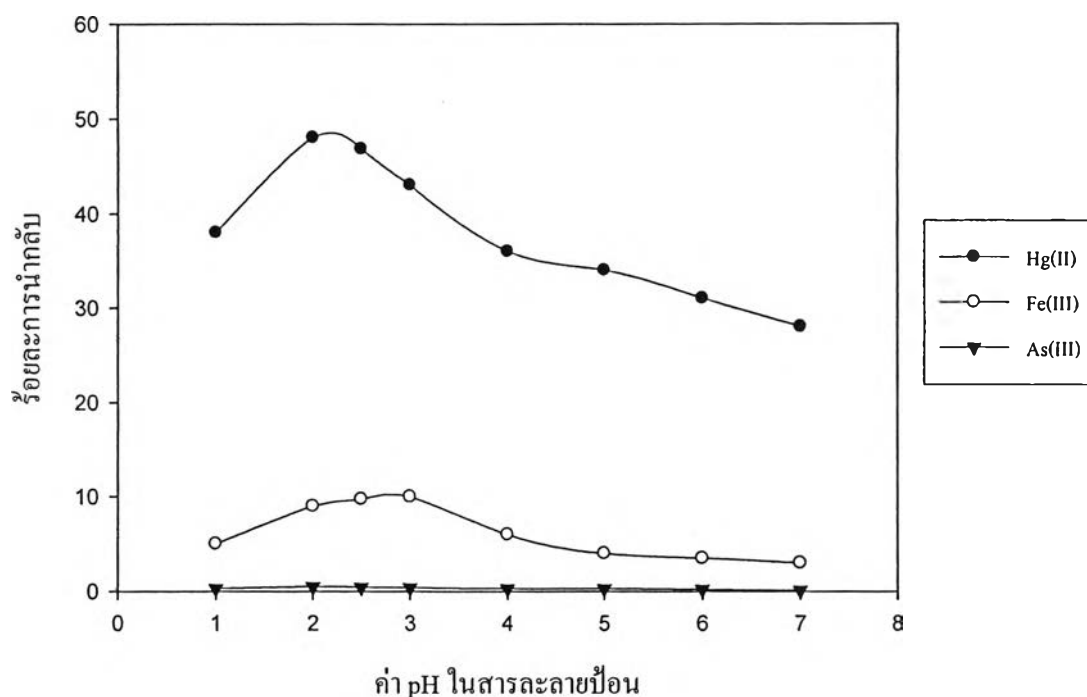
จากรูปที่ 4.2 เมื่อเปลี่ยนสารสกัดแต่ละชนิดกันจะมีค่าการคัดเลือกที่ไม่เท่ากันเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกันจะเห็นได้ว่าสารสกัด TOA ที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายทอลูอิน นั้นมีค่าการคัดเลือกที่ดีที่สุด

#### 4.1.4 ผลของความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน ทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนเป็น 1, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6 และ 7 ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ มอดูลของเส้นใยกลวงบรรจุสารสกัด TOA ความเข้มข้น 2 % โดยปริมาตร ที่ละลายในตัวทำละลายทอลูอิน และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากันคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ในสารละลายป้อนกับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



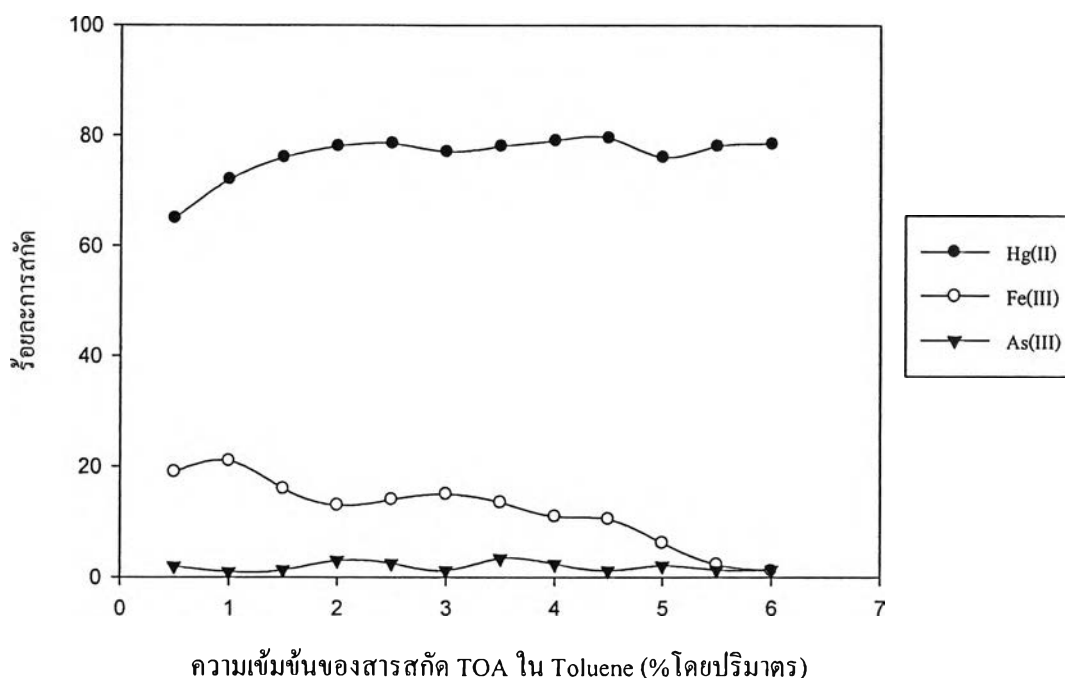
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ในสารละลายป้อนกับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท เมื่อ  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_r = Q_s = 100$  มิลลิลิตร ต่อนาที

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มค่า pH ในสารละลายป้อน ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทมีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงค่า pH ที่ 2.5 หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มลดต่ำลง เนื่องจากในสมการการสกัดตามทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเดอริเยร์ (John C. Kottz และ Keith F. Purcell, 1991) เมื่อเพิ่มค่า pH ในสารละลายป้อน จะทำให้สมดุลเลื่อนไปข้างหน้าทำให้การสกัดไอออนปรอทมีค่าสูงขึ้นและปริมาณไอออนปรอททางด้านผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีที่ค่า pH ในสารละลายป้อน มีค่ามากกว่า 2.5 การสกัดไอออนปรอทจะมีค่าลดลง เนื่องจาก TOA เป็นสารสกัดชนิดเบสจะทำการสกัดไอออนโลหะได้ดีที่ภาวะความเป็นกรด-เบสไม่สูง (Pancharoen et al., 2005) ดังนั้นเมื่อความเป็นกรด-เบสเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้ร้อยละการสกัดลดลง

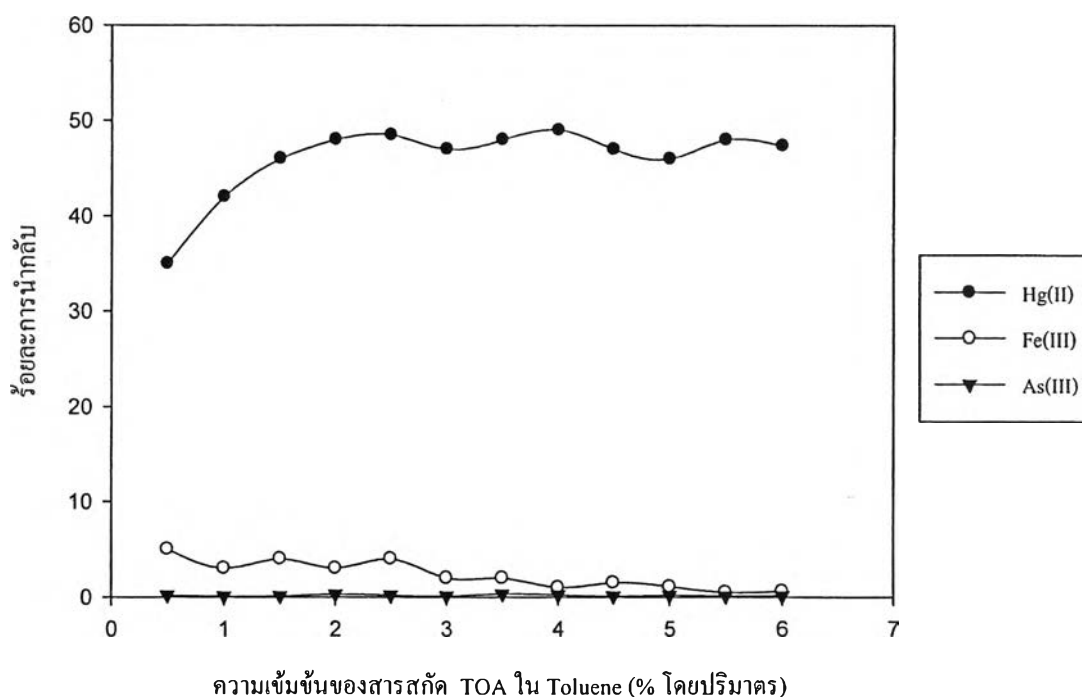
ส่วนค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าร้อยละการสกัดเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่าค่า pH ในสารละลายป้อน ที่เหมาะสม คือ 2.5 ซึ่งมีค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทเท่ากับ 79 และ 48 ตามลำดับ

#### 4.1.5 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาปัจจัยผลของความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้พิจารณาจากค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทที่ได้ โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA เป็น 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5 และ 6% โดยปริมาตร ส่วนปัจจัยอื่น ๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ค่า pH ในสารละลายป้อน เป็น 2.5 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.4) และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ pH ในสารละลายป้อน = 2.5 ,  $[\text{NaOH}]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด TOA กับร้อยละการนำกลับไอออนปรอทเมื่อ pH ในสารละลายป้อน = 2.5 ,  $[\text{NaOH}]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารสกัด TOA ในมอดูลของเส้นใยกลวง พบว่าร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับของไอออนปรอทมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด TOA จาก 0.5 จนถึง 2 % โดยปริมาตร อธิบายได้ด้วยทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ ได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาคำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น เนื่องจากไอออนปรอทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน  $(R_3\text{NH})_2\text{HgCl}_4$  กับสารสกัดและไอออนปรอทถูกสกัดมากขึ้น ทำให้เกิดการนำกลับไอออนปรอทมากขึ้นเช่นกัน และเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด TOA มีค่ามากกว่า 2 % โดยปริมาตร ค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากขีดจำกัดของรูพรุนจุลภาคภายในเส้นใยกลวงซึ่งมีผลจำกัดพื้นที่ในการถ่ายเทมวล กล่าวคือเส้นใยกลวงสามารถบรรจุสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้ในปริมาณจำกัดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แม้เพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวก็ไม่มีผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะส่งผลให้สารละลายเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงขึ้น (Luccio et al., 2000) ทำให้ขวางกั้นการถ่ายเทมวลไอออนปรอทจากสารละลายป้อนไปสู่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวหรือก็คือจะส่งผลต่อค่า



สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนปรอทกับสารสกัดที่ละลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวให้มีค่าน้อยลง ดังสมการของ Stokes และ Einstein (Schulz, 1988 และ Cussler, 1997)

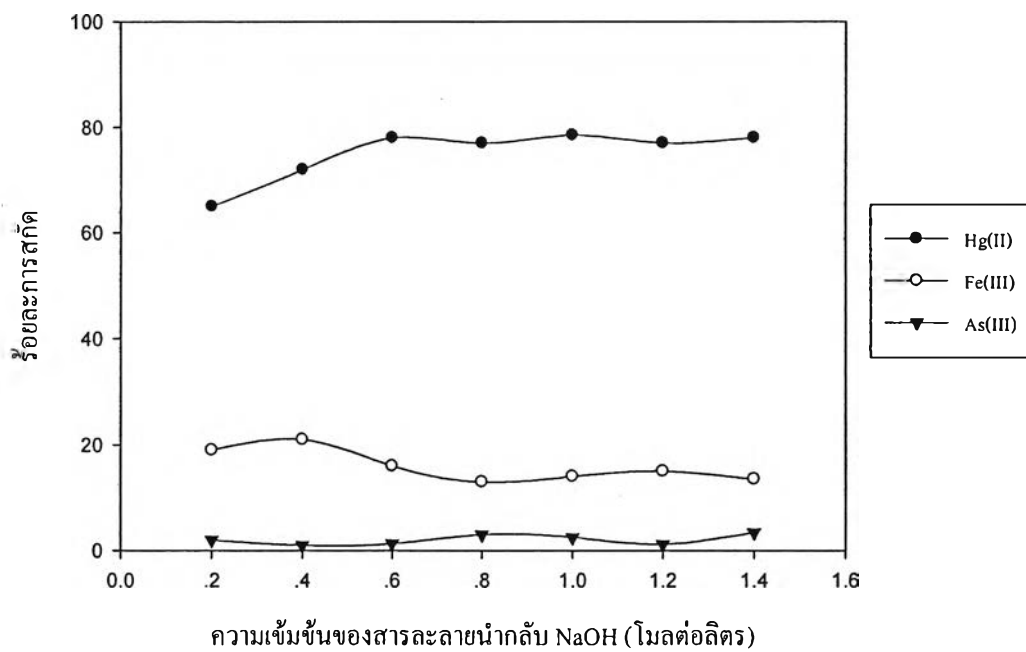
$$D = \frac{k_B T}{6\pi \eta r} \quad (4.5)$$

เมื่อ

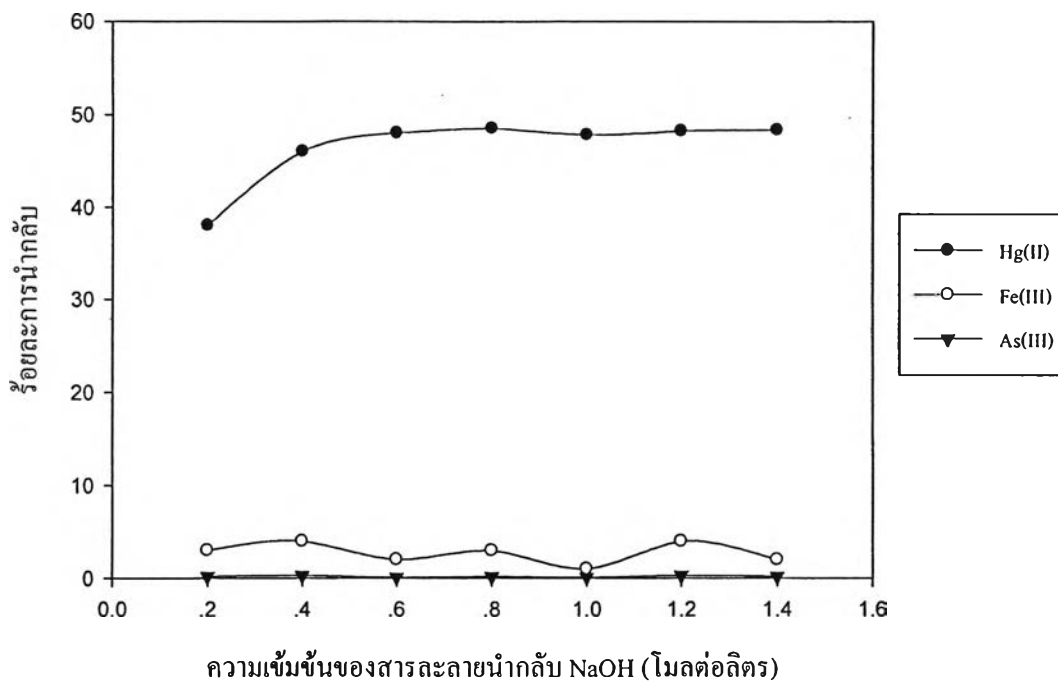
D	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่	(m <sup>2</sup> /s)
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว	(K)
$\eta$	=	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว	(kg/m s)
r	=	รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน	(m)
$k_B$	=	ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.3807 \times 10^{-23}$ J/K	
$\pi$	=	ค่าคงที่ในสมการของ Stokes และ Einstein มีค่า 3.1416	

#### 4.1.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการสกัดไอออนปรอทจะใช้ข้อมูลจากผลการทดลองของความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารสกัดข้างต้นที่ให้ค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับไอออนปรอทสูงสุด โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 และ 1.6 โมลต่อลิตร ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ค่า pH ในสารละลายป้อน เป็น 2.5 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.4) ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในมอดูลของเส้นใยกลวงบรรจุ 2 % โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.5) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากัน คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั่นโซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการสกัดไอออนปรอทเมื่อ pH ในสารละลายป้อน = 2.5,  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

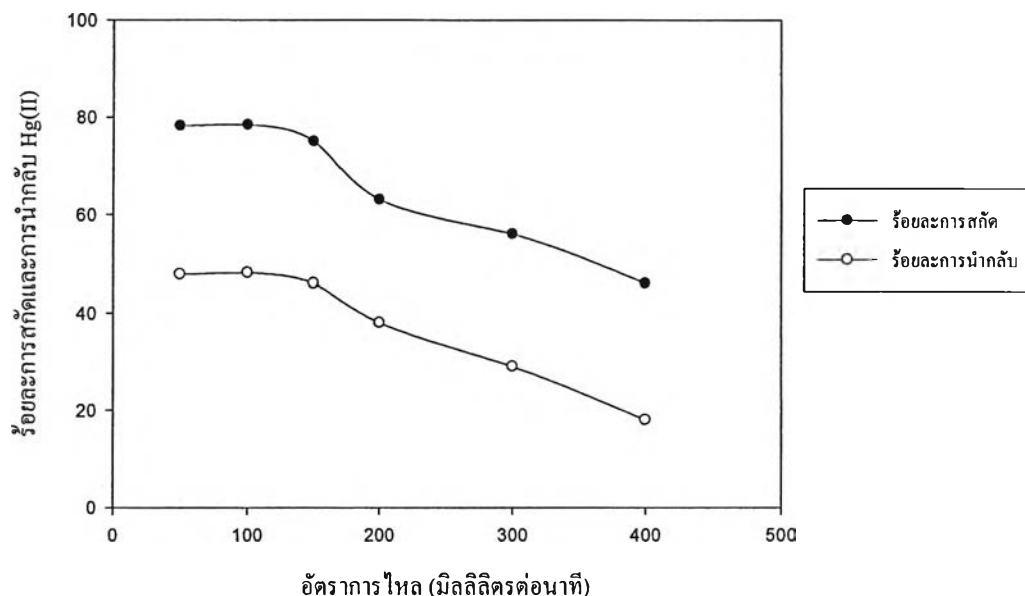


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั่นโซเดียมไฮดรอกไซด์กับร้อยละการนำกลับไอออนปรอทเมื่อ pH ในสารละลายป้อน = 2.5,  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร และ  $Q_r = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั่นโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 0.2 จนถึง 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเกิน 0.5 ค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทมีแนวโน้มคงที่ ถ้าพิจารณาจากปฏิกิริยาการนำกลับจากสมการที่ 4.4 ที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั่นโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะเกิดมากขึ้นหรือการนำกลับมากขึ้น ซึ่งการนำกลับที่ดีขึ้นนี้จะส่งผลให้การสกัดมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วยและหลังจากนั้นจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายเทมวลของมอดูลเส้นใยหลวงมีค่าคงที่ จึงมีอัตราการถ่ายเทมวลที่จำกัด

#### 4.1.7 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอท

การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงทำโดยเปลี่ยนค่าอัตราการไหลเป็น 50, 100, 150, 200, 300, และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ค่า pH ในสารละลายป้อน เป็น 2.5 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.4) ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในมอดูลของเส้นใยกลวงบรรจุ 2 % โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.5) และใช้สารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.6) ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่ผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอท แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับกับร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอท เมื่อ pH ในสารละลายป้อน = 2.5,  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

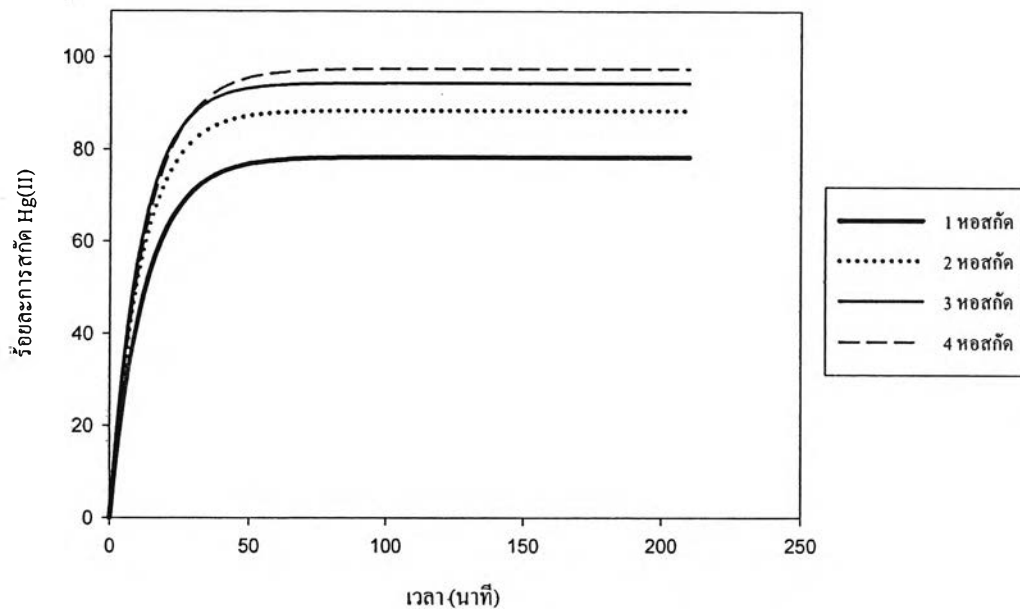
จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทจะลดลงเนื่องจากระยะเวลาที่ไอออนปรอทและสารสกัด TOA ในชุดทดลองเส้นใยกลวงสัมผัสกัน หรือ Resident Time ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของชุดทดลองเส้นใยกลวง (V) กับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อน

(Q) หรืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของชุดทดลองเส้นใยกลวงกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายนำกลับมีค่าลดลง

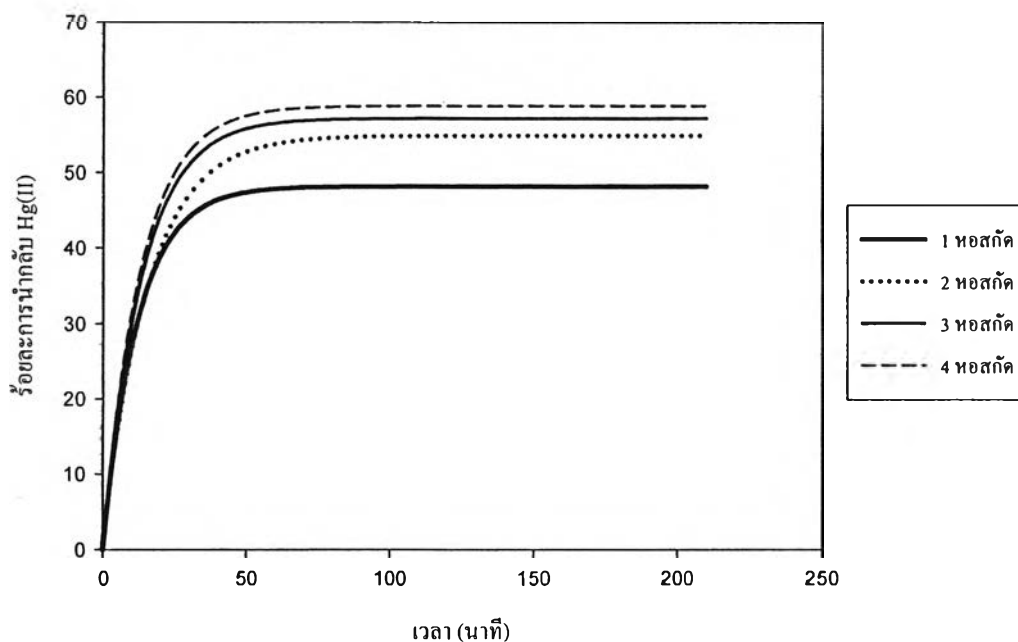
ถ้าพิจารณาความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ กระบวนการสกัดและการนำกลับไอออนโปรทควรมีกำลังการผลิตสูง คือ มีอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสูงๆ แต่จากผลการทดลองในรูปที่ 4.9 อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เหมาะสมต่อการสกัดไอออนโปรทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงที่สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการจริง คือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเมื่อดูจากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันในช่วง 50–100 มิลลิลิตรต่อนาที จะมีอัตราการสกัดและการนำกลับที่ไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่ออัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมากกว่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ค่าทั้งสองลดลง

#### 4.1.8 ผลของจำนวนหอสกัดในการสกัดต่อการสกัดไอออนโปรทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองเพื่อศึกษาผลของจำนวนหอสกัดในการสกัดที่มีผลต่อการสกัดไอออนโปรทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทำโดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ค่า pH ในสารละลายป้อน เป็น 2.5 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.4) ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในมอดูลของเส้นใยกลวงบรรจุ 2 % โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.5) และใช้สารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.6) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.7) รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดที่จำนวนหอสกัดต่าง ๆ เมื่อ pH ในสารละลายป้อน = 2.5,  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตรและ  $Q_r = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที



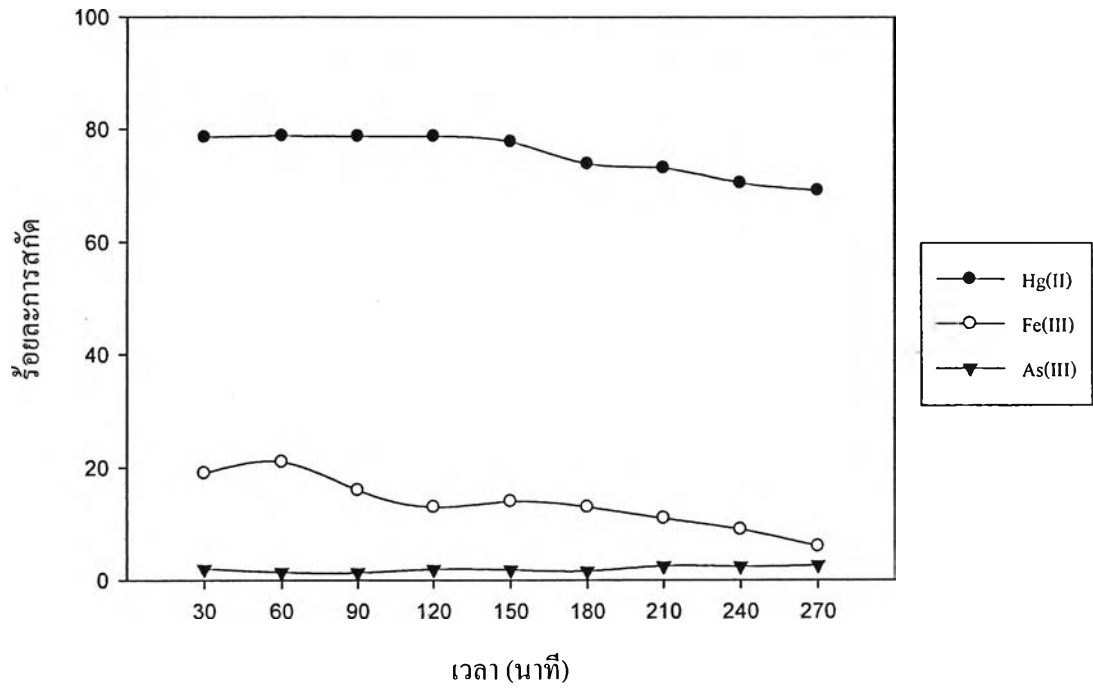
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการนำกลับที่จำนวนหอสกัดต่างๆ เมื่อ pH ในสารละลายป้อน = 2.5,  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_r = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าเมื่อทำการสกัดโดยเพิ่มจำนวนหอสกัดมากขึ้นจะพบว่าประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทสูงขึ้น ร้อยละการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทของที่ 4 หอสกัดจะมีค่า 97.8 และ 59.2 ตามลำดับ

#### 4.1.9 ผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

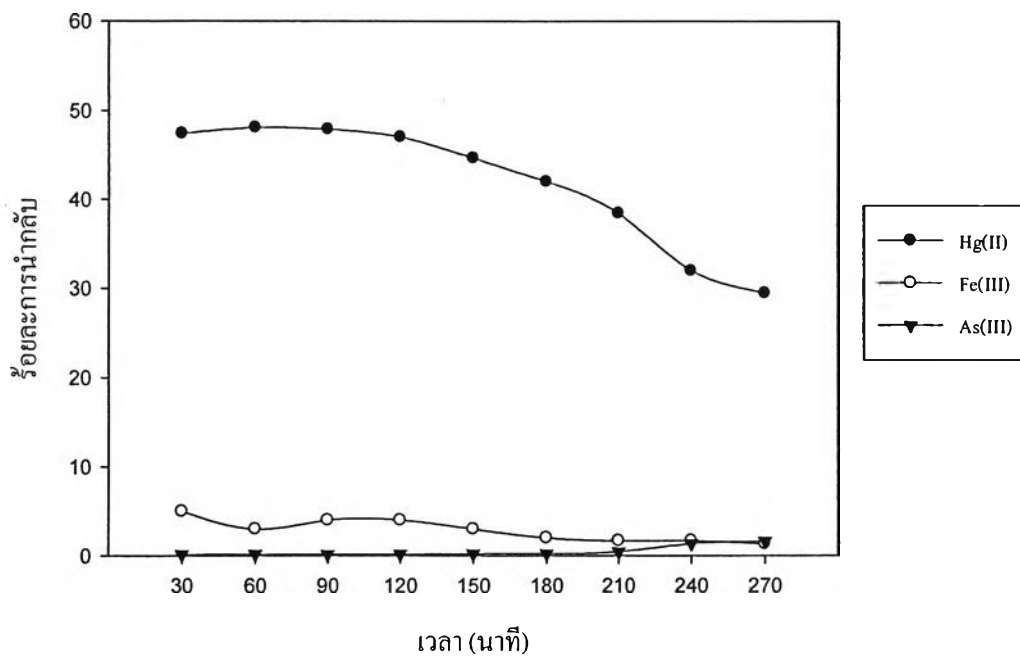
การทดลองเพื่อศึกษาผลของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทำโดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาทีส่วนปัจจัยอื่นๆ มีค่าคงที่ ดังนี้คือ ค่า pH ในสารละลายป้อน เป็น 2.5 (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.4) ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในมอดูลของเส้นใยกลวงบรรจุ 2% โดยปริมาตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.5) และใช้สารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร (ค่าที่เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.6) อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่า 100 มิลลิลิตรต่อนาที (ค่าที่

เหมาะสมจากหัวข้อ 4.1.7) รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันและไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดไอออนปรอท เมื่อ  $\text{pH}$  ในสารละลายป้อน = 2.5,  $[\text{TOA}]_m = 2\%$  โดยปริมาตร,  $[\text{NaOH}]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิกรัมต่อนาที





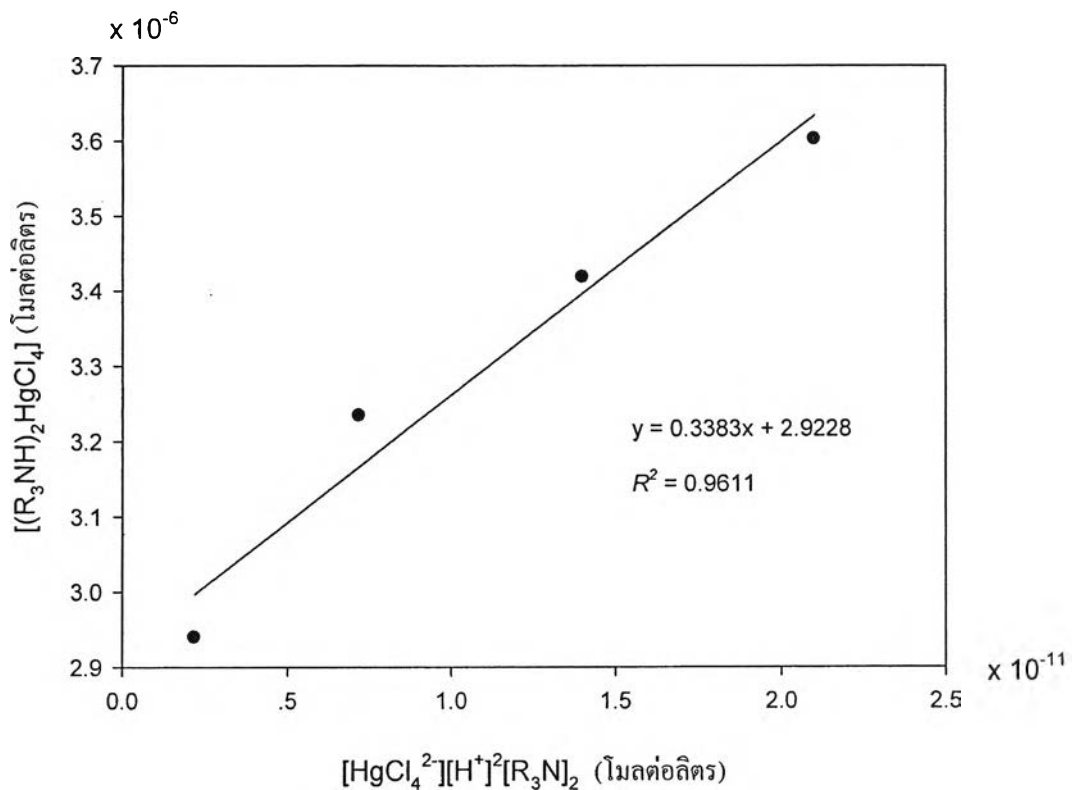
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการนำกลับไอออนปรอท เมื่อ pH ในสารละลาย  
 ปรอท = 2.5,  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s =$   
 100 มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าในช่วงระยะเวลา 120 นาทีแรก ร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนปรอทค่อนข้างคงที่ แต่หลังจาก 120 นาที พบว่าร้อยละการสกัดและนำกลับของไอออนปรอทมีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสื่อมสภาพของเยื่อแผ่นเหลวจากการสะสมของไอออนปรอททำให้พื้นที่ผิวในการสกัดลดลงส่วนไอออนของสารชนิดอื่นเริ่มเกิดการสกัดและนำกลับเนื่องจากเกิดการหลุดของเยื่อแผ่นเหลวที่ตรึงอยู่ในรูพรุนของเส้นใยกลวง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการสกัดแยกปรอทออกจากสารอื่น ๆ ลดลงดังนั้นอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลวที่จะให้ ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนปรอทในภาวะที่ทำการทดลองได้ดีที่สุด คือ ไม่เกิน 120 นาที

## 4.2 การประยุกต์ผลการทดลองกับทฤษฎี

### 4.2.1 การคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, $K_{eq}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, $D$ ) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท

การคำนวณค่าคงที่สมดุลและค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทโดยใช้สมการที่ 2.12 และ 2.13 ซึ่งค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท ( $K_{eq}$ ) อ่านได้จากความชันของกราฟในรูปที่ 4.14 มีค่าเท่ากับ  $3.383 \times 10^{-1}$  (ลิตรต่อโมล) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การกระจายเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.5-2 % โดยปริมาตร แสดงดังตารางที่ 4.6 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก-3)



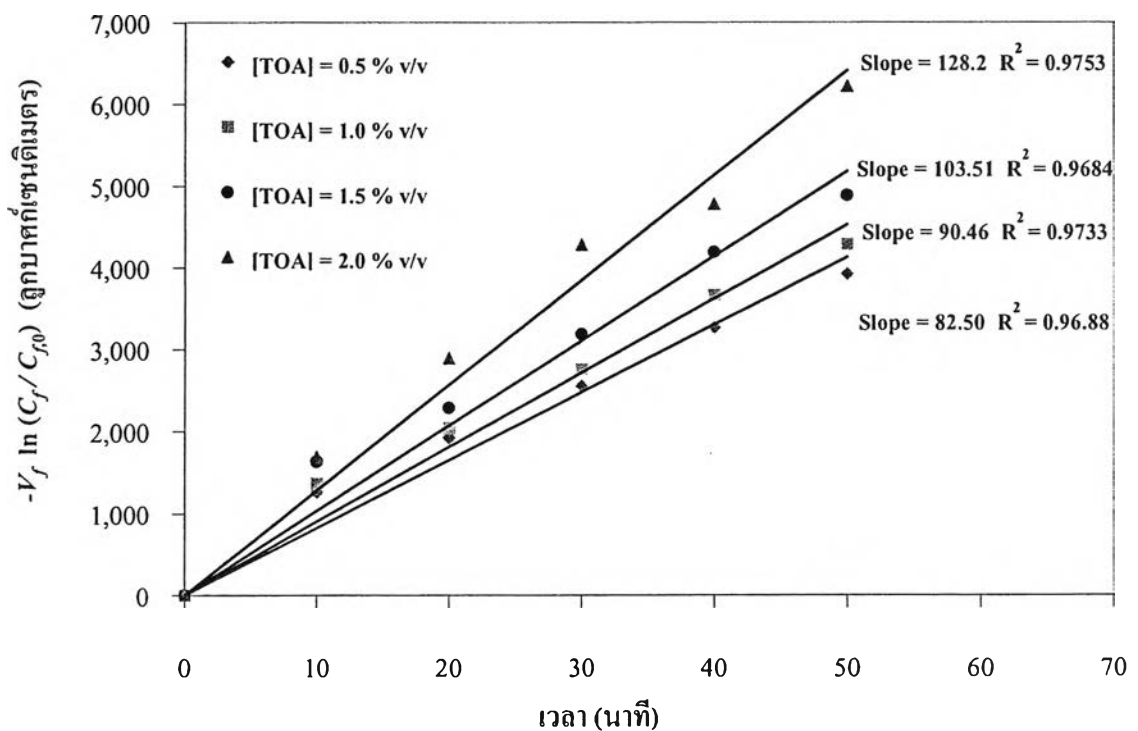
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ระหว่างเริ่มต้นปฏิกิริยากับที่สุดท้ายของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.5-2 % โดยปริมาตร

#### 4.2.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, $P$ )

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงต่อการสกัดไอออนปรอทที่เวลาต่างๆ ทำโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในช่วง 0.5-2 % โดยปริมาตร

แทนค่าความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนที่เวลาต่างๆ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.14 และ 2.15 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1-3 % โดยปริมาตร ทำโดยสร้างกราฟระหว่าง  $-V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f,0}} \right)$  กับเวลา ( $t$ ) แสดงดังรูปที่ 4.15 จะได้ความชันของกราฟคือ  $AP \frac{\phi}{\phi + 1}$  ซึ่งทำให้หาค่า  $P$  หรือค่าสัมประสิทธิ์การ

ซึมผ่านได้ดังตารางที่ 4.6 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก-4)



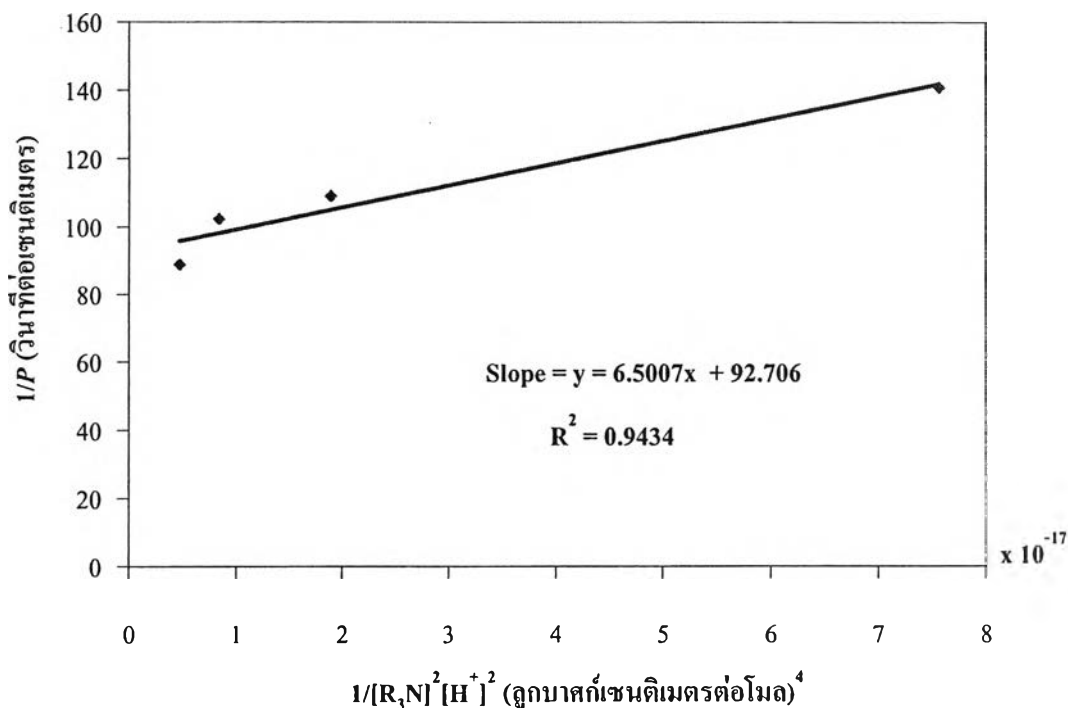
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln (C_f / C_{f,0})$  ของไอออนปรอทในสารละลายป้อนกับเวลา ( $t$ ) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง เมื่อ pH ในสารละลายป้อน = 2.5,  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปฏิริยาการสกัด ไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงในช่วง 0.1–3 % โดยปริมาตร

ความเข้มข้นสารสกัด TOA (% v/v)	D	P (เซนติเมตรต่อวินาที)
0.5	$3.61 \times 10^{-3}$	$2.5874 \times 10^{-2}$
1	$7.22 \times 10^{-2}$	$3.2025 \times 10^{-2}$
1.5	$1.08 \times 10^{-2}$	$4.4541 \times 10^{-2}$
2	$1.44 \times 10^{-2}$	$5.9747 \times 10^{-2}$

#### 4.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน ( $k_f$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( $P$ ) ของปฏิริยาการสกัดไอออนปรอทเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงในตารางที่ 4.2 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน ( $k_f$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ได้จากสมการที่ 2.23 โดยสร้างกราฟระหว่าง  $\frac{1}{P}$  กับ  $\frac{1}{[R_3H]^2[H^+]^2}$  แสดงดังรูปที่ 4.16 (หรือรูปที่ ค-3) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ได้จากความชันของกราฟซึ่งคือเทอม  $\frac{r_i}{r_{im} K_{ex} k_m}$  และ คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน ( $k_f$ ) ได้จากจุดตัดแกน  $\frac{1}{P}$  (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค-5)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/P$  กับ  $1/[R_3N]^2[H^+]^2$  เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวง เมื่อ pH ในสารละลายป้อน = 2.5,  $[TOA]_m = 2\%$  โดยปริมาตร,  $[NaOH]_s = 0.5$  โมลต่อลิตร และ  $Q_f = Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.16 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน ( $k_f$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) เท่ากับ 0.011 และ 1.028 เซนติเมตรต่อวินาที สังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน ดังนั้นกล่าวได้ว่าขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ การถ่ายเทมวลของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว