

รายการอ้างอิง



ภาษาไทย

- กิตติพงษ์ เชิญวัฒนชัย. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งจากหลุมก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทรัพย์ากรธณี, กรม. 2543. ปรอท. กรุงเทพมหานคร: กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ กรมทรัพยากรธรณี. (อัดสำเนา)
- นิติต สุไลมาน. 2544. การสกัดนีโอดีเนียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกร รามกุล. 2544. การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดีเนียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- แม่น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2535. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพมหานคร: ชวนพิมพ์.
- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ 2541. ปรอท. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- วีรวัฒน์ ปัตทวิถกคา. 2541. อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายผสมกรดอะซิติกกับโซเดียมอะซิเตตต่อการสกัดแยกไอออนสังกะสีด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภัทร สัมมาภิศพงศ์. 2549. การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์โดยใช้หอสกัดแบบจวนมีรูยี่คติดกึ่งที่และป้อนสารเป็นช่วงๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอกพิชญ์ ทรงคุณ. 2548. การถ่ายเทมวลโคบอลต์ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Ali Jabbari, Majid Esmaceli and Mojtaba Shamsipur. 2001. "Selective transport of mercury as HgCl_4^{2-} through a bulk liquid membrane using K^+ -dicyclohexyl-18-crown-6 as carrier.", Journal of Separation and Purification Technology 24:139-145.
- A. Safavi and E. Shams. 1998. "Highly selective and efficient transport of Hg (II) through bulk liquid membrane using methyl red as carrier.", Journal of Membrane Science 144: 37-43.
- Bird R.B. Stewart W.E., and Lightfoot E.N. 1960. Transport Phenomena John Wiley & Sons
- Claudia Fontas, Manuela Hidalgo, Victoria Salvado, Enriqueta Antico. 2005. "Selective recovery and preconcentration of mercury with a benzoylthiourea-solid supported liquid membrane system.", Journal of Analytica Chimica Acta 547: 255-261.
- Cussler E.L. 1997. Diffusion Mass Transfer in Transfer in Fluid Systems Cambridge University Press, USA.
- Dahuron, L. and Cussler, E.L. 1988. "Protein Extraction with Hollow Fiber.", AIChE Journal. 34(1): 130-136.
- Danesi, P. R. and Rickert, P.G. 1986 1984 "Some observation on the Performance of Hollow Fiber Supported Liquid Membranes for Co-Ni Separations", Solvent Extraction and Ion Exchange. 4(1): 149-164.
- Fernandez, L., Aparicio, J., and Muhammed, M. 1987. "The role of feed metal concentration in the coupled transport of zinc through a bis-(2-ethylhexyl) phosphoric acid solid supported liquid membrane from aqueous perchlorate media.", Separation Science and Technology. 22(6): 1575-1593.
- Gu, Z. 1990. "A new liquid membrane technology-electrostatic pseudo liquid membrane.", Journal of Membrane Science 52: 77-88.
- Izatt, R, M., Lamb, J, D., and Bruening, R, L. 1988. "Comparison of bulk, emulsion, thin sheet supported, and hollow fiber supported liquid membranes in macrocycle-mediated cation separation.", Separation Science and Technology 23(12&13): 1645-1658.
- John C. Kotz and Keith F. Purcell, Chemistry & Chemical Reactivity. 2nd edition, Saunders College Publishing, the United States of America (1991), p. 569.

- Komasawa, Isao, Otake, Tsutao and Yamashita, Tomohiro. 1983. "Mechanism kinetic of copper permeation through a supported liquid membrane containing a hydroxyoxime as mobile carrier.", Ind. Eng. Chem. Fundam 22: 127-131.
- Kumar, A., Haddad, R., Benzal, G., Ninou, R., and Sastre, A.M. 2000. "Use of modified membrane carrier system for recovery of gold cyanide from alkaline cyanide media using hollow fiber supported liquid membranes: feasibility studies and mass transfer modeling.", Journal of Membrane Science 174(17) : 17-30.
- Luccio, M.D., Smith, B.D., Kida, T., Borges, C.P., and Alves, T.L.M. 2000. "Separation of fructose from a mixture of sugars using supported liquid membranes.", Journal of Membrane Science 174: 217-224.
- Marr, R. and Kopp, A., 1982 "Liquid Membrane Technology a Survey of Phenomena, Mechanism and Models", International Chemical Engineering. 22(1): 44-59.
- Mojtaba Shamsipur, Mohammad Hossain Mashhadizadch, Gholamhasan Azimi. 2002. "Highly selective and efficient transport of mercury (II) ions across a bulk liquid membrane containing Tetrathia-12-crown-4 as a specific ion carrier.", Journal of Separation and Purification Technology 27: 155-161.
- Nakano, M., Takahashi, K. and Takeuchi, H. 1987. "A Method for Continuous Operation of Supported Liquid Membranes.", Journal of Chemical Engineering of Japan. 20: 326-328.
- O' Hara, P.A., and Bohrer, M.P. 1989. "Supported Liquid Membrane for Copper Transport.", Journal of Membrane Science 44: 273-287.
- Pancharoen, U., Ramakul, P. and Pattaveekongka, W. 2005. "Purely extraction and separation of mixture of Cerium (IV) and Lanthanum (III) via hollow fiber supported liquid membrane.", Journal of Industrial and Engineering Chemistry 11(6): 926-931.
- Patthaveekongka, W., Vijitchalermpong, N. and Pancharoen, U. 2003. "Selective recovery of palladium from used aqua regia by hollow fiber supported with liquid membrane", Korean Journal of Chemical Engineering 20(6): 1092-1096.
- Porter C. 1990. Handbook of Industrial Membrane Technology New Jersey: Noyes Publications.
- Quanmin Li, Qi Liu, Xianjun Wei. 1996. "Separation study of mercury through an emulsion liquid membrane.", Journal of Talanta 43: 1837-1842.
- Ramakul, P. and Pancharoen, U. 2003. "Synergistic extraction and separation of mixture of lanthanum and neodymium by hollow fiber supported liquid membrane.", Korean Journal of Chemical Engineering 20: 724-730.

- Ramakul, P., Nakararueng, K. and Pancharoen, U. 2004. "One-through selective separation of copper, chromium and zinc ions by hollow fiber supported liquid membrane.", Korean Journal of Chemical Engineering 21(6): 1212–1217.
- Ramakul, P., Pancharoen, U. and Hronec M. 2005. "Selective separation of trivalent and tetravalent lanthanide from mixture by hollow fiber supported liquid membrane.", Journal of Chinese Institute of chemical Engineers 36(5): 1–7.
- Ramakul, P., Pattaweekongka, W. and Pancharoen, U. 2006. "Mass transfer modeling of membrane carrier system for extraction of Ce (IV) from sulfate media using hollow fiber supported liquid membrane.", Korean Journal of Chemical Engineering 23(1): 85–92.
- Ramakul, P., Songkun, E., Pattaweekongka, W., Hronec M. and Pancharoen, U. 2006. "Permeation study on the hollow-fiber supported liquid membrane for the extraction of Cobalt (II).", Korean Journal of Chemical Engineering 23(1): 117–123.
- Rathore, N. S., Sonawane, J.V., Kumar, A., Venugopalan, A. K., Singh, R. K., Bajpai, D. D., and Shukla, J. P. 2001. "Hollow fiber supported liquid membrane: a novel technique for separation and recovery of plutonium from aqueous acidic wastes.", Journal of Membrane Science 189: 119.
- Rovira, M. and Sastre, A.M. 1998. "Modelling of mass transfer in facilitated supported liquid membrane transport of palladium (II) using di-(2-ethylhexyl) thiophosphoric acid.", Journal of Membrane Science 149: 241–250.
- Schultz, G. 1988. "Separation Techniques with Supported Liquid Membrane.", Desalination 68: 191–202.
- Seader, J. D., and Ernest. J. H. 1984. Separation Process Principles. 231–248: John Wiley and Sons Inc.
- Sangtumrong, S., Ramakul, P., Satayaprasert, C., Lothongkum, A.W. and Pancharoen, U. 2007. "Purely Separation of Mixture of Mercury and Arsenic via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane.", Journal of Industrial and Engineering Chemistry 13(5): 751–756.
- Shiau, Ching-Yeh and Chen, Pai-Zoh 1993. "Theoretical analysis of copper-ion extraction through hollow fiber supported liquid membranes.", Separation Science and Technology 28(13, 14): 2149–2165.
- Tanigaki, M., Shiode, T., Ueda, M. and Eguchi, W. 1988. "Facilitated Transport of Zinc Chloride Through Hollow Fiber Supported Liquid Membrane.", Part I. Transport Mechanism. Separation Science and Technology 23(10&11): 1145–1159.

- Tavlarides, L.L., Bae, J.H., and Lee, C.K. 1987. "Solvent Extraction, Membrane and Ion Exchange in Hydrometallurgical Dilute Metals Separation.", Separation Science and Technology 22(2-3): 581-617.
- Teramoto Masaaki, Masayuma, Hiedo, Takaya, Hitoshi, and Asano, Shigehiro. 1987. "Development of spiral-type supported liquid membrane module for separation and concentration metal ions.", Separation Science and Technology 22(11): 2175-2201.
- Thompson, M. and Walsh, J.N. 1989. Handbook of Inductively Coupled Plasma Spectrometry. 2nd ed. Blackie & Son Ltd.
- Varnes, A. W. 1997. Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy. In F. A. Settle (ed.), Handbook of Instrumental Techniques for Analytical Chemistry, pp.395-418. Prentice Hall PTR.
- Yang, Ming-Chien, and Cussler. E.L. 1986. "Designing Hollow Fiber Contractor.", AICHE Journal. 32(11): 1910-1916.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก



ภาคผนวก ก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา

ก-1 ค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, K_{ex}) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท

จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทในสมการที่ 2.11 เขียนความสัมพันธ์ค่าคงที่สมดุลได้ดังนี้

$$K_{ex} = \frac{[(R_3NH)_2 HgCl_4]}{[HgCl_4^{2-}] [H^+]^2 [R_3N]^2} \quad (ก-1)$$

ก-2 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, D) (Seader and Ernest, 1984; Rathore et al., 2001)

$$D = \frac{[(R_3NH)_2 HgCl_4]}{[HgCl_4^{2-}]} = K_{ex} [H^+]^2 [R_3N]^2 \quad (ก-2)$$

ก-3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, P) (Danesi, 1984)

$$V_f \ln \left(\frac{C_f}{C_{f,0}} \right) = -AP \frac{\phi}{\phi + 1} t \quad (ก-3)$$

โดยที่

$$\phi = \frac{Q_f}{PL\epsilon\pi Nr_i} \quad (ก-4)$$

เมื่อ

P = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)

$C_{f,0}$ = ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)

C_f	= ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลา t	(โมลต่อลิตร)
A	= พื้นที่การถ่ายเทมวล	(ตารางเซนติเมตร)
V_f	= ปริมาตรของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตร)
Q_f	= อัตราการไหลของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
L	= ความยาวของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
N	= จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล	(เส้น)
r_i	= รัศมีภายในของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
ε	= ความพรุนของเส้นใยกลวง	
π	= 3.1416	

ก-4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass Transfer Coefficient)

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของการถ่ายเทมวลกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Rathore et al., 2001)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{P_m} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{k_s} \quad (\text{ก-5})$$

เมื่อ

r_{lm}	= รัศมี Log-mean ของเส้นใยกลวง
r_o	= รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง
k_i	= ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน
k_s	= ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายนำกลับ
P_m	= ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว

ก-5 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, D) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (Permeability Coefficient, P_m) และค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, K_{ex}) (Rathore et al., 2001)

$$P_m = D k_m \quad (ก-6)$$

$$P_m = K_{ex} k_m [R_3N]^2 [H^+]^2 \quad (ก-7)$$

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{im}} \frac{1}{K_{ex} k_m [R_3N]^2 [H^+]^2} \quad (ก-8)$$

เมื่อ

k_m = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว

k_i = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ

ตารางที่ ข-1 ผลของชนิดของสารสกัดที่มีผลต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวด้วยวิธี
อิมัลชัน

(คูตัวอย่างการคำนวณได้จากภาคผนวก ค-1 และ ค-2)

ชนิดสารสกัด	ชนิดของตัว ทำละลาย	Hg(II) (ppm)		% การสกัด
		ขาเข้า	ขาออก	
D2EHPA	Kerosene	1.246	1.05	15.82
TOA	Kerosene	1.124	0.04	96.38
Aliquat336	Kerosene	1.215	0.05	95.68
Cyanex 923	Kerosene	1.056	0.02	98.18
Cyanex 272	Kerosene	1.145	0.43	62.51
TBP	Kerosene	1.211	0.44	63.42
Lix 84-I	Kerosene	1.149	1.13	1.24
Lix 860	Kerosene	1.125	0.6	46.65
TOA	Toluene	1.218	0.01	99.01

ภาวะที่ทดลอง: ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิด = 5 % โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-เบสใน
สารละลายป้อน = 2.5 โดยปั่นด้วยอัตราเร็ว = 100 รอบต่อนาที

ตารางที่ ข-2 ผลของสารสกัดที่มีการคัดเลือกที่มีผลต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลว ด้วยวิธีอิมัลชัน

ชนิดสารสกัด	ชนิดของตัวทำละลาย	Hg _r (II) (ppm)		% การสกัด	As _r (III) (ppm)		% การสกัด	Fe _r (III) (ppm)		% การสกัด
		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก		ขาเข้า	ขาออก	
TOA	Kerosene	1.124	0.04	96.38	1.998	1.96	1.77	0.78	0.58	26.08
Aliquat 336	Kerosene	1.215	0.05	95.68	1.956	1.89	3.41	0.81	0.6	26.34
Cyanex 923	Kerosene	1.056	0.02	98.18	1.854	1.76	4.97	0.76	0.39	49.03
TOA	Toluene	1.213	0.01	99.1	1.997	1.96	99.1	0.79	0.58	26.08

ภาวะที่ทดลอง: ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิด = 5 % โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน = 2.5 โดยปั่นด้วยอัตราเร็ว = 100 รอบต่อนาที

ตารางที่ ข-3 ผลของความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่น
เหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ความเป็นกรด-เบสใน สารละลายป้อน	Hg _f (II) (ppm)		Hg _s (II) (ppm)	% การ สกัด	% การ นำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก	ขาออก		
1	1.248	0.39	0.48	68.32	38.32
2	1.248	0.27	0.60	78.12	48.23
2.5	1.248	0.26	0.58	78.35	46.98
3	1.248	0.29	0.54	76.54	43.21
4	1.248	0.38	0.45	69.21	36.32
5	1.248	0.45	0.43	64.32	34.65
6	1.248	0.48	0.39	61.62	31.58
7	1.248	0.52	0.35	58.12	28.32

ภาวะที่ทดลอง: $[TOA]_m = 2\%$ โดยปริมาตร, $[NaOH]_s = 0.5$ โมลต่อลิตร และ $Q_f = Q_s = 100$
มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-4 ผลของความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายอินทรีย์ต่อการสกัดไอออน
ปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ความเข้มข้นของสารสกัด (% โดยปริมาตร)	Hg _r (II) (ppm)		Hg _s (II) (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก	ขาออก		
0.5	1.25	0.44	0.44	65.00	35.00
1.0	1.25	0.35	0.52	72.00	42.00
1.5	1.25	0.30	0.57	76.00	46.00
2.0	1.25	0.27	0.59	78.00	48.00
2.5	1.25	0.27	0.60	78.50	48.50
3.0	1.25	0.28	0.59	77.00	47.00
3.5	1.25	0.27	0.60	78.00	48.00
4.0	1.25	0.26	0.61	79.00	49.00
4.5	1.25	0.26	0.59	79.50	47.00
5.0	1.25	0.28	0.58	76.00	46.00
5.5	1.25	0.28	0.59	78.00	48.00
6.0	1.25	0.27	0.59	78.40	47.40

ภาวะที่ทดลอง: ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน = 2.5 , [NaOH]_s = 0.5 โมลต่อลิตร และ

$$Q_r = Q_s = 100 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$$

ตารางที่ ข-5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั้วโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ความเข้มข้นของ สารละลาย น้ำกลั้ว โซเดียมไฮดรอกไซด์ (โมลต่อลิตร)	Hg _f (II) (ppm)		Hg _s (II) (ppm)	% การสกัด	% การน้ำกลั้ว
	ขาเข้า	ขาออก	ขาออก		
0.20	1.25	0.45	0.47	65.00	38.00
0.40	1.25	0.35	0.57	72.00	46.00
0.60	1.25	0.30	0.59	76.00	48.00
0.80	1.25	0.27	0.60	78.00	48.50
1.00	1.25	0.27	0.59	78.50	47.80
1.20	1.25	0.28	0.60	77.00	48.20
1.40	1.25	0.27	0.60	78.00	48.30

ภาวะที่ทดลอง: ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน = 2.5, [TOA]_m = 2 % โดยปริมาตร และ

$$Q_f = Q_s = 100 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$$

ตารางที่ ข-6 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัด ไอออนปรอท

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	Hg _r (II) (ppm)		Hg _s (II) (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก	ขาออก		
50	1.25	0.27	0.60	78.00	48.00
100	1.25	0.27	0.60	78.40	48.10
150	1.25	0.38	0.52	69.00	42.00
200	1.25	0.55	0.40	56.00	32.00
300	1.25	0.65	0.30	48.00	24.00
400	1.25	0.72	0.18	42.00	15.00

ภาวะที่ทดลอง: ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน = 2.5, [TOA]_m = 2 % โดยปริมาตร,
[NaOH]_s = 0.5 โมลต่อลิตร และ Q_r = Q_s = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-7 ผลของจำนวนหอสกัดในการสกัดที่มีผลต่อการสกัดไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

เวลา (นาที)	Hg _r (II) (ppm)					% การสกัด 1 หอสกัด	% การสกัด 2 หอสกัด	% การสกัด 3 หอสกัด	% การสกัด 4 หอสกัด
	ขาเข้า	ขาออก 1 หอสกัด	ขาออก 2 หอสกัด	ขาออก 3 หอสกัด	ขาออก 4 หอสกัด				
30	1.25	0.31	0.17	0.10	0.14	75.00	86.20	92.10	88.5
60	1.25	0.27	0.15	0.08	0.06	78.00	88.20	93.20	95
90	1.25	0.27	0.14	0.07	0.03	78.50	88.60	94.60	97.5
120	1.25	0.27	0.14	0.07	0.03	77.80	88.40	94.20	97.8
150	1.25	0.26	0.14	0.06	0.03	78.20	88.10	94.60	97.85
180	1.25	0.27	0.14	0.07	0.03	78.70	88.30	94.50	97.8
210	1.25	0.27	0.14	0.06	0.03	78.10	88.50	94.70	97.83

ภาวะที่ทดลอง: ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน = 2.5, [TOA]_m = 2 % โดยปริมาตร, [NaOH]_s = 0.5 โมลต่อลิตร และ Q_r = Q_s = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-8 ผลของจำนวนหอสกัดในการสกัดที่มีผลต่อการนำกลับ ไอออนปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

เวลา (นาที)	Hgs(II) (ppm)					% การนำกลับ 1 หอสกัด	% การนำกลับ 2 หอสกัด	% การนำกลับ 3 หอสกัด	% การนำกลับ 4 หอสกัด
	ขาเข้า	ขาออก 1 หอสกัด	ขาออก 2 หอสกัด	ขาออก 3 หอสกัด	ขาออก 4 หอสกัด				
30	1.25	0.55	0.59	0.63	0.66	44.2	47.2	51.1	53
60	1.25	0.58	0.66	0.68	0.71	47.2	53.2	54.6	57
90	1.25	0.59	0.68	0.71	0.73	48.5	54.6	57.2	58.5
120	1.25	0.60	0.68	0.72	0.74	47.9	55	57.6	59.2
150	1.25	0.60	0.69	0.71	0.74	48.2	55.4	56.8	59.1
180	1.25	0.60	0.69	0.72	0.74	48.2	54.8	57.4	59.3
210	1.25	0.60	0.69	0.72	0.74	48.6	55	57.2	59.2

ภาวะที่ทดลอง: ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน = 2.5, $[TOA]_m = 2\%$ โดยปริมาตร, $[NaOH]_s = 0.5$ โมลต่อลิตร และ $Q_f = Q_s = 100$ มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข-9 ผลของอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับต่อการสกัดไอออนปรอท

เวลา (นาที)	Hg _r (ppm)		Hg _s (ppm)	% การสกัด	% การนำกลับ
	ขาเข้า	ขาออก	ขาออก		
30	1.25	0.27	0.59	78.60	47.43
60	1.25	0.26	0.60	78.85	48.09
90	1.25	0.26	0.59	78.76	47.89
120	1.25	0.27	0.58	78.75	47.01
150	1.25	0.27	0.55	77.79	44.65
180	1.25	0.32	0.52	73.93	41.99
210	1.25	0.33	0.47	73.16	38.41
240	1.25	0.36	0.39	70.53	31.97
270	1.25	0.38	0.36	69.20	29.44

ภาวะที่ทดลอง: ค่าความเป็นกรด-เบสในสารละลายป้อน = 2.5, [TOA]_m = 2 % โดยปริมาตร, [NaOH]_s = 0.5 โมลต่อลิตร และ Q_r = Q_s = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ภาคผนวก ค

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ก-1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA = 2 % โดยปริมาตร
ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า = 1.248 ppm (mg/l)
ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก = 0.268 ppm (mg/l)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการสกัด} &= \frac{1.248 - 0.268}{1.248} \times 100 \\ &= 78.5 \quad (\text{ดังตารางที่ ข-2}) \end{aligned}$$

ก-2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ

ข้อมูลจากภาคผนวก ข ตารางที่ ข-2 ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA = 2 % โดยปริมาตร
ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก = 0.608 ppm (mg/l)

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการนำกลับ} &= \frac{0.609}{1.248} \times 100 \\ &= 48.85 \quad (\text{ดังตารางที่ ข-2}) \end{aligned}$$

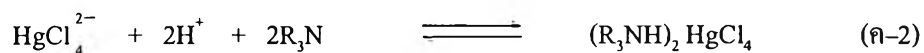
ก-3 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, K_{ex}) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, D)

1. การคำนวณค่าคงที่สมดุล

$$K_{ex} = \frac{[(R_3NH)_2HgCl_4]}{[HgCl_4^{2-}][H^+]^2[R_3N]^2} \quad (\text{ค-1})$$

วิธีการหาค่าความเข้มข้นของสารแต่ละตัว

จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทและข้อมูลที่ภาวะความเข้มข้นของสารสกัด TOA 2 % โดยปริมาตร หรือเท่ากับ 4.5972×10^{-2} โมลต่อลิตร ซึ่งมีข้อมูลดังนี้



$$\text{สารละลายป้อนขาเข้า} = 3.644 \times 10^{-6} \quad \text{โมลต่อลิตร (1.248 ppm)}$$

$$\text{สารละลายป้อนขาออก} = 7.827 \times 10^{-7} \quad \text{โมลต่อลิตร (0.268 ppm)}$$

$$\text{สารละลายป้อนที่หายไปทำปฏิกิริยา} = 3.644 \times 10^{-6} - 7.827 \times 10^{-7} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

$$= 2.862 \times 10^{-6} \quad \text{โมลต่อลิตร}$$

ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายป้อนที่หายไปทำปฏิกิริยาหรือความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน $(\text{R}_3\text{NH})_2 \text{HgCl}_4$ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท มีค่าเท่ากับ 2.862×10^{-6} โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เวลาเริ่มต้นมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{HgCl}_4^{2-} &= \text{ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาเข้า 1.248 ppm} \\ &= 3.644 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}^+ &= \text{ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน} \\ &= 0.1 \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{R}_3\text{N} &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 2 \% โดยปริมาตร} \\ &= 4.5972 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สมดุลมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{HgCl}_4^{2-} &= \text{ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก 0.268 ppm} \\ &= 7.827 \times 10^{-7} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}^+ &= 0.1 - 2 \times (2.862 \times 10^{-6}) \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= 9.99 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{R}_3\text{N} &= 4.5972 \times 10^{-2} - 2 \times (2.862 \times 10^{-6}) \text{ โมลต่อลิตร} \\ &= 4.59 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } [\text{HgCl}_4^{2-}] [\text{H}^+]^2 [\text{R}_3\text{N}]^2 &= (7.827 \times 10^{-7}) \times (9.99 \times 10^{-2})^2 \times (4.59 \times 10^{-2})^2 \\ &= 1.65 \times 10^{-11} \text{ (โมลต่อลิตร)}^5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } [(\text{R}_3\text{NH})_2 \text{HgCl}_4] &= 2.862 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร} \\ \text{และรูปที่ 4.14} \end{aligned}$$

โดยหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท (K_{ex}) ได้จากความชันของกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.338 (ลิตรต่อโมล)⁴

2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

จากสมการสัมประสิทธิ์การกระจาย

$$D = \frac{[(\text{R}_3\text{NH})_2 \text{HgCl}_4]}{[\text{HgCl}_4^{2-}]} = K_{ex} [\text{H}^+]^2 [\text{R}_3\text{N}]^2 \quad (\text{ค-3})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} K_{ex} &= \text{ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท} \\ &= 0.338 \text{ (ลิตรต่อโมล)}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}^+ &= \text{ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน} \\ &= 0.1 \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_3N &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 2 \% โดยปริมาตร} \\ &= 4.5972 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

แทนในสมการที่ ค-3

$$\begin{aligned} D &= 0.338 \text{ (ลิตรต่อโมล)}^4 \times (0.1 \text{ โมลต่อลิตร})^2 \times (4.5972 \times 10^{-2} \text{ โมลต่อลิตร})^2 \\ &= 1.44 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (D) ของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทมีค่าเท่ากับ 1.44×10^{-2}

ก-4 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, P)

จากสมการ

$$V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right) = -AP \frac{\phi}{\phi+1} t \quad (\text{ก-4})$$

โดยที่

$$\phi = \frac{Q_f}{PL\epsilon\pi Nr_i} \quad (\text{ก-5})$$

เมื่อ

P	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	(เซนติเมตรต่อวินาที)
$C_{f,0}$	=	ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)	
C_f	=	ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลา t	(โมลต่อลิตร)
A	=	พื้นที่การถ่ายเทมวล	(ตารางเซนติเมตร)
V_f	=	ปริมาตรของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตร)
Q_f	=	อัตราการไหลของสารละลายป้อน	(ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
L	=	ความยาวของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)
N	=	จำนวนเส้นใยกลวงในมอดูล	(เส้น)
r_i	=	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง	(เซนติเมตร)

$$\varepsilon = \text{ความพรุนของเส้นใยกลวง}$$

$$\pi = 3.1416$$

และรูปที่ 4.15

การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านทำโดยสร้างกราฟระหว่าง $-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right)$ กับเวลา (t) จะ
ได้ความชันของกราฟ คือ $AP \frac{\phi}{\phi+1}$ ซึ่งทำให้หาค่า P หรือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

พิจารณาข้อมูลของไอออนปรอทที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 2 % โดยปริมาตร โดยที่

$$C_{f,0} = 3.644 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร (1.248 ppm)}$$

$$C_f = 7.827 \times 10^{-7} \text{ โมลต่อลิตร (0.268 ppm)}$$

$$t = 3,000 \text{ วินาที}$$

$$A = 1.4 \times 10^4 \text{ ตารางเซนติเมตร}$$

$$V_f = 5,000 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$Q_f = 1.67 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที (100 มิลลิลิตรต่อนาที)}$$

$$L = 20.3 \text{ เซนติเมตร}$$

$$N = 240 \text{ เส้น}$$

$$r_i = 120 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร}$$

$$\varepsilon = 0.3$$

$$\pi = 3.1416$$

จากรูปที่ 4.15 พิจารณาความชันที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 2 % โดยปริมาตร มีค่าเท่ากับ 128.2 ซึ่งก็คือเทอม $AP \frac{\phi}{\phi+1}$ และแทนค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ ค-4 และ ค-5 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{Q_f}{PL\varepsilon\pi Nr_i} \\ &= \frac{1.67 \text{ cm}^3/\text{s}}{P \times (20.3 \text{ cm}) \times (0.3) \times (3.1416) \times (240) \times (120 \times 10^{-4} \text{ cm})} \end{aligned}$$

$$\phi = \frac{0.0303 \text{ cm/s}}{P} \quad (\text{ก-6})$$

แทนค่า ϕ จากสมการที่ ก-6 ลงในเทอม $AP \frac{\phi}{\phi+1} = 128.2$ จะได้

$$128.2 = (1.4 \times 10^4) \times P \times \frac{0.0303}{P} \frac{0.0303}{P} + 1$$

$$P = 1.126 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$$

นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนโปรท (P) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TOA 2 % โดยปริมาตร มีค่าเท่ากับ 1.126×10^{-2} เซนติเมตรต่อวินาที

ก-5 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_i) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (k_m)

จากสมการ

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m [R_3N]^2 [H^+]^2} \quad (\text{ก-7})$$

โดยที่

- P = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
- k_i = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (เซนติเมตรต่อวินาที)
- k_m = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)
- r_i = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
- r_{lm} = รัศมี Log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
- K_{ex} = 1.34×10^5 (ลิตรต่อ โมล)⁴
- $[R_3N]$ = ความเข้มข้นของสารสกัด TOA (โมลต่อลิตร)
- $[H^+]$ = ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในสารละลายป้อน (โมลต่อลิตร)

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนปรอท (P) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด TOA ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในมอดูลของเส้นใยกลวงในหัวข้อ ค-6 สร้างกราฟระหว่าง $\frac{1}{P}$ กับ $\frac{1}{[R_3H]^2[H^+]^2}$ แสดงดังรูปที่ 4.16 สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (k_m) ได้จากความชันของกราฟซึ่งคือเทอม $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m}$ และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_i) ได้จากจุดตัดแกน $\frac{1}{P}$

1. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (k_m)

จากเทอม $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m}$ ซึ่งคือความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ $6.5007 \times 10^{-17} \frac{s/cm}{(cm^3/mol)}$

จากสมการ

$$r_{lm} = \frac{r_o - r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (ค-8)$$

เมื่อ

$$r_o = \text{รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง} = 150 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร}$$

$$r_i = \text{รัศมีภายในของเส้นใยกลวง} = 120 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} r_{lm} &= \frac{150 \times 10^{-4} - 120 \times 10^{-4}}{\ln\left(\frac{150 \times 10^{-4}}{120 \times 10^{-4}}\right)} \\ &= 1.34 \times 10^{-2} \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ในเทอม $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m} = 6.5007 \times 10^{-17} \frac{s/cm}{(cm^3/mol)}$ จะได้

$$\frac{120 \times 10^{-4} \text{ cm}}{1.34 \times 10^{-2} \text{ cm}} \frac{1}{1.34 \times 10^5 \text{ (liters/mol)}^4} \frac{1}{k_m} = 6.501 \times 10^{-17} \frac{\text{s/cm}}{(\text{cm}^3/\text{mol})}$$

$$k_m = 1.028 \text{ cm/s}$$

นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเยื่อแผ่นเหลว (k_m) มีค่าเท่ากับ 1.028 เซนติเมตรต่อวินาที

2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_i)

จากรูปที่ 4.16 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อน (k_i) ได้จากจุดตัดแกน โดยที่จุดตัดแกน $\frac{1}{P}$ มีค่าเท่ากับ 92.706 ซึ่งคือเทอม $\frac{1}{k_i}$ จะได้ว่า

$$\frac{1}{k_i} = 92.706 \text{ s/cm}$$

$$k_i = 0.0108 \text{ cm/s}$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารละลายป้อนที่มีไอออนปรอท (k_i) มีค่าเท่ากับ 0.011 เซนติเมตรต่อวินาที

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์



ชื่อ นายสวัสดิ์ภพ สมบูรณ์ปัญญา
 เกิด วันที่ 27 กรกฎาคม 2526
 ณ. โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ กรุงเทพฯ ฯ
 บิดา-มารดา น.พ.พูลสวัสดิ์ – นางปราณี สมบูรณ์ปัญญา
 การศึกษา

- อนุบาล ประถมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย (พ.ศ.2531-2538)
โรงเรียนวัดดอนไก่อทัยจังหวัดเพชรบุรี
- มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย (พ.ศ.2539-2544)
โรงเรียนพรหมานุสรณ์จังหวัดเพชรบุรี
- วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (พ.ศ.2545-2548)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
- วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (พ.ศ.2549-2550)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี