

การแยกไอออนอาร์ซีนิกโดยการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



นางสาวพรรณนก ประภาสวัสดิ์

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# SEPARATION OF ARSENIC BY USING A HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE



Miss Tatchanok Prapasawat

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006



พรรณชนก ประภาสวัสดิ: การแยกไอออนอาร์ซีนิกโดยการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (SEPARATION OF ARSENIC BY USING HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร. อุรา ปานเจริญ. อ.ที่ปรึกษาร่วม: รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ หล่อทองคำ, 95 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแยกไอออนของอาร์ซีนิก (III) และ อาร์ซีนิก (V) ออกจากสารละลายกรดซัลฟิวริกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้ Cyanex 923 เป็นสารสกัดที่ละลายในโทลูอีน และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ ในการทดลองได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายนำกลับ ในการทดลองได้พบว่าสามารถสกัดแยกอาร์ซีนิก (V) ออกจากสารละลายได้ดีกว่าอาร์ซีนิก (III) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับจะสูงขึ้นเช่นกันจนถึงความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 30% โดยปริมาตร เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับจะสูงที่สุด แต่เมื่อความเข้มข้นของ Cyanex 923 สูงกว่า 30% โดยปริมาตร เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับจะลดลงเพราะเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงเกินไป เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายนำกลับ เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับจะลดลง พบว่าสารละลายนำกลับที่ดีที่สุดคือน้ำ

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของทางด้านสารละลายป้อน ( $k_p$ ) และภายในเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) นั้นใช้ทฤษฎีการถ่ายโอนมวล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายของน้ำ ( $k_f$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ของอาร์ซีนิก (III) เท่ากับ  $7.15 \times 10^{-3}$  และ  $1.61 \times 10^{-2}$  เซนติเมตรต่อวินาที และของอาร์ซีนิก (V) เท่ากับ  $7.28 \times 10^{-3}$  และ  $7.35 \times 10^{-3}$  เซนติเมตรต่อวินาที สังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายของน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายของน้ำ ( $k_f$ ) ของอาร์ซีนิก (V) สูงกว่าของอาร์ซีนิก (III) ดังนั้น จากเหตุผลเหล่านี้ ทำให้กล่าวได้ว่าขั้นตอนควบคุมอัตราการถ่ายโอนมวลคือ การถ่ายโอนมวลของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่สามารถสกัดอาร์ซีนิก (V) ได้ดีกว่าอาร์ซีนิก (III)

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....พรรณชนก ประภาสวัสดิ  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....อ.อรุณ อนุเคราะห์ อนุเคราะห์

## 4770278421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ARSENIC/ LIQUID MEMBRANE/ HOLLOW FIBER/ MASS TRANSFER

TATCHANOK PRAPASAWAT: SEPARATION OF ARSENIC BY USING HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D. Eng. Sc., THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. ANCHALEPORN W. LOTHONGKUM, D. Eng., 95 pp.

The separation of As (III) and As (V) from sulphate media by hollow fiber supported liquid membrane has been investigated. Cyanex 923 was diluted in toluene and used as an extractant. Sodium hydroxide solution was used as a stripping solution. The influence of sulfuric acid concentration in feed solution, Cyanex 923 concentration and sodium hydroxide concentration in stripping solution were examined. The extractability of As (V) is higher than As (III). The percentages of extraction and stripping were enhanced when the sulfuric acid concentration in feed solution increased same as when Cyanex 923 concentration in liquid membrane increased. The maximum percentage of extraction and stripping were obtained when Cyanex 923 concentration reached 30% (v/v) and decreased afterwards. This is because of the higher viscosity of the liquid membrane. The percentages of extraction and stripping were decreased when sodium hydroxide concentration in stripping solution increased. Water found to be the best stripping solution.

The mass transfer coefficients of the aqueous phase ( $k_f$ ) and organic phase ( $k_m$ ) were calculated. The mass transfer coefficient of aqueous phase and organic phase are  $7.15 \times 10^{-3}$  and  $1.61 \times 10^{-2}$  cm/s for As (III), and  $7.28 \times 10^{-3}$  and  $7.35 \times 10^{-3}$  cm/s for As (V). The mass transfer coefficient of aqueous phase is higher than that of organic phase. Therefore, the rate controlling step is the diffusion of arsenic ions through the film layer between feed solution and the liquid membrane. The calculated mass transfer coefficients agree with the experimental results of greater extraction of As (V) than As (III)

Department.....Chemical Engineering.....Student's signature.....*ทช. ทช.พรพาสาวต*  
Field of study....Chemical Engineering.....Advisor's signature.....*U. Pancharoen*  
Academic year.....2006.....Co-advisor's signature.....*อ.ว. Lothongkum*



## กิตติกรรมประกาศ

หลังจากที่ได้มูมานะหมั่นเพียรในการเรียน และการทำวิทยานิพนธ์มาร่วม 3 ปี มีทั้งอุปสรรคและปัญหามากมายที่ต้องให้ฝ่าฟันและแก้ไข แต่ในที่สุดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็สำเร็จลุล่วงไปได้ ความสำเร็จนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ อนุเคราะห์จากบุคคลหลาย ๆ ท่านที่มีพระคุณ ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างมากจึงขอกล่าวขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา และรองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่มีประโยชน์มากมาย อีกทั้งยังอบรม สั่งสอน ตักเตือนข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษาในวันนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐชนัญ ลิขิตพัฒน์ไพบูลย์ ที่ให้คำแนะนำและความรู้ต่าง ๆ ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์นี้

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคคลที่มีความสำคัญมากต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ซึ่งจะขาดไม่ได้เลย ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวรอาจารย์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐชนัญ ลิขิตพัฒน์ไพบูลย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนเพื่อใช้ในการวิจัย และศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์

นอกจากบุคคลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณประกร รามกุล เพื่อน ๆ และน้อง ๆ จากห้องวิจัย **Mass Separation** ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และเป็นທີ່ปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ ตลอดระยะเวลา 3 ปีที่มา และท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ความสำเร็จที่เกิดขึ้นของข้าพเจ้าจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลยหากขาดคุณพ่อและคุณแม่ ขอขอบพระคุณอย่างสูงที่ได้ให้กำเนิด คอยเลี้ยงดู อบรม สั่งสอน และสนับสนุนในการศึกษาของข้าพเจ้า ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จได้ในวันนี้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
สัญลักษณ์.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.1.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับอาร์ซีนิก.....	2
1.1.1.1 สมบัติของอาร์ซีนิก.....	2
1.1.1.2 การใช้ประโยชน์.....	3
1.1.1.3 ความเป็นพิษ.....	4
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	5
1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดอาร์ซีนิก.....	5
1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลว.....	7
1.3 วัตถุประสงค์.....	10
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	10
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ.....	11
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	12
2.1 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว.....	12
2.1.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process).....	13
2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane).....	15

21.21	เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง (Flat Sheet Supported Liquid Membrane).....	16
21.22	เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Spiral-type Supported Liquid Membrane).....	16
21.23	เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane; HFSLM).....	17
21.3	เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane).....	20
22	ชนิดของสารสกัด.....	23
221	สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant).....	23
222	สารสกัดชนิดด่าง (Basic Extractant).....	24
223	สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral Extractant).....	25
23	กลไกการถ่ายโอนมวล.....	25
231	การถ่ายเทแบบสวนทาง (Counter-Transport).....	26
232	การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport).....	27
24	ทฤษฎีการคำนวณแบบจำลองการถ่ายโอนมวล.....	29
241	การหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ( $K_{ex}$ ).....	29
242	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient).....	29
243	การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient).....	30
244	แบบจำลองการถ่ายโอนมวลและการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Coefficient).....	30
บทที่ 3	สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีทดลอง.....	34
31	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	34
32	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
33	วิธีการทดลอง.....	37



331	ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก.....	37
332	ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด (Cyanex 923) ต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก.....	38
333	ศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับ ไอออนอาร์ซีนิก.....	39
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	41
41	ผลที่ได้จากการทดลอง.....	41
41.1	ผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนผลต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก.....	41
41.2	ผลของความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก.....	42
41.3	ผลของความเข้มข้นและชนิดของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับ ไอออนอาร์ซีนิก.....	44
41.31	ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับ ไอออนอาร์ซีนิก.....	44
41.32	ผลของชนิดสารละลายนำกลับระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำบริสุทธิ์ต่อการนำกลับไอออนอาร์ซีนิก โดยที่แปรผันค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน.....	45
41.33	ผลของชนิดสารละลายนำกลับระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำบริสุทธิ์ที่มีต่อการนำกลับ ไอออนอาร์ซีนิก ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 ค่าต่าง ๆ.....	47
42	การนำผลการทดลองที่ได้มาประยุกต์กับทางทฤษฎี.....	48
42.1	การคำนวณค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant, $K_{ex}$ ) และสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, $D$ ).....	48

422 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, P).....	50
423 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ (k) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว (k <sub>m</sub> ).....	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	55
51 สรุปผลการทดลอง.....	55
52 ข้อเสนอแนะ.....	56
รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก (ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ).....	64
ภาคผนวก ข (แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา).....	68
ภาคผนวก ค (ตัวอย่างการคำนวณ).....	71
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	80

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
21	22
31	34
32	36
41	52
และไอออนอาร์ซีนิก (V) ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร.....	52
ก.1	64
ต่อการสกัดและการนำกลับ.....	64
ก.2	65
ต่อการสกัดและการนำกลับ.....	65
ก.3	66
โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดและการนำกลับ.....	66
ก.4	67
การซึมผ่านที่ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกต่าง ๆ.....	67

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
21 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ.....	13
22 วิธีการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน.....	14
23 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นบาง.....	16
24 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน.....	17
25 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง.....	18
26 ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารป้อนและสารละลายนำกลับ เมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลางหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว ที่พองด้วยเส้นใยกลาง.....	19
27 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต.....	20
28 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของไอออนโลหะและไอออน ไฮโดรเนียมของการถ่ายเทแบบสวนทาง.....	27
29 แผนผังทิศทางการถ่ายเทของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียม ของการถ่ายเทแบบทางเดียวกัน.....	28
210 แผนผังการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว.....	31
31 อุปกรณ์ชุด <b>Liqui-Cel® Laboratory</b> ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
32 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลาง <b>Celgard® x-30 240 Microporous Polypropylene Hollow Fibers</b> .....	36
33 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว ( <b>One-Through Mode</b> ).....	40
41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน กับเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนอาร์ซีนิก (III) และไอออนอาร์ซีนิก (V).....	42
42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด <b>Cyanex 923</b> ในตัวทำละลาย โทลูอีนกับเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนอาร์ซีนิก (III) และไอออนอาร์ซีนิก (V).....	43
43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์กับเปอร์เซ็นต์การนำกลับ ไอออนอาร์ซีนิก (III) และไอออนอาร์ซีนิก (V).....	45

44	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนกับ เปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนอาร์ซีนิก (III) และไอออนอาร์ซีนิก (V) เปรียบเทียบ เปอร์เซ็นต์การนำกลับของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำบริสุทธิ์.....	46
45	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 ใน สารละลายเยื่อแผ่นเหลวกับเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนอาร์ซีนิก (III) และไอออนอาร์ซีนิก (V) เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การนำกลับของสารละลายนำกลับ โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำบริสุทธิ์.....	47
46	ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เริ่มต้นปฏิกิริยากับ สุดท้ายของปฏิกิริยาของไอออนอาร์ซีนิก (III) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 เท่ากับ 30% โดยปริมาตร และใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ.....	49
47	ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เริ่มต้นปฏิกิริยากับ สุดท้ายของปฏิกิริยาของไอออนอาร์ซีนิก (V) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 เท่ากับ 30% โดยปริมาตร และใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ.....	50
48	ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln(C_f/C_{f0})$ ของไอออนอาร์ซีนิก (III) ในสารละลายป้อน กับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดซัลฟิวริก.....	51
49	ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln(C_f/C_{f0})$ ของไอออนอาร์ซีนิก (V) ในสารละลายป้อน กับเวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดซัลฟิวริก.....	51
410	ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน $1/P$ และ ฟังก์ชัน $1/[H^+]$ ของไอออนอาร์ซีนิก (III).....	53
411	ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน $1/P$ และ ฟังก์ชัน $1/[H^+]$ ของไอออนอาร์ซีนิก (V).....	54
ค.1	ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เริ่มต้นปฏิกิริยากับสุดท้าย ของปฏิกิริยาของไอออนอาร์ซีนิก (III) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 เท่ากับ 30% โดยปริมาตร และใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ.....	73
ค.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln(C_f/C_{f0})$ ของไอออนอาร์ซีนิก (III) ใน สารละลายป้อนกับเวลาที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกต่าง ๆ.....	75
ค.3	ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน $1/P$ และ ฟังก์ชัน $1/[H^+]$ ของไอออนอาร์ซีนิก (III).....	78



## สัญลักษณ์

## สัญลักษณ์

$d$	เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกลวง
$D$	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ( <b>Distribution Coefficient</b> )
$D'$	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ( <b>Diffusion Coefficient</b> )
$[H^+]$	ความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเนียม
$K_{ex}$	ค่าคงที่สมดุลของการสกัด
$k_B$	ค่าคงที่ <b>Boltzmann</b>
$k_f$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ
$k_m$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว
$k_g$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำกลับ
$L$	ความยาวของเส้นใยกลวง
$l$	ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว
$M$	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ
$P$	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ( <b>Permeability Coefficient</b> )
$Q_f$	อัตราการไหลของสารละลายป้อน
$r$	รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน
$r_i$	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง
$r_m$	รัศมี <b>Log-mean</b> ของเส้นใยกลวง
$S$	สารสกัดชนิดโซลเวท
$T$	อุณหภูมิของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
$t$	เวลา
$V_f$	ปริมาตรของสารละลายป้อน

## อักษรกรีก

<i>e</i>	ความพรุนของเส้นใยกลวง
<i>p</i>	ค่าคงที่ในสมการของ <b>Stokes</b> และ <b>Einestien</b> มีค่าเท่ากับ <b>3.1416</b>
<i>h</i>	ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว

## ตัวห้อย

<i>i</i>	สารละลายน้ำ
<i>f</i>	สารละลายป้อน
<i>s</i>	สารละลายนำกลับ
<i>m</i>	สารละลายเยื่อแผ่นเหลว
<i>if</i>	ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
<i>is</i>	ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

ในการขุดเจาะน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติในประเทศไทยจะสังเกตได้ว่าโดยทั่วไปจะมีน้ำที่ถูกดูดขึ้นมาพร้อมกับน้ำมันและก๊าซธรรมชาติประมาณ 200 บาร์เรลต่อวัน ซึ่งมีโลหะหนักเจือปนมาในปริมาณที่สูง เช่น สารปรอท อาร์ซีนิก และสารไฮโดรคาร์บอน ที่อันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย (ส่วนใหญ่สารประกอบของอาร์ซีนิกอยู่ในรูป As(III) และ As(V)) มีปริมาณสูงถึง 16,400 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) ซึ่งมีอันตรายอย่างมากหากได้รับเข้าสู่ร่างกาย ปริมาณอาร์ซีนิกที่คนได้รับถึงขั้นเสียชีวิตอยู่ในช่วง 1.5 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม สำหรับ Arsenic Trioxide และ 500 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม สำหรับ Diethyl Arsenic Acid อาการพิษเฉียบพลัน คือ อาเจียน ท้องเสีย ปวดท้อง กล้ามเนื้อเกร็ง มีอาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ และเสียชีวิตจากการทำงานล้มเหลวของหัวใจ ถ้าได้รับอาร์ซีนิกในระดับเกินค่ามาตรฐาน (0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) อาจเกิดอาการเป็นพิษอาร์ซีนิกเรื้อรัง ได้แก่ ผิวหนังเปลี่ยนสีที่เป็นลักษณะเฉพาะโรค มีจุดสีน้ำตาลกระดำกระด่าง จุดขาว ๆ กระจุกกระจาย ผิดค่า/เทา ตามฝ่ามือฝ่าเท้า เป็นพื้นที่ตุ่มตามฝ่ามือฝ่าเท้า มีปัญหาทางระบบเส้นโลหิต ระบบประสาท ระบบเลือด รวมทั้งมะเร็งอวัยวะภายในในบางกรณี อีกทั้งยังส่งผลต่อระบบการเผาผลาญ และตายเนื่องจากหัวใจวาย (กิตติพงษ์ เชิญวัฒนชัย, 2543; Bhumik et al., 2004) (นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาในการขนถ่ายไปยังลูกค้าและพื้นที่ในการกักเก็บ) ดังนั้น จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องโลหะหนักที่เจือปนก่อนปล่อยน้ำจากหลุมขุดเจาะน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติลงสู่ทะเล เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวได้มีผู้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดโลหะหนักโดยกระบวนการกรอง เช่น เมมเบรนชนิด Ultrafiltration, Reverse Osmosis และอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมมเบรนชนิด Reverse Osmosis ลดปริมาณของอาร์ซีนิกในน้ำได้ถึง 90-95 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม การใช้เมมเบรนชนิด Reverse Osmosis นั้นมีข้อจำกัดเนื่องจากการเสื่อมสภาพจากการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันในน้ำ

เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการสกัดแบบคัดเลือกและเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สนใจ เช่น ไอออนโลหะจากสารละลายเจือจาง เป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย มีค่าการถ่ายโอนมวลที่สูง มีค่าการคัดเลือกผ่านสูง ประหยัดพลังงาน และใช้สารสกัดในปริมาณที่น้อยให้ประสิทธิภาพสูง (ประกร, 2544; Sheng et al., 2004) การสกัดแบบคัดเลือกของไอออนโลหะได้รับความนิยมอย่างมากจากกลุ่มผู้ศึกษาด้านกระบวนการทางโลหวิทยา เทคนิคเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับได้รับการพิจารณาให้เป็น

กระบวนการที่สำคัญในการประยุกต์ใช้เพื่อนำกลับและแยกไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ ออกจากสารละลายด้วยข้อดีหลายประการของเทคนิคนี้ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำมาใช้ในการแยกและนำกลับอาร์ซีนิก ซึ่งวัตถุประสงค์ของการนำกลับมิใช่เพียงเพื่อนำเอาอาร์ซีนิกกลับมาใช้ใหม่เท่านั้น แต่ยังเป็นการกำจัดมลพิษอีกด้วย

ในการกำจัดอาร์ซีนิกโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้น จะกำจัดอาร์ซีนิกให้มีปริมาณของอาร์ซีนิกไม่เกินตามค่ามาตรฐาน ซึ่งได้กำหนดให้มีปริมาณอาร์ซีนิกไม่เกิน 250 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) สารปรอทไม่เกิน 10 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) และสารไฮโดรคาร์บอนไม่เกิน 40 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) (กิตติพงษ์ เชิญวัฒนชัย, 2543)

### 1.1.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับอาร์ซีนิก (กรมควบคุมมลพิษ, 2541(ก))

#### 1.1.1.1 สมบัติของอาร์ซีนิก

- เป็นธาตุหมู่ 5 ในตารางธาตุ จัดเป็นธาตุในกลุ่มทรานซิชัน
- มีน้ำหนักอะตอม 74.92 เลขอะตอม 33
- ระเหยเป็นไอที่อุณหภูมิ 100°ซ
- ระเหยได้เร็วมากที่อุณหภูมิ 450°ซ
- ระเหิดได้ที่ 615°ซ บรรยากาศ 760mmHg โดยไม่มีการหลอมเหลวก่อน
- ไม่ละลายน้ำ
- ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถันที่เย็นหรือกรดเกลือที่เย็น
- มีลักษณะเป็นผลึกโลหะมันเงามีสีเงินเทาเทา
- เปราะ หักง่าย
- เมื่อถูกความร้อนในอากาศสามารถเปลี่ยนเป็นสีดำ
- เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นอาร์ซีนิกไตรออกไซด์ (Arsenic Trioxide, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

สารประกอบอาร์ซีนิกแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ 1. สารประกอบอนินทรีย์ 2. สารประกอบอินทรีย์ และ 3. ก๊าซอาร์ซีน (**Arsine, AsH<sub>3</sub>**) ก๊าซอาร์ซีนนั้นมีความเป็นพิษสูงสุด จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโลหิต เกิดภาวะโลหิตจาง สารประกอบอนินทรีย์มีความเป็นพิษรองลงมาจากก๊าซอาร์ซีน สารประกอบอนินทรีย์ที่พบมากมีอยู่ 2 รูป คือ อนุมูลประจุ +3 หรืออาร์เซไนต์ (**Trivalent Form, Arsenite**) และ +5 หรืออาร์เซเนต (**Pentavalent Form, Arsenate**) โดยอนุมูลประจุ +3 หรืออาร์เซไนต์จะมีความเป็นพิษรุนแรงมากกว่าอนุมูลประจุ +5

### 1.1.1.2 การใช้ประโยชน์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541(พ))

#### ทางด้านเกษตร

- สารเคมีป้องกันและกำจัดแมลง
- สารกำจัดวัชพืช (**Herbicides**)
- สารดูดความชื้น ป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของฝ้าย
- น้ำยารักษาเนื้อไม้ (**Wood Preservatives**)
- ผสมในอาหารสัตว์ (**Feed Additives**)

#### ทางด้านอุตสาหกรรม

- ใช้ผสมกับโลหะอื่น เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นโลหะอัลลอยด์หรือโลหะผสม เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน
- ใช้เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (**Semi-conductor**)
- ใช้เป็นสารให้สีแดงหรือไม่มีสีในผลิตภัณฑ์แก้ว
- ใช้เป็น **Silver Reducer** ในอุตสาหกรรมกระจกเงา
- ใช้ **Heterocyclic Arsenic Compound (Derivatives of 5,10-Dehydrophenarsazine and Phenoksarazine)** เป็น **Antifouling Paints**
- ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง



- ใช้ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก **Polyephynes, Polyvinylchloride, Polybenzimidazole**
- สารประกอบอินทรีย์อาร์ซีนิกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตพลาสติก

#### ทางการแพทย์

ใช้เป็นส่วนประกอบของยารักษาโรคทั้งในคนและสัตว์ สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากโปรโตซัว (**Protozoal Diseases**) โรคที่เกิดจากพยาธิบางชนิด (**Helminthiasis**) รวมทั้งโรคที่เกิดจากพวกสไปโรจิต (**Spirochete**)

#### ทางด้านทหาร

ใช้เป็นสารพิษในการทำสงคราม หรือยับยั้งการก่อจลาจล ซึ่งก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและเยื่อเมือก (**Mucous Membrane**)

### 1.1.1.3 ความเป็นพิษ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541(จ))

#### ความเป็นพิษต่อสัตว์

จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่า **Trivalent Inorganic** มีความเป็นพิษมากกว่า **Pentavalent** และสารประกอบที่ละลายน้ำได้ จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ เพราะสารประกอบที่ละลายน้ำได้จะทำให้เกิดการดูดซึมเข้าร่างกายได้ดี พิษที่เกิดขึ้นจะไปยับยั้งการทำงานของ **SH-group** ในเอนไซม์

#### ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ลักษณะการเกิดพิษเนื่องจากอาร์ซีนิกส่วนใหญ่เป็นการเกิดพิษแบบเรื้อรังจากการสัมผัสสารอาร์ซีนิกเข้าสู่ร่างกายนานติดต่อกัน ซึ่งอาการที่แสดงออกทางระบบต่าง ๆ แยกเป็นดังนี้

- ที่ผิวหนังส่วนที่สัมผัสจะเกิดการระคายเคือง เกิดเป็น โรคผิวหนัง โดยเฉพาะผิวหนังที่อยู่ตามซอกต่าง ๆ บางทีจะเป็นตุ่มใส ๆ หรือผิวหนังแข็งด้าน

- ที่เยื่อเมือก เมื่อสัมผัสฝุ่นผง หรือก๊าซจะทำให้เกิดการระคายเคืองตรงส่วนนั้น
- ตา จะเกิดตาแดง ตาอักเสบ
- ระบบหายใจ ทำให้หลอดลมเกิดการอักเสบ อาจจะมีผลทำให้เกิดมะเร็งปอด
- ระบบประสาท จะเกิดอาการเบื่ออาหาร ปลายประสาทอักเสบ แขนขาชา อาจเป็นอัมพาตได้
- สมอ จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อสมอ กระสับกระส่าย ความจำเสื่อม
- อื่น ๆ เช่น เกิดโลหิตจาง อาการทางตับ ไต

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

### 1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดอาร์ซีนิก

**Wisniewski (1997)** ศึกษาการสกัดแยกอาร์ซีนิก (III) และอาร์ซีนิก (V) จากสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 50-200 กรัมต่อลิตร ด้วยการใช้ความเข้มข้น 50เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร Cyanex 923 ละลายใน Exxsol 220/230() ที่ Cyanex 923 มีประสิทธิภาพในการสกัดทั้งอาร์ซีนิก (III) และอาร์ซีนิก (V) พบว่าการสกัดแยกอาร์ซีนิก (III) และอาร์ซีนิก (V) มีค่าสูงเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนสูงขึ้น และใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับอาร์ซีนิกและกรดซัลฟิวริก

**Bogacki, Wisniewski และ Szymanowski (1998)** ศึกษาการสกัดอาร์ซีนิก (V) จากสารละลายกรดซัลฟิวริกด้วยการเปรียบเทียบการแปรผันของสารสกัดในระบบการสกัดและการนำกลับแบบไหลสวนทางกันในหลายขั้นตอน ความสามารถในการสกัดของสารสกัด คือ ENIM 100 > TBP = CYANEX 923 > 2-Methalhexanol การสกัดขึ้นอยู่กับจำนวนขั้นตอนและอัตราส่วนเฟสในการสกัด แต่จำนวนขั้นตอนการนำกลับและอัตราส่วนเฟสในการนำกลับมีผลกระทบน้อยมาก

**Wisniewski (1998)** ศึกษาการสกัดแยกอาร์ซีนิค (III) และอาร์ซีนิค (V) จากสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 50-200 กรัมต่อลิตร ด้วยการใช้ **Cyanex 923** ความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ละลายใน **Exxsol 220/230** การสกัดทั้งอาร์ซีนิค (III) และอาร์ซีนิค (V) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สมดุลภายใน 5 นาที ไอโซเทอมของการสกัดอาร์ซีนิค (III) และอาร์ซีนิค (V) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของกรดซัลฟิวริกหาค่าได้ โดยใช้แบบจำลองเป็นระบบการไหลแบบสวนทางในหลายขั้นตอน ซึ่งอาร์ซีนิคสามารถถูกนำกลับได้ด้วยน้ำ

**Longquan, Ping Wenzhong และ Yadong (1999)** ศึกษาเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันซึ่งประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิว **L 113A** พาราฟินเหลว ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เสถียร (Stabilizer) และเคโรซีนเป็นตัวทำละลาย โดยมีกรดไฮโดรคลอริกเป็นวัฏภาคภายนอก และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัฏภาคภายใน ซึ่งนำมาใช้ในการแยกอาร์ซีนิค (III) และอาร์ซีนิค (V) และตรวจสอบด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยใช้ **AgDDTC** และพบว่าความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก 8 โมลต่อลิตร สามารถนำกลับอาร์ซีนิค (III) ได้ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นการลดรูปของอาร์ซีนิค (V) ไปเป็นอาร์ซีนิค (III) ด้วยโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่เพียงพอ จะสามารถคำนวณหาปริมาณของอาร์ซีนิคทั้งหมดได้ **RSD** ของอาร์ซีนิค (III) และอาร์ซีนิคทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ โดยขั้นตอนการนำสารละลายของน้ำมาใช้และพบว่าสามารถนำกลับอาร์ซีนิคได้ในช่วงร้อยละ 93.5-101

**Alguacil et al. (2001)** ศึกษาการซึมผ่านของทองผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบแผ่นบาง โดยใช้สารสกัดที่เป็น **Cyanex 923** ที่ละลายอยู่ในนอร์มอลโตนเดคเคนเป็นสารสกัด มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะอธิบายจลนพลศาสตร์ของการถ่ายเทมวล ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลายป้อน ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเร็วมากที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว และการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอธิบายอัตราการถ่ายโอนมวล ค่าการซึมผ่านของ **Au(III)** ต่อโลหะกลุ่มแพลทินัมจะมีค่าสูง

**Iberhan และ Wisniewski (2001)** ได้ใช้ **Cyanex 925, Cyanex 301** และสารผสมระหว่าง **Cyanex 925** กับ **Cyanex 301** สกัดแยกอาร์ซีนิค (III) และอาร์ซีนิค (V) จากสารละลายกรดซัลฟิวริก ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดขึ้นอยู่กับชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก และสารละลายผสม ซึ่งประสิทธิภาพของการสกัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน โดยที่ **Cyanex 925** ใช้สกัดแยกอาร์ซีนิค (V) ได้ดี ในขณะที่ **Cyanex 301** และสารผสมระหว่างสารทั้งสองใช้สกัดแยกอาร์ซีนิค (III) ได้ดี

อาร์ซีนิก (III) และอาร์ซีนิก (V) สามารถนำกลับได้ด้วยน้ำออกจาก **Cyanex 925** ในหลายขั้นตอน ในขั้นตอนแรกกรดซัลฟิวริกมักถูกนำกลับออกมาก่อน การนำกลับองค์ประกอบของอาร์ซีนิกด้วยน้ำเมื่อใช้สารสกัด **Cyanex 301** และสารผสมระหว่าง **Cyanex 925** และ **Cyanex 301** ไม่มีประสิทธิภาพ

กิตติพงษ์ เชิญวัฒนชัย (2543) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากหลุมก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการกรอง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการกรองเป็นเมมเบรนชนิด อัลตราฟิวเตรชันและรีเวิร์สออสโมซิส นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน ซึ่งใช้ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในน้ำ ก่อนส่งเข้าหน่วยบำบัด จากการทดลองพบว่าเมมเบรนชนิดอัลตราฟิวเตรชัน สามารถลดปริมาณน้ำมันและสารปรอทได้มากกว่าร้อยละ 98 เมมเบรนชนิดรีเวิร์สออสโมซิส สามารถลดปริมาณอาร์ซีนิกในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 90-95 อย่างไรก็ตาม น้ำทิ้งจากการบำบัดยังมีคุณภาพไม่ดีพอตามค่ามาตรฐานของบริษัทยูโนแคลที่กำหนดปริมาณอาร์ซีนิกไม่เกิน 250 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) การใช้งานของเมมเบรนชนิดอัลตราฟิวเตรชัน ถูกจำกัดโดยการสะสมตัวของปริมาณอนุภาคแขวนลอยที่อุดตันเยื่อกรอง เมมเบรนชนิดรีเวิร์สออสโมซิส มีการเสื่อมสภาพจากการสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันในน้ำ นอกจากนี้ การทดสอบยังพบว่าเมมเบรนชนิดอัลตราฟิวเตรชัน สามารถให้ค่าการซึมผ่านมากกว่าร้อยละ 98 ของค่าตั้งต้น และเมมเบรนชนิดรีเวิร์สออสโมซิส ให้ค่าการซึมผ่านประมาณร้อยละ 50

## 1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลว

Breembroek et al. (1998) ศึกษาการสกัดไอออน โลหะทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว โดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารสกัดที่ใช้สำหรับทองแดงใช้ **Lix 84-I** สำหรับแคดเมียมและตะกั่วคือใช้ **Alamine 804-I** งานวิจัยนี้มุ่งที่จะศึกษาการถ่ายโอนมวลในรูปแบบของค่าการซึมผ่าน ซึ่งค่าการซึมผ่านจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารละลาย ค่าการซึมผ่านที่วัดได้มีค่า  $6.9 \times 10^6$  เมตรต่อวินาที วัดที่อัตราการไหล 0.076 เมตรต่อวินาที ผ่านเส้นใยกลวง ค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองจะถูกเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับกรณีการไหลของสารละลายป้อนไหลในทางด้านท่อ ค่าการซึมผ่านที่ได้จากการคำนวณจะมีค่ามากกว่าค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองเป็นสามเท่า ในขณะที่กรณีสารละลายป้อนไหลในทางด้านเปลือก ค่าการซึมผ่านที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าน้อยกว่าค่าการซึมผ่านที่ได้จากการทดลองเป็นแปดเท่า อัตราการสกัดแคดเมียมจากสารละลายคลอไรด์จะถูกจำกัดด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร ของ **Alamine 804-I** ค่าการซึมผ่านที่วัดได้มีค่า  $4.0 \times 10^6$  เมตรต่อวินาที อัตราการสกัดจะสูงขึ้นเมื่อแคดเมียมถูกสกัดมา

จากสารละลายผสมของแคดเมียมคลอไรด์ที่มีกรดฟอสฟอริกและกรดซัลฟิวริกผสมอยู่ อัตราการสกัดของตะกั่วจะมีค่าน้อยกว่าเป็นยี่สิบเท่าของแคดเมียมเนื่องมาจากสารสกัดมีค่าพีเอ็นดีสำหรับตะกั่วต่ำ

**Ramakul P. and Pancharoen U. (2003)** ศึกษาการแยกไอออนของธาตุแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง พบว่านอกจากจะสามารถแยกธาตุแลนทานัมและนีโอติเมียมออกจากกันได้แล้ว ยังเป็นครั้งแรกที่นำการสกัดแบบเสริมฤทธิ์มาใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในการทดลองจะใช้สารสกัดสองชนิดมาผสมกัน คือ **HITA** และ **TOA** ละลายในเบนซีน และพบว่าที่ความเข้มข้นของ **HITA 0.01** โมลต่อลิตร และ **TOA 3** เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร และค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายป้อน **2.5** จะได้เปอร์เซ็นต์การสกัดสูงที่สุด

**Ramakul P. et al. (2004)** ศึกษาการแยกไอออนผสมของธาตุทองแดง โครเมียม และสังกะสี ออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในกระบวนการแยกใช้เยื่อแผ่นเหลวสองโมดูลและไหลผ่านครั้งเดียว โมดูลแรกจะสกัดทองแดงออกด้วย **LIX 84** โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายนำกลับและโมดูลที่สองจะสกัดโครเมียมออกด้วย **Aliquat 336** โดยมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ และเหลือแต่สังกะสีออกมาทาง **Raffinate** ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจนถึง **0.5** โมลต่อลิตร ทั้งสองสารสกัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ดีที่สุดของสารละลายป้อนคือ **2.5** สามารถแยกทองแดงได้ **33** เปอร์เซ็นต์ และโครเมียม **92** เปอร์เซ็นต์

**Pancharoen U. et al. (2005)** ศึกษาการแยกไอออนของธาตุแลนทานัมและซีเรียมออกจากกันด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้สารสกัด **TOA** ดึงเอาซีเรียมออกและทิ้งไอออนของแลนทานัมไว้ ในการแยกนั้นสามารถแยกธาตุซีเรียมออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ ทางด้านสารละลายป้อนเป็นสารละลายของกรดซัลฟิวริกและสารละลายนำกลับจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนตจากการทดลองจะได้ภาวะที่ดีที่สุด คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเป็น **0.2** โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของ **TOA** เท่ากับ **5** เปอร์เซ็นต์ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนตเท่ากับ **1** โมลต่อลิตร สามารถแยกซีเรียมได้ **67** เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีแลนทานัมติดออกมาด้วย

**Ramakul P. et al. (2005)** ได้แยกไอออนของธาตุในอนุกรมแลนทานาในดัชนี **Trivalent** ออกจากชนิด **Tetravalent** โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สารละลายป้อนประกอบด้วยไอออนของซีเรียม (**Ce (IV)**) ซึ่งเป็นไอออนชนิด **Tetravalent** และไอออนของ



นีโอดิเมียม (Nd (III)) ซึ่งเป็นไอออนชนิด **Trivalent** ใช้ TOA เป็นสารสกัด และใช้สารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็นสารละลายนำกลับ จากการทดลองพบว่าสามารถแยกไอออน **Tetravalent** ได้ถึง 71 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ไอออน **Trivalent** ไม่ได้โดนแยกมาด้วยเลย ภาวะที่ดีที่สุดคือความเข้มข้นของ TOA เท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร

**Ramakul P. et al. (2006)** ทดลองแยกไอออนของซีเรียมจากสารละลายซัลเฟตโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ใช้ TOA เป็นสารสกัด และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ งานวิจัยนี้เน้นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการถ่ายโอนมวลมาใช้ในการทำนายผลการทดลอง สามารถหาค่าคงที่การถ่ายเทมวลของทางด้านสารละลายป้อนและทางด้านเยื่อแผ่นเหลวออกมาได้เท่ากับ  $9.47 \times 10^2$  และ 6.303 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ แสดงว่าขั้นตอนที่ควบคุมการถ่ายเทมวล คือ การถ่ายเทมวลจากสารละลายป้อนไปยังเยื่อแผ่นเหลว สมการที่ใช้คำนวณสามารถทำนายผลการทดลองได้เป็นที่น่าพอใจ

**Ramakul P. et al. (2006)** ศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนของโคบอลต์ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้ D2EHPA ที่ละลายในเคโรซีนเป็นสารสกัด และใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายนำกลับ ตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ความเข้มข้นของสารสกัด ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทฤษฎีการถ่ายเทมวลมาหาค่าการซึมผ่าน (Permeability) พบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับค่าที่คำนวณออกมาทางทฤษฎี และจากการคำนวณพบว่าขั้นตอนที่ควบคุมการถ่ายเทมวลคือขั้นตอนการแพร่ของไอออนในสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ

**Patthaveekongka W. et al. (2003)** ทดลองนำธาตุแพลลาเดียมที่ได้จากน้ำทิ้งในกระบวนการแปรรูปทองคำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ในการทดลองใช้สารสกัดสองชนิดผสมกัน คือ Thionidazine HCl กับกรดโอเลอิกละลายในคลอโรฟอร์ม และใช้ Sodium Nitrite เป็นสารละลายนำกลับ จากการทดลองพบว่า จะแยกธาตุแพลลาเดียมออกมาได้มากที่สุดเมื่อใช้ความเข้มข้น Thionidazine HCl 0.0005 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นกรดโอเลอิก 0.05 โมลต่อลิตร สามารถแยกแพลลาเดียมได้ 29.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดลองให้สารละลายป้อนไหลผ่าน 3 รอบ สามารถแยกแพลลาเดียมได้ 65 เปอร์เซ็นต์

**Patthaveekongka W. et al. (2006)** ได้นำทฤษฎีของสมดุลของปฏิกิริยาการสกัดมาใช้กับเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยเน้นที่สมดุลที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสของสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว วิธีการทำโดยใช้การวาดกราฟตามทฤษฎีของ Henry's laws เพื่อหาสมดุลและ

ทำนายผลการทดลอง หลังจากนั้นจึงนำมาเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง พบว่าเป็นที่น่าพอใจ ไอออนของธาตุที่นำมาทดลองคือ แลนทานัม ซีเรียม นีโอดิเมียม และแพลลาเดียม ที่ความเข้มข้นต่ำมาก (ประมาณ 100 ส่วนในล้านส่วน) และใช้โมดูลเส้นใยกลางสองโมดูล

### 1.3 วัตถุประสงค์

- 1.31 ศึกษากระบวนการสกัดและการนำกลับของไอออนอาร์ซีนิก (As (III) และ As(V)) ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง
- 1.32 ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนอาร์ซีนิกผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลางและหาภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกไอออนอาร์ซีนิก โดยการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองเส้นใยกลาง

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.41 ศึกษาการสกัดไอออนอาร์ซีนิกจากสารละลายป้อนซึ่งมีความเข้มข้น 20 ppm โดยใช้ Cyanex 923 เป็นสารสกัด และใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลาย ซึ่งเคลือบฝังเยื่อแผ่นเหลวในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลาง
- 1.42 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิกโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง ได้แก่
- ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน ในช่วง 0.2-1 โมลต่อลิตร
  - ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 ในตัวทำละลายโทลูอินในช่วง 2-50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
  - ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความเข้มข้นในช่วง 0.2-1 โมลต่อลิตร เปรียบเทียบกับน้ำบริสุทธิ์

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการสกัดแยกและการนำกลับไอออนของอาร์ซีนิกโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง และข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับอาร์ซีนิก
- 1.5.2 ศึกษาวิธีการทดลองพร้อมทั้งเตรียมสารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิจัย
- 1.5.3 ทำการทดลองสกัดและการนำกลับ ไอออนอาร์ซีนิก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ใช้ **Cyanex 923** ที่ละลายในโทลูอินเป็นสารสกัด และใช้ โดยทำการทดลองภายใต้ภาวะต่าง ๆ เหล่านี้
- ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน ซในช่วง **0.2-1** โมลต่อลิตร
  - ความเข้มข้นของสารสกัด **Cyanex 923** ในช่วง **2-50** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในตัวทำละลายโทลูอิน
  - ความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงความเข้มข้น **0.2-1** โมลต่อลิตรเปรียบเทียบกับน้ำบริสุทธิ์
- 1.5.4 จากผลที่ได้จากการทดลองทำการหาค่าอัตราการถ่ายเทมวลของไอออนอาร์ซีนิก
- 1.5.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.6.1 ทราบผลของการสกัดไอออนอาร์ซีนิก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.6.2 ทราบถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยกไอออนอาร์ซีนิกและภาวะที่เหมาะสมในการสกัดไอออนอาร์ซีนิกและสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษของผู้อื่นที่ใช้วิธีที่ต่างจากวิธีนี้
- 1.6.3 เป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานของการดำเนินงานวิจัยด้านสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 1.6.4 เป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานของการนำกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม

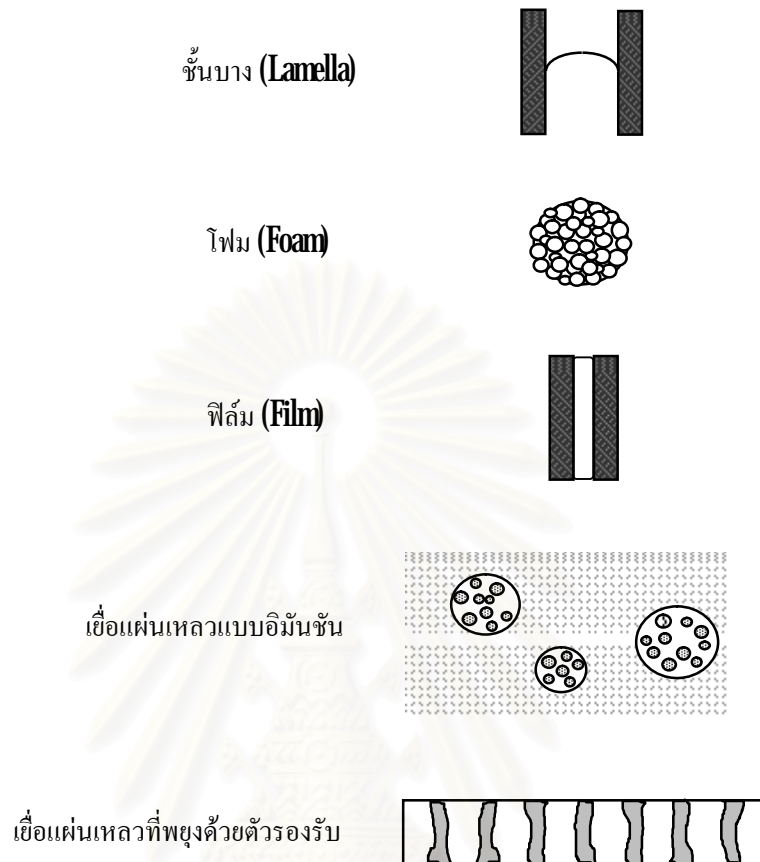
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 21 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Process) นั้นประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1. ส่วนของสารละลายป้อน (Feed Phase) ซึ่งเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ซึ่งส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลาย 2. ส่วนเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane Phase) ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยสารสกัด (Extractant) ละลายในตัวทำละลาย ส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายของน้ำมัน 3. ส่วนของสารละลายนำกลับ (Strip Phase) ซึ่งจะทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งถ่ายโอนผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาจากสารละลายป้อน ส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับสารละลายนำกลับและแยกตัวออกมาละลายอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังนั้นจึงสามารถถ่ายโอนองค์ประกอบที่ต้องการจากสารละลายป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับได้

ดังนั้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจึงต้องสร้างเยื่อแผ่นเหลวมาขึ้นระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ รูปที่ 21 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวประเภทต่าง ๆ โดยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่ากรณีอื่น ๆ (Schultz, 1988)



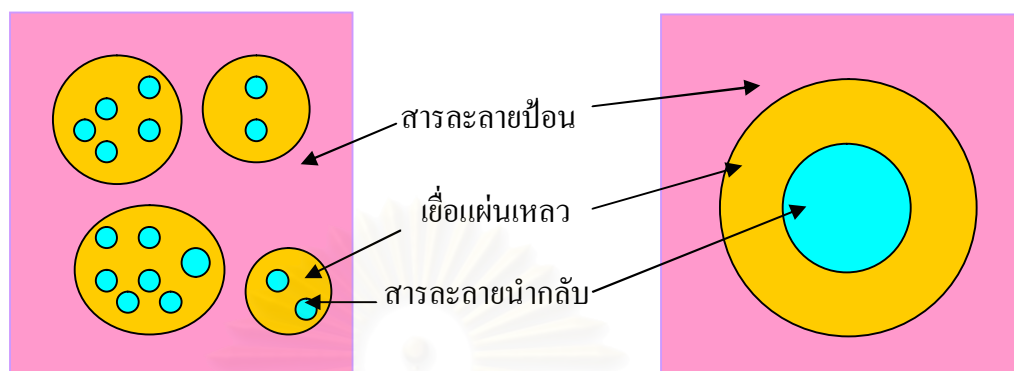
รูปที่ 21 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ (Schultz, 1988)

### 21.1 เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion Liquid Membrane Process)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน คือ การนำเอาระบบเยื่อแผ่นเหลวที่อธิบายในหัวข้อ 21 มาจัดเรียงให้อยู่ในรูปแบบอิมัลชันซึ่งสารละลายป้อนจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous Phase) และมีสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่เป็นสารละลายอินทรีย์อยู่ภายในซึ่งเป็นลักษณะวัฏภาคไม่ต่อเนื่อง (Dispersion Phase) ดังรูปที่ 22 และจะเกิดกระบวนการถ่ายโอนองค์ประกอบ ส่วนสารละลายนำกลับนั้นจะอยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอีกที่ดังรูปที่ 22 การเตรียมเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน สามารถเตรียมได้โดยนำสารละลายที่จะทำเป็นสารละลายนำกลับมาผสมกับสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะต้องไม่ละลายกัน แล้วนำมาปั่นกวนด้วยความเร็วสูงเพื่อให้วัฏภาคสารละลายนำกลับมีขนาดเป็นเม็ดเล็ก ๆ อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว โดยทั่วไปเยื่อ



แผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ได้จะมีความเสถียรต่ำจึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปเพื่อเพิ่มความเสถียร



รูปที่ 2.2 วิธีการเชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (ประกร รามกุล, 2544)

เมื่อเตรียมเชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันเสร็จแล้วจึงนำเชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันใส่ลงในสารละลายป้อนซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ทำให้เกิดการการเรียงวัฏภาคใหม่เป็น 3 ชั้น เรียงจากด้านในไปด้านนอก คือ สารละลายนำกลับ สารละลายเชื้อแผ่นเหลว และสารละลายป้อนตามลำดับ เรียกว่าอิมัลชันเชิงซ้อน (**Double Emulsion**) กระบวนการแยกจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อองค์ประกอบที่ต้องการแยกที่อยู่ในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัดสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและไอออนไฮโดรเนียม สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นนี้จะแพร่ผ่านเชื้อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเชื้อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออนที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ และได้สารสกัดกลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเชื้อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยาองค์ประกอบที่ต้องการแยกต่อไป หลังจากเกิดการแยกแล้วองค์ประกอบของสารที่ต้องการแยกจะไปอยู่ในสารละลายนำกลับ แล้วจึงนำไปแยกสารละลายป้อนที่ถูกสกัดองค์ประกอบที่ต้องการออกไปแล้ว จะถูกแยกออกจากเชื้อแผ่นเหลวอิมัลชัน สุดท้ายจึงนำสารละลายเชื้อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันที่ผ่านการสกัดแล้วไปแยกวัฏภาคภายในออกได้เป็นสารละลายผลิตภัณฑ์ ส่วนสารละลายเชื้อแผ่นเหลวสามารถนำกลับไปใช้ได้

ชนิดของเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำในน้ำมัน (**Water in Oil (W/O) Emulsion**) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำ
- เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันของน้ำมันในน้ำ (**Oil in Water (O/W) Emulsion**) คือ เยื่อแผ่นเหลวที่มีวัฏภาคภายในเป็นน้ำมัน

ในกรณีที่สารละลายนำกลับเป็นสารละลายของน้ำ เมื่อนำอิมัลชันของน้ำในน้ำมันมากระจายในวัฏภาคสารละลายป้อนที่เป็นสารละลายของน้ำ ระบบจะเรียงจากวัฏภาคด้านในไปยังวัฏภาคด้านนอก คือ น้ำ - น้ำมัน - น้ำ (**W/O/W**) แต่ถ้าสารละลายนำกลับเป็นสารละลายน้ำมันก็จะกลับกันก็จะเรียงจาก น้ำมัน - น้ำ - น้ำมัน (**O/W/O**) ดังนั้นจึงมีสารลดแรงตึงผิวสองประเภทได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (**Hydrophobic Surfactant**) สำหรับอิมัลชันน้ำในน้ำมัน และสารลดแรงตึงผิวชนิดที่ชอบน้ำ (**Hydrophilic Surfactant**) สำหรับอิมัลชันน้ำมันในน้ำ

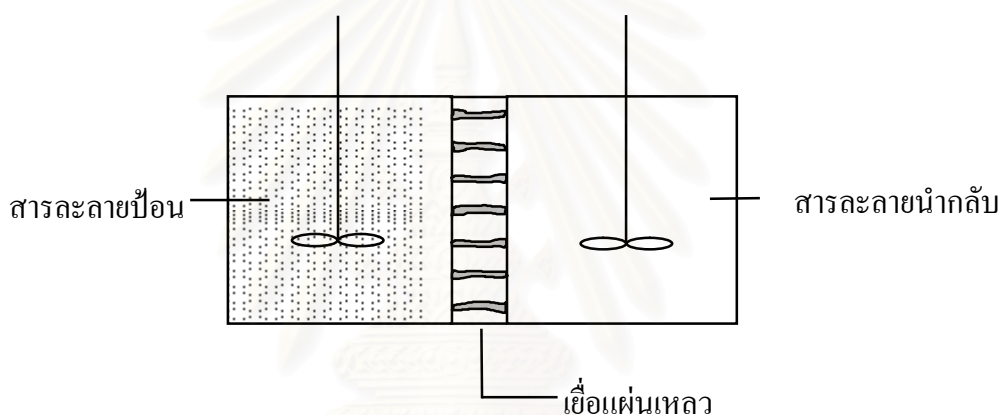
## 2.1.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับ (Supported Liquid Membrane)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้จะใช้พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนเป็นตัวยึดเยื่อแผ่นเหลวเอาไว้ในรูพรุนด้วยแรงคาปิลลารี (**Capillary Force**) (Marr และ Kopp, 1982; Schultz, 1988) ไม่ให้เยื่อแผ่นเหลวมีการเคลื่อนที่และทำให้มีความเสถียรมากขึ้น เรียกเยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้ได้อีกชื่อหนึ่งว่า **Immobilize Liquid Membrane** (Schultz, 1988) และสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ตัวประสานซึ่งเป็นปัญหาของกระบวนการสกัด (Fernandez et al., 1987) รูพรุนจุลภาคที่ใช้เป็นตัวรองรับนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ รูพรุนจุลภาคชนิดชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติดอยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น และอีกชนิดคือรูพรุนจุลภาคชนิดไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะยอมให้วัฏภาคที่มีน้ำมันเป็นตัวทำละลายเคลื่อนผ่านหรือถูกยึดติดอยู่ในรูพรุนได้เท่านั้น ประเภทของตัวรองรับมีหลายชนิด ได้แก่ ชนิดแผ่นแบน (**Flat Sheet**) ชนิดแผ่นม้วน (**Spiral Wound**) และชนิดเส้นใยกลวง (**Hollow Fiber**) ข้อได้เปรียบของเยื่อแผ่นเหลวพุงด้วยตัวรองรับ คือ กระบวนการเตรียมไม่ยุ่งยากและสารสกัดที่ใช้มีปริมาณน้อย (O' Hara และ Bohrer, 1989)

### 21.21 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (*Flat Sheet Supported Liquid Membrane*)

ตัวรองรับชนิดนี้มีลักษณะเป็นชนิดแผ่นแบน มีความพรุน (Porosity) สูง ส่วนใหญ่ทำจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์เช่น **polypropylene (PP)** **polyethylene (PE)** **polytetrafluoroethylene (PTFE)** เป็นต้น

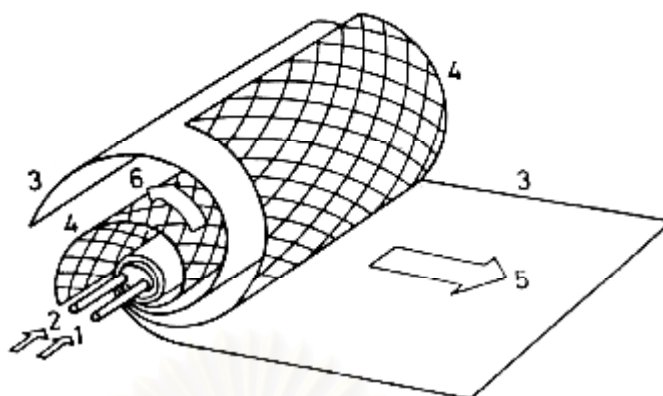
เยื่อแผ่นเหลวชนิดนี้เหมาะสมในการนำมาศึกษากลไกการถ่ายโอนมวล เนื่องจากมีรูปแบบของตัวรองรับที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเยื่อแผ่นเหลวแบบนี้มีอัตราการถ่ายโอนมวลต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลน้อย รูปที่ 2.3 เป็นลักษณะโดยทั่วไปของการสกัดแยกไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดแผ่นบาง



รูปที่ 2.3 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Komasawa et al., 1983)

### 21.22 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พองด้วยแผ่นม้วนแสดงดังรูปที่ 2.4 ตัวรองรับแบบแผ่นม้วน (*Spiral-type Supported Liquid Membrane*)

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วนแสดงดังรูปที่ 2.4 ตัวรองรับแบบแผ่นม้วนผลิตขึ้นโดยใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำและแผ่นตาข่าย (Mesh Spacer) พอลิเอสเตอร์ม้วนรอบเพื่อนำสารละลายป้อนและสารละลายผลิตภัณฑ์ ผิวด้านนอกและปลายทั้งสองด้านของโมดูลจะถูกผนึกไว้ด้วยตัวประสานอีพอกซี (Epoxy) ส่วนสารละลายป้อนที่ผ่านการสกัดแล้ว (Raffinate) และสารละลายนำกลับที่ได้ (Strip) จะไหลออกทางท่อที่สอดไว้ด้านนอกสุดของโมดูล จุดเด่นของกระบวนการนี้คือ โมดูลที่ใช้มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง และรูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไม่ซับซ้อน

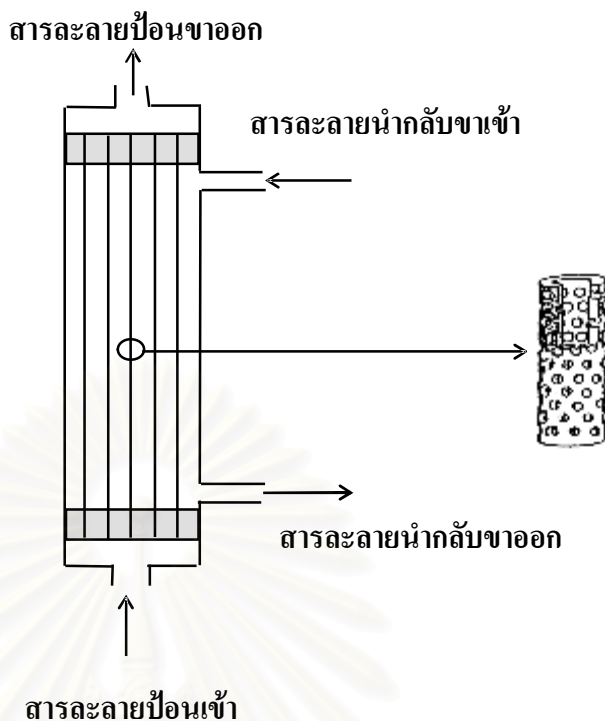


รูปที่ 24 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับชนิดแผ่นม้วน (Teramoto et al, 1987)

- |                                     |                                       |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| หมายเลขที่ 1 ทางเข้าของสารละลายป้อน | หมายเลขที่ 2 ทางเข้าของสารละลายนำกลับ |
| หมายเลขที่ 3 เยื่อแผ่นเหลว          | หมายเลขที่ 4 แผ่นกั้น                 |
| หมายเลขที่ 5 สารละลายป้อน           | หมายเลขที่ 6 สารละลายนำกลับ           |

### 21.23 เยื่อแผ่นเหลวชนิดที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (*Hollow Fiber Supported Liquid Membrane, HFSLM*)

ตัวรองรับแบบเส้นใยกลวงจะใช้วิธีนำเส้นใยกลวงจำนวนมากมาเรียงในแนวขนานกันแล้วบรรจุลงใน โมดูลรูปทรงกระบอก จากนั้นจึงปิดปลายทั้งสองด้านของโมดูลด้วยเรซิน ดังรูปที่ 25 ในการสกัดสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับจะไหลภายในเส้นใยกลวงที่เรียกว่าฝั่งท่อ (*Tube Side*) หรือฝั่งเปลือก (*Shell Side*) แล้วแต่ว่าผู้จะใช้จะให้สายโคอยู่ฝั่งไหน และมีเยื่อแผ่นเหลวฝังอยู่ภายในเส้นใยกลวงซึ่งอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ลักษณะการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบไหลแบบทางเดียวกัน และแบบสวนทางกัน รูปที่ 26 แสดงการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับแบบสวนทางกัน



รูปที่ 25 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง (Izatt, 1988)

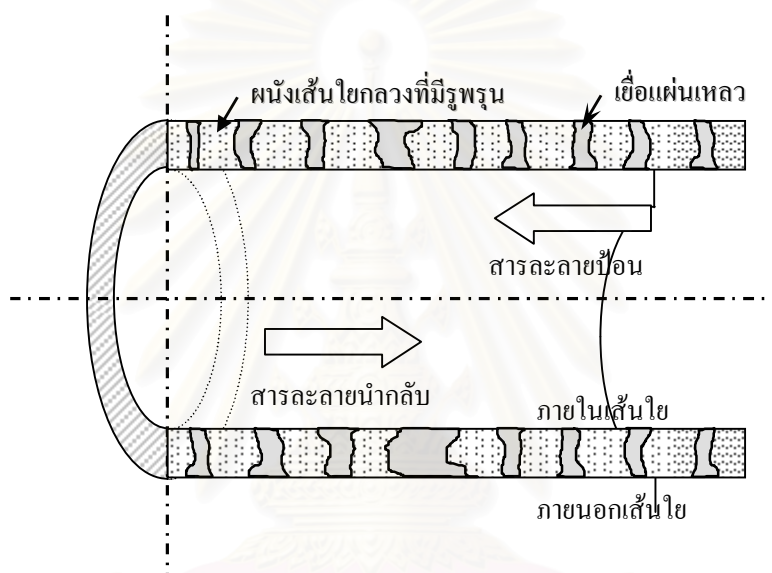
การเตรียมกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับทำโดยนำเยื่อแผ่นเหลวมาเคลือบฝังไว้บนตัวรองรับ เกิดเป็นแผ่นฟิล์มของเยื่อแผ่นเหลวพองด้วยตัวรองรับ เมื่อนำตัวรองรับนี้มาขึ้นระหว่างสารละลายสองชนิดที่ไม่ละลายกับเยื่อแผ่นเหลว ตัวรองรับจะทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวเพื่อถ่ายโอนไอออนโลหะจากสารละลายชนิดแรกไปยังสารละลายอีกชนิดหนึ่ง ตัวรองรับที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังจะเป็นสารละลายอินทรีย์ และตัวรองรับพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนชนิดชอบน้ำซึ่งเยื่อแผ่นเหลวที่นำมาเคลือบฝังต้องเป็นวัฏภาคสารละลายของน้ำ

ข้อดีของกระบวนการเยื่อแผ่นแบบมีตัวรองรับ (ประกร รามกุล, 2544)

- มีค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูง
- มีค่าอัตราการถ่ายโอนมวลสูงเมื่อเทียบกับขนาดของระบบ
- มีค่าการคัดเลือกรวมสูง
- สามารถเพิ่มความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์



- สามารถที่จะใช้ประโยชน์จากสารสกัดที่ราคาแพงได้
- อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าสูง
- สามารถใช้กับระบบที่มีของแข็งแขวนลอยได้
- มูลค่าการลงทุนและการดำเนินงานต่ำ
- สามารถตัดแปลงได้
- สามารถที่จะขยายขนาดได้ง่าย

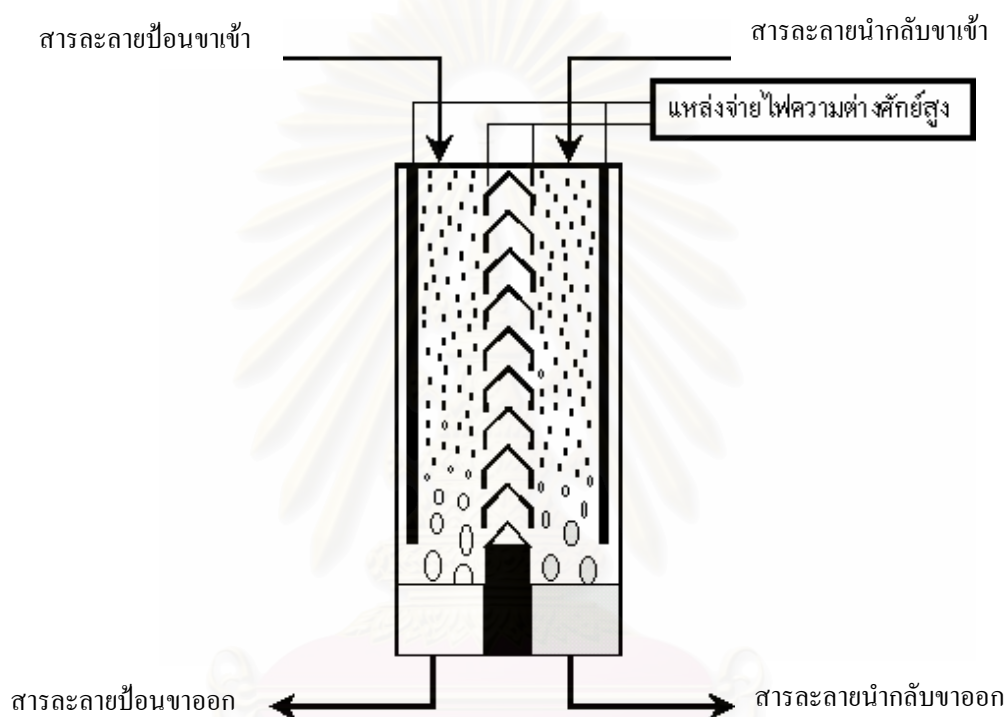


**รูปที่ 26** ลักษณะการไหลแบบไหลสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเมื่อพิจารณาที่เส้นใยกลวงหนึ่งเส้นในชุดทดลองการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (ประกร รามกุล, 2544)

ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ เนื่องจาก มีพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรสูง (Yang และ Cussler, 1986; Dahuron และ Cussler, 1988) และเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้ง่ายโดยการเติมเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปใหม่ (Danesi และ Rickert, 1986; Nakano et al., 1987; Tanikaki et al., 1988) ซึ่งเป็นรูปแบบของตัวรองรับที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้

### 21.3 เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Pseudo Liquid Membrane)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตพัฒนาจากการรวมเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบคอลัมน์ (ชนิดหอสกัดแบบหยด) หลักไฟฟ้าสถิต และเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวรวม ซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ได้ เช่น ความยุ่งยากซับซ้อนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย และระบบการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน, ความเสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลว และการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่าง ๆ เป็นต้น โดยลักษณะการปฏิบัติการของการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตแสดงดังรูปที่ 27 (ประกร รามกุล, 2544)



รูปที่ 27 ลักษณะการปฏิบัติการของเยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิต (ประกร รามกุล, 2544)

จากรูปที่ 27 ชุดอุปกรณ์เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำขึ้นเป็นพิเศษ โดยถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเซลล์สกัดและส่วนของเซลล์นำกลับ มีแผ่นกั้น (Baffle Plate) เป็นโลหะตัวอักษรรูปตัว V คว่ำเรียงต่อกันเว้นช่องว่างและมีระยะห่างระหว่างกันในแต่ละแผ่นเท่ากัน โดยมีลวดโลหะร้อยยึดแต่ละแผ่นเอาไว้ อีกทั้งยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ส่วนด้านล่างจะเป็นแผ่น โลหะทึบสำหรับแบ่งกั้นวัฏภาคระหว่างสารละลายป้อนขาออก (Raffinate) กับสารละลายนำกลับมาออกในเซลล์สกัด และเซลล์การนำกลับ มีแท่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) การจุ่มแช่อยู่ซึ่งต่อเข้ากับตัวจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิต ขั้นตอนทำงานเริ่มด้วยการเตรียมเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ในเครื่องปฏิกรณ์จนได้ระดับของปริมาตรที่ต้องการ โดยที่เยื่อแผ่นเหลวนี้อจะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสถิตจากนั้น

ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมกันเป็นหยดเล็ก ๆ ซึ่งมีขนาดที่เหมาะสมให้ตกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาค เกิดการสกัดแยกและนำกลับออกตามกลไกการสกัดและการนำกลับโดยมีอิทธิพลของสนามไฟฟ้าสถิต เป็นปัจจัยส่งเสริมให้ประสิทธิภาพในการสกัดสูงขึ้น เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้จะออกแบบเป็นพิเศษเพื่อขจัดปัญหาการปนเปื้อนผสมกันของวัฏภาคต่าง ๆ โดยหากมีหยดของสารป้อนหรือสารละลายนำกลับหลุดเข้าไปในช่องของแผ่นกั้นซึ่งกั้นวัฏภาคทั้งสอง หยดของสารละลายเหล่านั้นจะไม่สามารถเคลื่อนไปรวมกันได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตความต่างศักย์สูงจะส่งผลเหนี่ยวนำให้หยดวัฏภาคของสารละลายมีรูปร่างยืดยาวออกเป็นรูปทรงรี เนื่องจากความเป็นขั้วไฟฟ้า (**Polarization**) ของวัฏภาคสารละลาย ดังนั้นเมื่อมีหยดของวัฏภาคของสารละลาย ซึ่งอยู่ใกล้กันภายใต้สนามไฟฟ้าสถิตจะรวมกันเป็นหยดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จึงตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกและค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของวัฏภาคของสารละลายกับวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะมีอิทธิพลมากกว่าปัจจัยอื่น ๆ ที่จะส่งผลให้วัฏภาคทั้งสองเคลื่อนเข้ามาผสมกันได้ อีกทั้งยังมีแผ่นกั้นที่ได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ ซึ่งจะช่วยให้หยดของวัฏภาคที่หลุดเข้ามาในช่องระหว่างแผ่นกั้นให้รวมตัวกันเองและตกลงกลับไปยังเซลล์ของมันตามเดิม (**Gu, 1990**)

ถึงแม้ว่าเทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวแบบไฟฟ้าสถิตจะมีข้อดีอยู่มากมาย เช่น มีประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับสูง ปัญหาการปนเปื้อนของวัฏภาคต่างๆ ต่ำ เยื่อแผ่นเหลวมีเสถียรภาพสูงมาก และหลีกเลี่ยงการใช้สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นและต้านทานการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แต่เยื่อแผ่นเหลวชนิดไฟฟ้าสถิตยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นขนาดและการกระจายตัวของหยดวัฏภาคซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนตัวผ่านเยื่อแผ่นเหลว อัตราส่วนพื้นที่การถ่ายโอนมวลต่อปริมาตรไม่สูง วัฏภาคของสารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขั้วต่ำ และใช้กับกระบวนการที่วัฏภาคของสารอินทรีย์เป็นวัฏภาคต่อเนื่องได้เท่านั้น อีกทั้งยังพบว่าระบบการสกัดยังมีอัตราการไหลของวัฏภาคต่างๆ ในกระบวนการต่ำ อันเป็นข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในกระบวนการ และปัญหาอันตรายจากกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเป็นต้น (**เอกพิชญ์ทรงคุณ, 2548**) ดังนั้น เทคนิคการสกัดแยกด้วยเทคนิคต่างๆ ก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งานและพัฒนาการที่เปลี่ยนแปลงไป ตารางที่ 21 เป็นการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 21 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (นิสิต สุโลมาน, 2544)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพอง		เยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิต	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง</li> <li>- มีกำลังการผลิตสูง</li> <li>- กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณสูง</li> <li>- ใช้พลังงานสูง</li> <li>- ปัญหาการปนเปื้อน</li> <li>- ปัญหาในการใช้สารลดแรงตึงผิวและการบำบัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีค่าการคัดเลือกสูง</li> <li>- ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว</li> <li>- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ</li> <li>- ใช้พลังงานต่ำ</li> <li>- ขยายขนาดง่าย</li> <li>- อัตราการถ่ายโอนมวลสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ</li> <li>- เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ</li> <li>- การสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีเสถียรภาพสูง</li> <li>- ประสิทธิภาพสูง</li> <li>- การปนเปื้อนต่ำ</li> <li>- ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำลังการผลิตต่ำ</li> <li>- สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขี้ด่ำ</li> <li>- สารอินทรีย์ต้องเป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น</li> <li>- ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก</li> </ul>

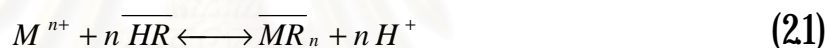
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.2 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด (Tavlarides et al., 1987) ดังนี้

### 2.2.1 สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อย คือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant) และสารสกัดชนิดคีเลต (Chelate Extractant) สารสกัดประเภทกรดประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น  $-COOH$ ,  $=P(O)OH$ ,  $-SO_3H$  ส่วนประเภทหลังสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์คังสมการ



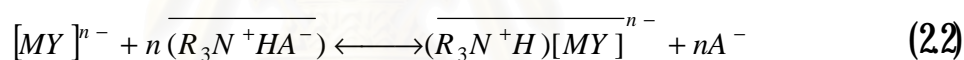
เครื่องหมายขีดด้านบนหมายความว่าสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารอินทรีย์ สมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนไฮโดรเนียมกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ (Tavlarides et al., 1987) สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Organic Derivatives of Phosphorous Acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic Acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphonic Acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (Di-2-Ethylhexyl Phosphoric Acids, D2EHPA) สารสกัดประเภทคีเลต ได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วยหมู่ที่ให้ไอออนลบ (Donor Groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเตต (Bidentate Complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลตเชิงพาณิชย์มีอยู่ 2 ประเภทได้แก่ (ก) กลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนออกซิม (2-Hydroxy Benzophenone Oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดย



บริษัท **Sherex (Ashland Chemical Company USA)** ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ **Kelex** สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัด ไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (**Acidic leach liquors**) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (**Alkaline**)

## 2.2.2 สารสกัดชนิดต่าง (Basic Extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเป็นเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด ใช้กันมากจะเป็นพวกเอมีน และแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (**Quaternary Ammonium Halides**) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (**Ammonium Salt**) ชนิดปฐมภูมิ (**Primary, RNH<sub>2</sub>**) ชนิดทุติยภูมิ (**Secondary, R<sub>2</sub>NH**) ชนิดตติยภูมิ (**Tertiary, R<sub>3</sub>N**) และชนิดจตุภูมิ (**Quaternary Ammonium Salts, R<sub>4</sub>N<sup>+</sup>**) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำ เป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (**Anionic Species**) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



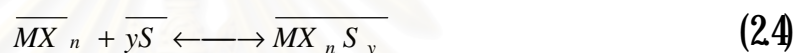
เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้นเอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



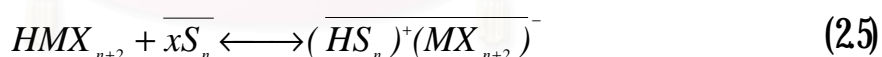
นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว  $R_3N^+HA^-$  ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบด้วยไอออนโลหะ  $[MY]^{n-}$  จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการที่ (22)

## 2.2.3 สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral Extractant)

สารสกัดประเภทกลาง (Neutral) หรือชนิดโซลเวท (Solvating Extractant) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะหมู่ที่ให้ไอออนลบจึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถของไอออนโลหะในการที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำ เช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลางของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดโซลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการเข้าทำปฏิกิริยารวมกันกับสารสกัดชนิดโซลเวทดังสมการที่ (24) และสมการที่ (25)



## 2.3 กลไกการถ่ายโอนมวล

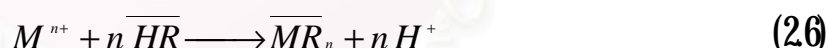
การถ่ายโอนมวลในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นการถ่ายโอนแบบควบคู่ (Couple Transport) (Porter, 1990) คือ กระบวนการถ่ายโอนมวลของไอออนสองชนิดที่เกิดขึ้นพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งเราต้องการที่จะถ่ายโอนไอออนโลหะที่ต้องการแยกให้เดินทางจากด้านสารละลายป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ แต่แรงขับของการถ่ายโอนมวลคือผลต่างของความเข้มข้นของไอออนอีกชนิดหนึ่งไม่ใช่ไอออนของโลหะที่เราต้องการจะแยก ดังนั้นจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่เราต้องการได้ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารละลายป้อนก็ตาม

เยื่อแผ่นเหลวที่คั่นอยู่ระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับนั้นจะผสมสารสกัด ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ ไอออนที่ต้องการสกัดจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลางกับสารสกัดที่ผิวสัมผัสด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลว สารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ข้ามเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านตรงข้ามซึ่งมีสารละลายนำกลับ และจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว ไอออนของโลหะจะหลุดไปอยู่ที่ด้านสารละลายนำกลับ ในขณะที่สารประกอบเชิงซ้อนจะกลายเป็นสารสกัดดั้งเดิมแล้วแพร่กลับผ่านเยื่อแผ่นเหลว มาอยู่ที่ด้านสารละลายป้อนตามเดิม เพื่อมารับไอออนโลหะอีกครั้ง ดังนั้นสารสกัดจะทำหน้าที่คล้ายกับตัวขนย้ายไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลวนั่นเอง

การถ่ายโอนมวลแบบควบคู่กันแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

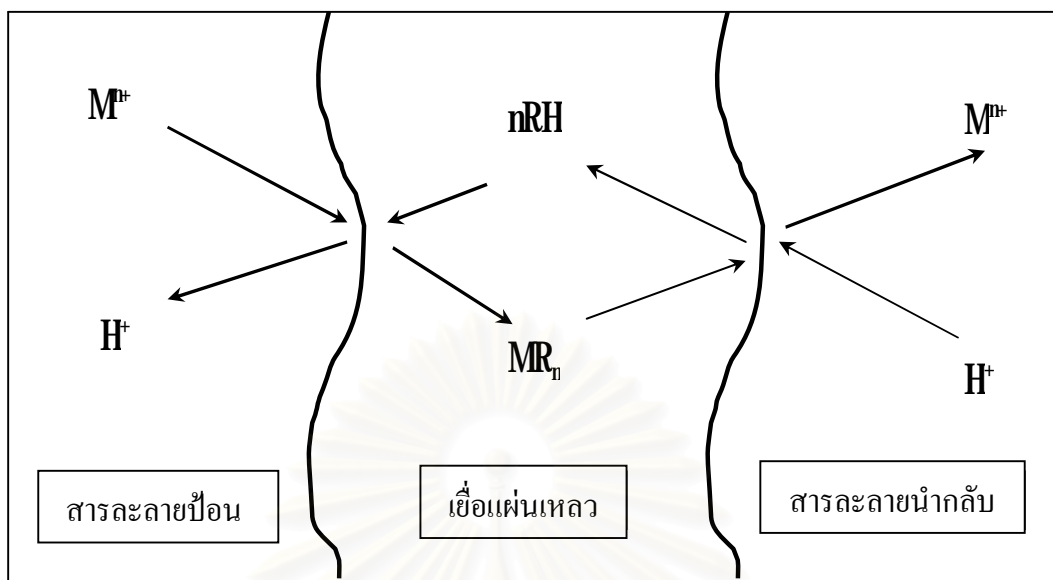
### 2.3.1 การถ่ายโอนแบบสวนทาง (Counter-Transport)

คือ การถ่ายโอนที่ไอออนของโลหะและไอออนไฮโดรเนียมเคลื่อนที่สวนทางกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว การเกิดปฏิกิริยาไอออนโลหะ  $M^{n+}$  ที่อยู่ในสารละลายป้อนจะ ทำปฏิกิริยากับสารสกัด  $RH$  ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน  $MR_n$  และไฮโดรเนียมไอออน  $H^+$  ดังสมการที่ (26) ซึ่ง ไอออนไฮโดรเนียมจะอยู่ในสารละลายป้อน และสารประกอบเชิงซ้อน  $MR_n$  อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว



สารประกอบเชิงซ้อน ที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้ สารประกอบเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยาแบบย้อนกลับกับไอออนไฮโดรเนียมที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับ ดังสมการที่ (27) และได้สารสกัด ( $RH$ ) กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 28

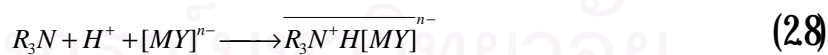




รูปที่ 28 แผนผังทิศทางการถ่ายโอนของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมของการถ่ายโอนแบบสวนทาง

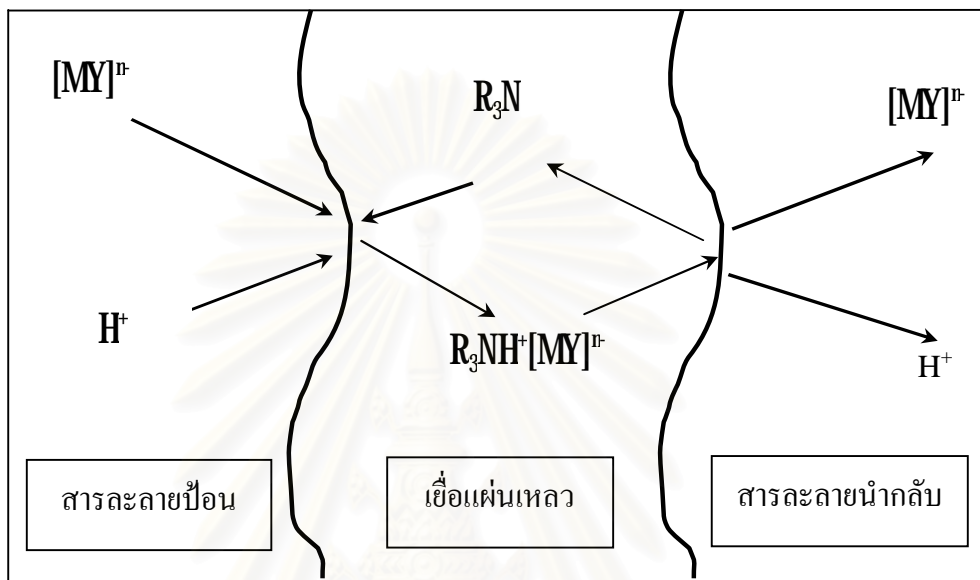
### 2.3.2 การถ่ายโอนแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport)

การถ่ายโอนชนิดไปทางเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่เป็นเบส ไอออนของโลหะและไอออนไฮโดรเนียม จะเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว ในการเกิดปฏิกิริยานั้น ทั้งไอออนโลหะที่อยู่ในรูปประจุลบ  $[MY]^{n-}$  และไอออนไฮโดรเนียม  $H^+$  ที่อยู่ในสารละลายป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัด  $R_3N$  ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน  $R_3NH^+[MY]^{n-}$  อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว ดังสมการที่ (28)



สารประกอบเชิงซ้อน  $R_3NH^+[MY]^{n-}$  ที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นเหลวจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ ที่ผิวสัมผัสนี้ สารประกอบเชิงซ้อน

$R_3NH^+[MY]^{n-}$  จะทำปฏิกิริยาแบบย้อนกลับเกิดเป็นไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับดังสมการที่ (29) และได้สารสกัด  $R_3N$  กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารละลายป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายป้อน ววนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 แผนผังทิศทางการถ่ายโอนของไอออนโลหะและไอออนไฮโดรเนียมของการถ่ายโอนแบบทางเดียวกัน

ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน (กิตติพงศ์เจริญวัฒน์ชัย, 2543)

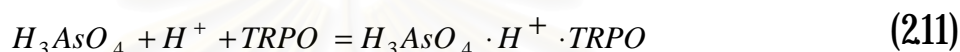
- 1) การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
- 2) การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
- 3) การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
- 4) การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
- 5) การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ



## 2.4 ทฤษฎีการคำนวณแบบจำลองการถ่ายโอนมวล

### 2.4.1 การหาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ( $K_{ex}$ )

การศึกษาการสกัดไอออนอาร์ซีนิกผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง โดยใช้ **Cyanex 923** ซึ่งละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ คือ โทลูอินเป็นสารสกัด ปฏิกิริยาการสกัดไอออนอาร์ซีนิก (III) และอาร์ซีนิก (V) แสดงดังสมการที่ (210) และ (211) ตามลำดับ (Wisniewski, 1997)



จากสมการการสกัดไอออนอาร์ซีนิก (III) และอาร์ซีนิก (V) สามารถเขียนความสัมพันธ์ค่าคงที่สมดุลได้ตามลำดับ ดังนี้

$$K_{ex} = \frac{[(HAsO_2)(H^+)(TRPO)]}{[HAsO_2][H^+][TRPO]} \quad (212)$$

$$K_{ex} = \frac{[(H_3AsO_4)(H^+)(TRPO)]}{[H_3AsO_4][H^+][TRPO]} \quad (213)$$

### 2.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, D)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient) หรือในหนังสือบางเล่มอาจใช้คำว่า อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) ซึ่งก็คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของไอออนโลหะที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวกับความเข้มข้นของไอออนโลหะที่อยู่ในสารละลาย (Seader and Ernest, 1988; Rathore et al., 2001) ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของการสกัดไอออนอาร์ซีนิก แสดงได้ดังสมการที่ 214

$$D = \frac{[(HAsO_2)(H^+)(TRPO)]}{[HAsO_2]} = K_{ex} [H^+][TRPO] \quad (214)$$

## 2.4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, P)

การคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ใช้สมมติฐานที่ว่าค่า **Distribution Coefficient** ของทางด้านสารละลายป้อนไปยังเยื่อแผ่นเหลวนั้นมากกว่าของทางด้านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับเป็นอย่างมาก (Danesi, 1984) โดยใช้สมการ

$$V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f,0}} \right) = -AP \frac{f}{f+1} t \quad (215)$$

โดยที่

$$f = \frac{Q_f}{PLepNr_i} \quad (216)$$

เมื่อ  $P$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน  $C_f$  และ  $C_{f,0}$  คือ ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกที่เวลา  $t$  และที่เวลาเริ่มต้น ตามลำดับ  $A$  และ  $V_f$  คือ พื้นที่การถ่ายโอนมวลและปริมาตรของสารละลายป้อน ตามลำดับ  $Q_f$  คือ อัตราการไหลของสารละลายป้อนในฝั่งท่อ และ  $L, N, r_i, e, v_f$  คือ ความยาวของเส้นใยกลวง จำนวนเส้นใยกลวงในโมดูล รัศมีภายในของเส้นใยกลวง ความพรุนของเส้นใยกลวง และ ความเร็วของสารละลายป้อน ตามลำดับ

การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านทำได้โดยการสร้างกราฟระหว่าง  $V_f \ln \left( \frac{C_f}{C_{f,0}} \right)$  กับเวลา  $(t)$  และคำนวณจากความชันของกราฟ คือ  $AP \frac{f}{f+1}$

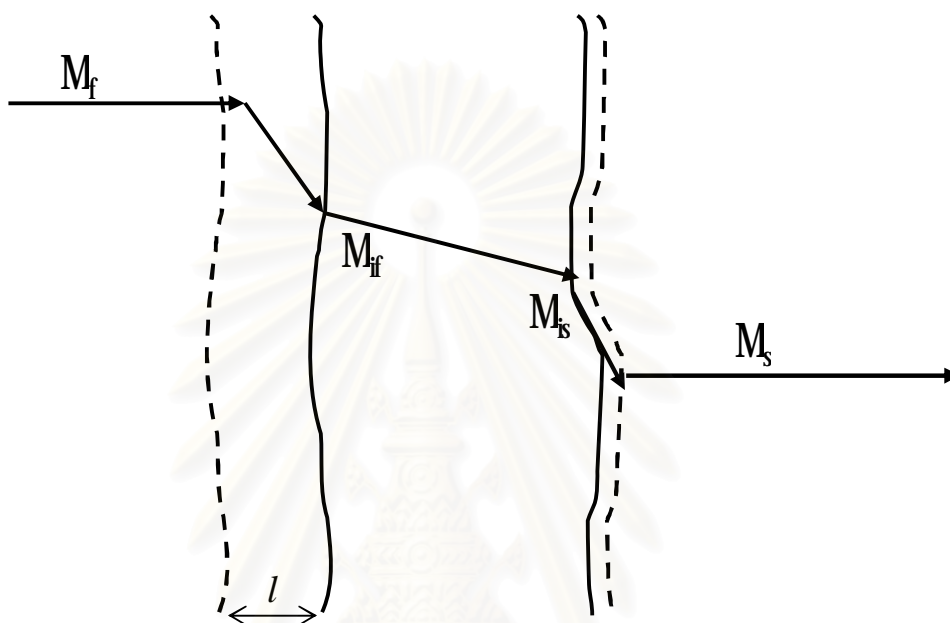
## 2.4.4 แบบจำลองการถ่ายโอนมวลและการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Coefficient)

แบบจำลองการถ่ายโอนมวลของการแยกไอออนอาร์ซีนิกโดยวิธีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้นจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านในการหาค่าอื่นๆ ต่อไป ซึ่งสัมประสิทธิ์การซึมผ่านขึ้นอยู่กับความต้านทานการถ่ายโอนมวล โดยที่ขั้นตอนของกลไกการถ่ายโอนมวลนั้นมี 3 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.10 ได้แก่ (Kumar et al., 2000)

1. ไอออนโลหะถ่ายโอนจากชั้นฟิล์มมายังผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มกับเยื่อแผ่นเหลว

2 ไอออนสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากไอออนของโลหะทำปฏิกิริยากับสารสกัด ถ่ายโอนจากด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวไปยังอีกฝั่งหนึ่ง

3 ไอออนโลหะที่นำกลับ ถ่ายโอนจากชั้นฟิล์มมายังผิวสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มกับสารละลายนำกลับ



รูปที่ 210 แผนผังการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว (ประกร รามกุล, 2544)

และในแต่ละขั้นตอนก็จะเกิดความต้านทานขึ้น ได้แก่

1. ความต้านทานเมื่อของเหลวไหลผ่านเข้าไปในรูพรุนของเส้นใยกลาง
2. ความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของไอออนเชิงซ้อนของอาร์ซีนิกผ่านเข้าไปในเยื่อแผ่นเหลวที่ถูกตรึงไว้ในผนังรูพรุนของเส้นใยกลาง
3. ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างสารละลายนำกลับและสารละลายอินทรีย์ที่บริเวณผิวด้านนอกของเส้นใย

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (217) (Rathore N.S. et al., 2001)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{P_m} + \frac{r_i}{r_o} \frac{1}{k_s} \quad (217)$$

โดยที่  $r_m$  = รัศมี **Log-mean** ของเส้นใยกลวง

$k_i$  and  $k_s$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของฝั่งสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ ตามลำดับ

$P_m$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเมมเบรน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การกระจาย (**Distribution Coefficient, D**) ในสมการที่ (214) ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง **D** และ  $P_m$  ได้ในสมการที่ (218) (Rathore N.S. et al., 2001)

$$P_m = Dk_m \quad (218)$$

และเมื่อรวมสมการที่ (212) และสมการที่ (218) จะได้

$$P_m = K_{ex} k_m [H^+][TRPO] \quad (219)$$

โดยที่  $k_m$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเยื่อแผ่นเหลว

ค่าความต้านทานในสารละลายนำกลับสามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในสารละลายนำกลับ ( $k_s$ ) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในสารละลายป้อนอยู่มาก สาเหตุจาก

1. ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลวมีค่ามากกว่าชั้นฟิล์มระหว่างเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับมาก ดังรูปที่ 210 เนื่องจาก ที่ผิวสัมผัสด้านสารละลายป้อน ไอออนโลหะและกรดที่ละลายอยู่ในสารละลายป้อนจะมารวมตัวกันเกิดเป็นชั้นฟิล์มที่มีความหนา  $l$  ส่วนด้านการนำกลับ สารละลายนำกลับที่ใช้เป็นน้ำบริสุทธิ์ จึงไม่มีการรวมตัวกันของตัวทำละลายชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าน้อยมาก จึงทำให้น้ำสามารถสัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวได้โดยตรง จากสมการ (Bird et al., 1960)

$$k = \frac{D'}{l} \quad (220)$$

เมื่อ  $k$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล

$D'$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ (**Diffusion Coefficient**)

$l$  = ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว

จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของฝั่งสารละลายป้อน ( $k_s$ ) มีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของฝั่งสารละลายนำกลับ ( $k_i$ ) อย่างมาก

2 ความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายป้อน ( $M_f$ ) กับความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว ( $M_{if}$ ) มีความแตกต่างกันมากกว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะด้านสารละลายนำกลับ ( $M_s$ ) กับความเข้มข้นของไอออนโลหะที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว ( $M_{is}$ ) (Porter, 1990)

จากสมการ

$$Flux = k_i(M_f - M_{if}) = k_s(M_{is} - M_s) \quad (221)$$

เมื่อ ภาวะคงตัว

3 เนื่องจากทางด้านสารละลายนำกลับนั้นเป็นน้ำบริสุทธิ์ซึ่งสัมผัสโดยตรงกับเยื่อแผ่นเหลว จึงเกิดการละลายขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากสามเหตุผลที่กล่าวมา จึงสามารถไม่พิจารณาเทอมสุดท้ายของสมการที่ (217) ออกได้ และเมื่อแทนค่า  $P_m$  จากสมการที่ (219) เข้าไปในสมการที่ (217) จะสามารถเขียนสมการที่ (217) ได้ใหม่ ดังนี้

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m [H^+][TRPO]} \quad (222)$$

ดังนั้น เมื่อสร้างกราฟระหว่าง  $\frac{1}{P}$  กับ  $\frac{1}{[H^+]}$  จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ

$\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m [TRPO]}$  ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเยื่อแผ่นเหลว

ได้ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในสารละลายน้ำสามารถคำนวณได้จากจุดตัดแกน  $\frac{1}{P}$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### บทที่ 3

#### สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนอาร์ซีนิก โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

#### 31 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 31 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	บริษัท
ไอออนโลหะ	Arsenic Trioxide	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	APS Ltd.
สารละลายป้อน	Sulfuric Acid	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	J.K. Baker
	Sodium Hydroxide	NaOH	Merck Ltd.
	Hydrogenperoxide	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	APS Ltd.
สารสกัด	Trialkyl Phosphine Oxide (CYANEX 923)	PR <sub>3</sub> O	Cytec Canada Inc.
ตัวทำละลายอินทรีย์	Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Fisher Scientific UK Ltd.
สารละลายนำกลับ	Sodium Hydroxide	NaOH	Merck Ltd.
	Dihydrogenmonoxide	H <sub>2</sub> O	-

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

**3.2.1.** ชุดทดลอง **Liqui-Cel<sup>®</sup> Liquid/Liquid Extraction System** รุ่น **Cat. #5PCM-106** ของบริษัท **Hoechst Celanese Corporation** ดังแสดงในรูปที่ **3.1** ประกอบด้วยเครื่องสูบลม ชุดควบคุมความเร็ว มาตรวัดอัตราการไหล และมาตรวัดความดัน ทั้งหมดอย่างละ **2** ชุดเพื่อวัดในด้านฝั่งท่อและฝั่งเปลือก



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ชุด **Liqui-Cel<sup>®</sup> Laboratory** ที่ใช้ในการทดลอง

**3.2.2** ตัวรองรับเส้นใยกลาง **Celgard<sup>®</sup> x-30 240 Microporous Polypropylene Hollow Fiber** ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็น โมดูลของเส้นใยกลางแสดงดังรูปที่ **3.2** และคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ **3.2**

**3.2.3** เครื่องมือ **Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) Perkin Elmer model PLASMA-1000** เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิก



รูปที่ 3.2 ตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวง Celgard<sup>®</sup> x-30 240 Microporous Polypropylene Hollow Fibers

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของสมบัติต่าง ๆ ของชุดเส้นใยกลวง

สมบัติ	ชนิด / ขนาด
วัสดุเส้นใยกลวง	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
ความพรุนของเส้นใยกลวง	30%
ความดันแตกต่างสูงสุด	42 kg/cm <sup>2</sup> ( 60 psi)
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 m <sup>2</sup> (15.2 ft <sup>2</sup> )
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> (74.4 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1° C - 60° C
มิติของชุดเส้นใยกลวง (D x L)	8 x 28 cm ( 2.5 x 8 inch)

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก

1. เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนอาร์ซีนิก (III) ที่ความเข้มข้น 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ดังนี้
  - 1.1 การเตรียมสารละลายของไอออนอาร์ซีนิก (III) โดยชั่ง  $As_2O_3$  0.132 กรัม (สำหรับสารละลายป้อนปริมาตร 5 ลิตร) ละลายใน โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาณ 25 มิลลิลิตร และนำไปให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนจนละลายหมด
  - 1.2 เตรียมกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร
  - 1.3 นำสารละลายในข้อ 1.1 มาใส่ในสารละลายกรดที่เตรียมแล้วในข้อ 1.2
  - 1.4 เก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนอาร์ซีนิก (V) ที่ความเข้มข้น 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ดังนี้
  - 2.1 เหมือนการเตรียมสารละลายของไอออนอาร์ซีนิก (III) ในข้อ 1.1
  - 2.2 เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ปริมาณ 5 มิลลิลิตร
  - 2.3 เหมือนวิธีการเตรียมสารละลายของไอออนอาร์ซีนิก (III) ในข้อ 1.2- 1.4
3. เตรียมสารละลายนำกลับ ในที่นี้ใช้น้ำกลั่น 5 ลิตร
4. เตรียมสารละลายเชื้อแผ่นเหลวซึ่งใช้ใน โมดูลเส้นใยกลวง ดังนี้
 

สารละลายผสมของสารสกัด Cyanex 923 ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่มีความเข้มข้นของสารสกัด 30 เปอร์เซนต์โดยปริมาตร ปริมาณ 1,500 มิลลิลิตร ยึดตรงในรูปทรงจุลภาคของเส้นใยกลวงโดยการป้อนสารละลายเชื้อแผ่นเหลวเข้าไปทางด้านท่อและทางด้านเปลือก และจะหยุดป้อนสารเมื่อสังเกตเห็นว่าระดับของสารละลายเชื้อแผ่นเหลวในภาชนะเริ่มคงที่

5. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยมี อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันที่ **100** มิลลิลิตร ต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบ ครั้งเดียวเก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกสุดท้าย ที่เวลา **50** นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์
6. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกใน สารละลายป้อนเป็น **0.8, 0.6, 0.4, 0.2** โมลต่อลิตร ตามลำดับ
7. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออน อาร์ซีนิก ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

### 3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด (Cyanex 923) ต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก

1. เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนอาร์ซีนิก (III) และ อาร์ซีนิก (V) ที่ความเข้มข้น **20** ส่วนในล้านส่วน (ppm) ซึ่งขั้นตอนในการเตรียม เหมือนในหัวข้อ **3.3.1** และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับ ในที่นี้ใช้น้ำกลั่น **5** ลิตร
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวซึ่งใช้ใน โมดูลเส้นใยกลวง ดังนี้  
 สารละลายผสมของสารสกัด **Cyanex 923** ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่มีความเข้มข้นของสารสกัด **2** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณ **1,500** มิลลิลิตร ยึดตรึงใน รูปทรงจุลภาคของเส้นใยกลวงโดยการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปทางด้าน ท่อและทางด้านเปลือก และจะหยุดป้อนสารเมื่อสังเกตเห็นว่าระดับของ สารละลายเยื่อแผ่นเหลวในภาชนะเริ่มคงที่
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยมี อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันที่ **100** มิลลิลิตร ต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบ ครั้งเดียว เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกสุดท้าย ที่เวลา **50** นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์

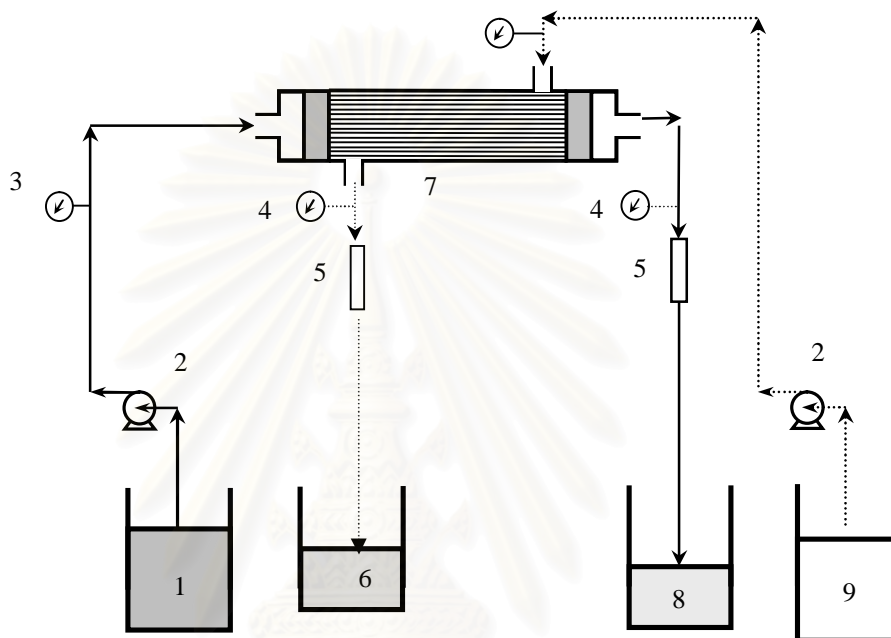


5. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 เป็น 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ
6. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิก ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

### 3.3.3 ศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออนอาร์ซีนิก

1. เตรียมสารละลายป้อนที่มีองค์ประกอบของไอออนอาร์ซีนิก (III) และอาร์ซีนิก (V) ที่ความเข้มข้น 20 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมเหมือนในหัวข้อ 3.3.1 และเก็บตัวอย่างเริ่มต้นเพื่อนำไปวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายนำกลับซึ่งเป็นสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาณ 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างสารละลายนำกลับที่ใช้เริ่มต้น เพื่อนำไปวิเคราะห์
3. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งใช้ในโมดูลเส้นใยกลวงดังนี้  
 สารละลายผสมของสารสกัด Cyanex 923 ในตัวทำละลายโทลูอีน ที่มีความเข้มข้นของสารสกัด 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณ 1,500 มิลลิลิตร ยึดตรึงในรูพรุนจุลภาคของเส้นใยกลวงโดยการป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปทางด้านท่อ และทางด้านเปลือก และจะหยุดป้อนสารเมื่อสังเกตเห็นว่าระดับของสารละลายเยื่อแผ่นเหลวในภาชนะเริ่มคงที่
4. ป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่ชุดทดลองเส้นใยกลวง โดยมีอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ลักษณะการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และไหลผ่านชุดการทดลองแบบครั้งเดียว เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนขาออกและสารละลายนำกลับขาออกสุดท้ายที่เวลา 50 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ (1) ถึง (4) โดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายนำกลับเป็น 0.8 0.6 0.4 0.2 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
6. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิก ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)



รูปที่ 33 การปฏิบัติการไหลในลักษณะไหลผ่านครั้งเดียว (One-Through Mode) (เอกพิชญ์ ทรงคุณ, 2548)

ซึ่งของไหลในกระบวนการมีทิศทางการไหลแบบสวนทางกันในชุดอุปกรณ์เส้นใยกลาง โดยที่

1 = ถังป้อนขาเข้า	6 = ถังของสารละลายนำกลับขาออก
2 = ปั๊มสูบ	7 = ชุดอุปกรณ์เส้นใยกลาง
3 = เกจวัดความดันขาเข้า	8 = ถังของสารป้อนขาออก
4 = เกจวัดความดันขาออก	9 = ถังของสารละลายนำกลับขาเข้า
5 = มาตรวัดอัตราการไหล	

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

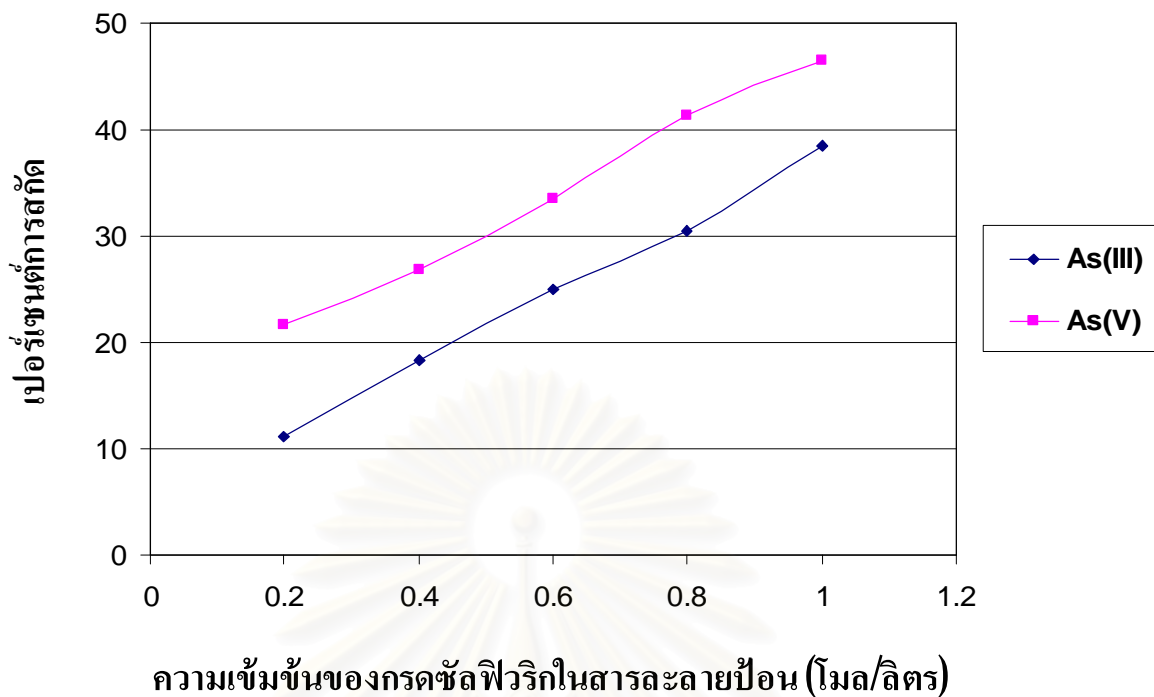
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดไอออนอาร์ซีนิกโดยวิธีการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัดในตัวทำละลายโทลูอิน ความเข้มข้นและชนิดของสารละลายนำกลับ นอกจากนี้ยังนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการถ่ายโอนมวล

#### 41 ผลที่ได้จากการทดลอง

##### 41.1 ผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก

การทดลองนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนที่มีต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก โดยใช้ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในช่วง **0.2-1.0** โมลต่อลิตร ในสารละลายป้อนมีไอออนอาร์ซีนิกละลายอยู่เป็นปริมาณ **20** ส่วนในล้านส่วน และกำหนดให้ปัจจัยอื่น ๆ คงที่ คือ ความเข้มข้นของสารสกัด **Cyanex 923** ที่ละลายอยู่ในโทลูอินเท่ากับ **30** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สารละลายนำกลับคือน้ำ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากับ **100** มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองแสดงในรูปที่ **41**

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

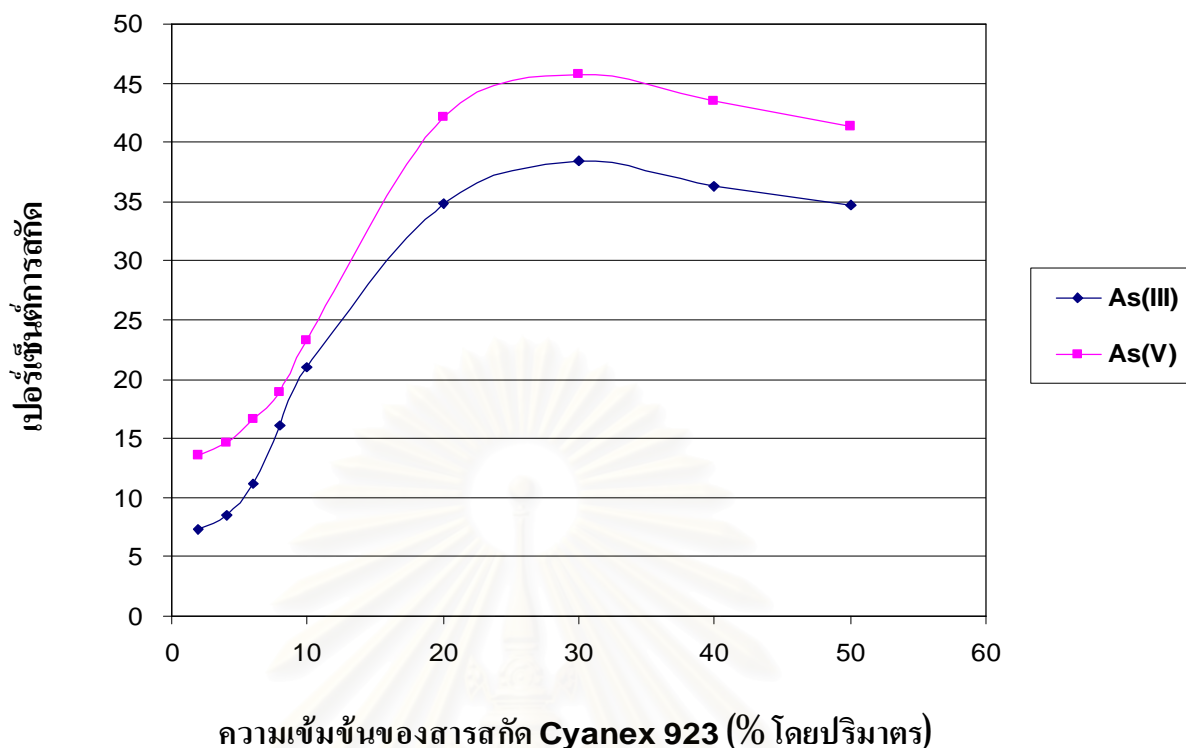


**รูปที่ 41** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนกับเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนอาร์ซีนิก (III) และ ไอออนอาร์ซีนิก (V)

จากรูปที่ 41 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน เปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนอาร์ซีนิก (III) และอาร์ซีนิก (V) มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากในสมการการสกัด ตามกฎของเลอว์ชาเตอริเยร์ (Henryi Louis Le Chatelier) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกจะทำให้สมดุลเลื่อนไปข้างหน้า ปริมาณไอออนอาร์ซีนิกทางด้านผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น จึงทำให้การสกัดไอออนอาร์ซีนิกมีค่าสูงขึ้น

#### 41.2 ผลของความเข้มข้นของ Cyanex 923 (สารสกัด) ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก

การทดลองนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 ต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก ที่ค่าความเข้มข้นของสารสกัด 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และกำหนดให้ปัจจัยอื่น ๆ คงที่ คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 1.0 โมลต่อลิตร ได้เปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนอาร์ซีนิกสูงสุด จากหัวข้อ 41.1 ค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกในสารละลายป้อนเท่ากับ 20 ส่วนในล้านส่วน สารละลายนำกลับคือน้ำ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 42



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด **Cyanex 923** ในตัวทำละลายโทลูอีน กับเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนอาร์ซีนิก (III) และ ไอออนอาร์ซีนิก (V)

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด **Cyanex 923** จาก 2 จนถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อธิบายได้ด้วยทฤษฎีของเฮนรี หลุยส์ เลอชาเตอริเยร์ ได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น เนื่องจากไอออนอาร์ซีนิกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนอาร์ซีนิก และถูกสกัดมากขึ้น ทำให้เกิดการนำกลับมากขึ้นเช่นกัน และเมื่อความเข้มข้นของสารสกัด **Cyanex 923** มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เปอร์เซ็นต์การสกัดของทั้งไอออนอาร์ซีนิก (III) และ อาร์ซีนิก (V) มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มมากขึ้นสารละลายเยื่อแผ่นเหลวจะมีความหนืดสูงขึ้น (Luccio et al., 2000) ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนแพร่ได้ช้าลง หรืออีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient,  $D'$ ) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะที่ละลายในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวนี้น้อยลง ดังสมการของ Stokes และ Einstein (Schulz, 1988; Cussler, 1997) ดังนี้

$$D' = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} \quad (45)$$



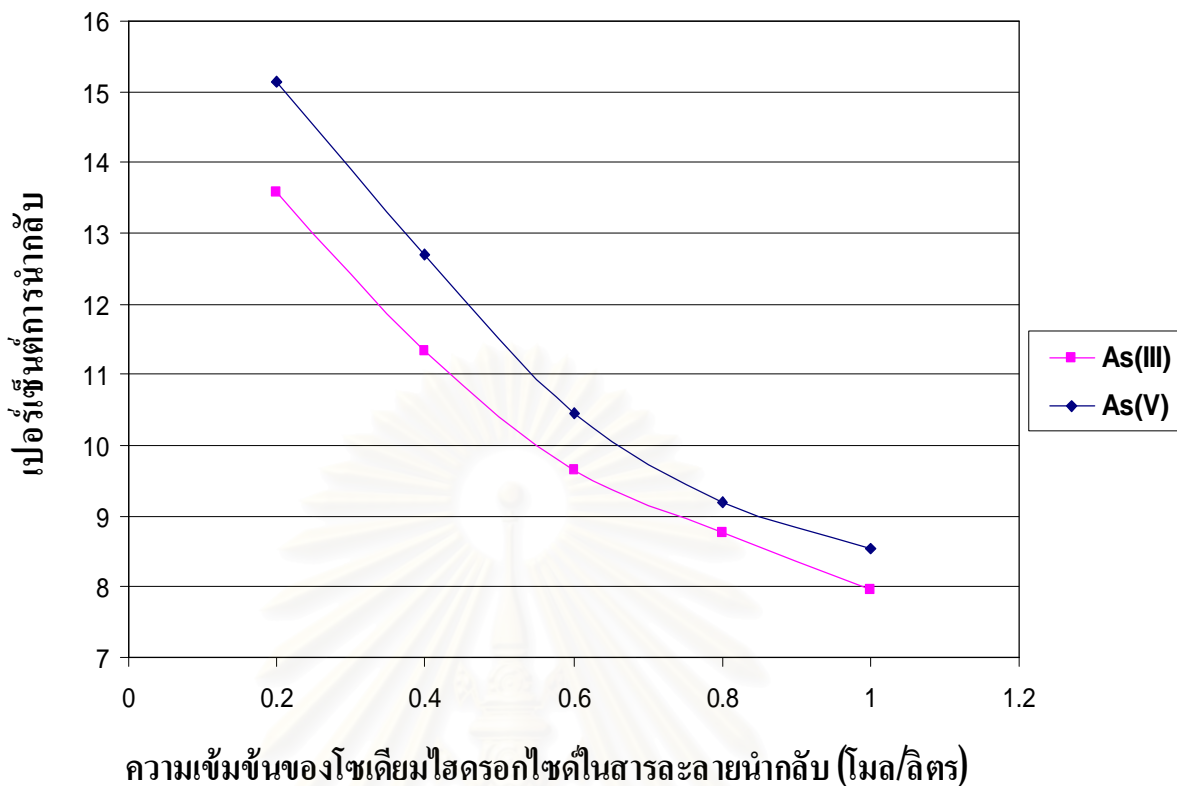
เมื่อ  $k_B$  คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว  $\pi$  คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31416  $\eta$  คือ ความหนืดของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว  $r$  คือ รัศมีของโมเลกุลของสารที่แพร่ผ่าน เมื่อสารประกอบเชิงซ้อนแพร่ได้ช้าลง จึงยังมีสารประกอบเชิงซ้อนบางส่วนที่ยังเกาะอยู่ที่ผิวสัมผัสทำให้ไอออนอาร์ซีนิกทำปฏิกิริยากับสารสกัดตรงบริเวณนั้นไม่ได้ ทำให้ไอออนอาร์ซีนิกที่ถูกทำปฏิกิริยามีจำนวนเท่าเดิมถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 คั่งนั้น เปรอร์เซ็นต์การสกัดจึงลดลง

รูปที่ 42 ยังมีลักษณะเหมือนกับรูปที่ 41 คือ ไอออนอาร์ซีนิก (V) ถูกสกัดออกมาได้ดีกว่าของอาร์ซีนิก (III) เนื่องจาก โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนของอาร์ซีนิก (III) มีขนาดเล็กกว่าไอออนอาร์ซีนิก (V) จึงทำให้สารสกัด Cyanex 923 จับกับไอออนอาร์ซีนิก (III) ไว้และปล่อยไอออนอาร์ซีนิก (V) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าออกมา จากหลักการของแรงพันธะไอออนิก สารสกัด Cyanex 923 ซึ่งเป็นกลางจะไปจับไอออนบวก (อาร์ซีนิก) ถ้าไอออนบวก ยังมีประจุน้อยจะทำให้แรงระหว่างพันธะยิ่งมาก (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2532)

### 41.3 ผลของความเข้มข้นและชนิดของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออนอาร์ซีนิก

#### 41.31 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการนำกลับไอออนอาร์ซีนิก

การทดลองนี้ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ และที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร และกำหนดปัจจัยอื่น ๆ คงที่ คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 1.0 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกเท่ากับ 20 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 เท่ากับ 30 เปรอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 43



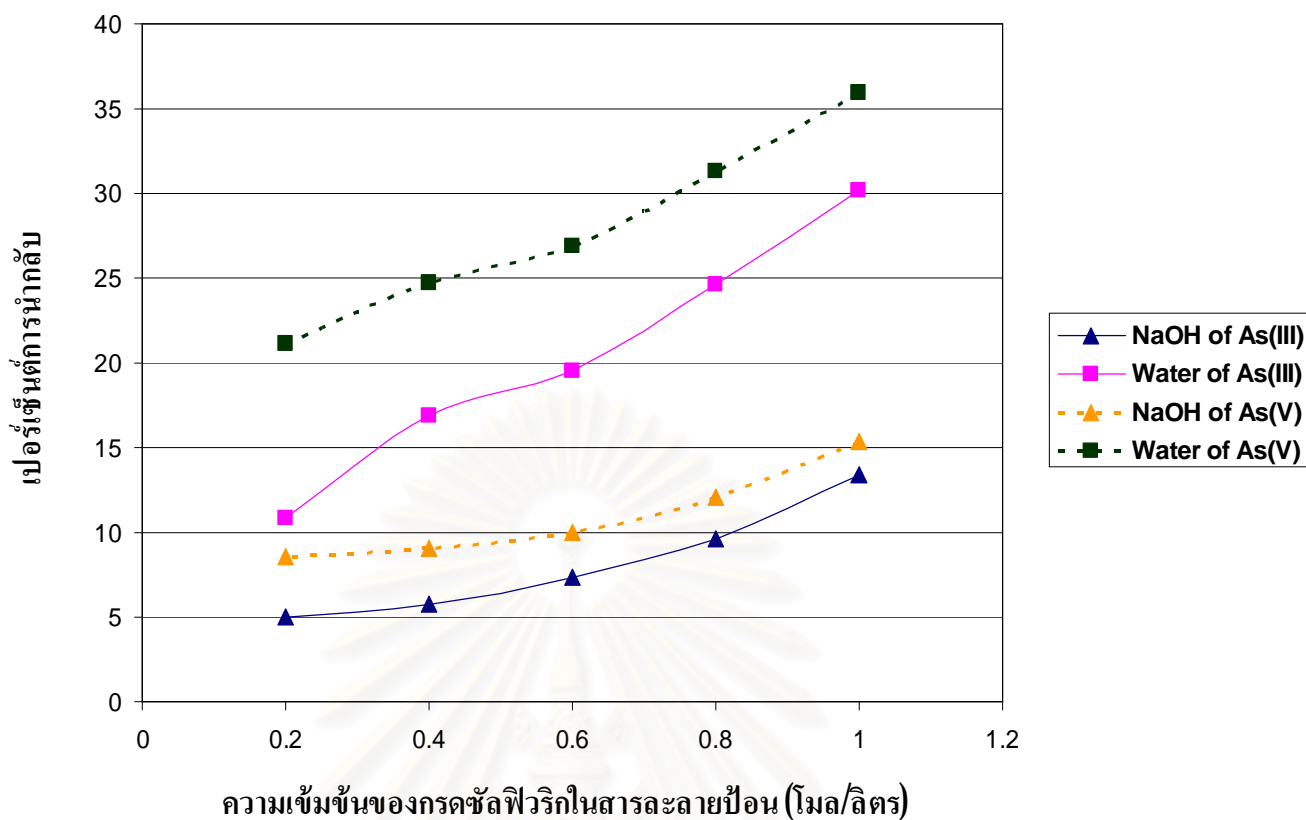
รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนอาร์ซีนิก (III) และ ไอออนอาร์ซีนิก (V)

จากผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนอาร์ซีนิกมีค่าสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าใกล้ศูนย์ และมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น

**41.32 ผลของชนิดสารละลายนำกลับระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำบริสุทธิ์ต่อการนำกลับไอออนอาร์ซีนิก โดยที่แปรผันค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน**

การทดลองนี้ศึกษาชนิดของสารละลายนำกลับระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำบริสุทธิ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตร และกำหนดปัจจัยอื่นๆ คงที่ คือ ค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกในสารละลายป้อนเท่ากับ 20 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 ที่ละลายอยู่ในโทลูอินเท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองแสดงในรูปที่

44

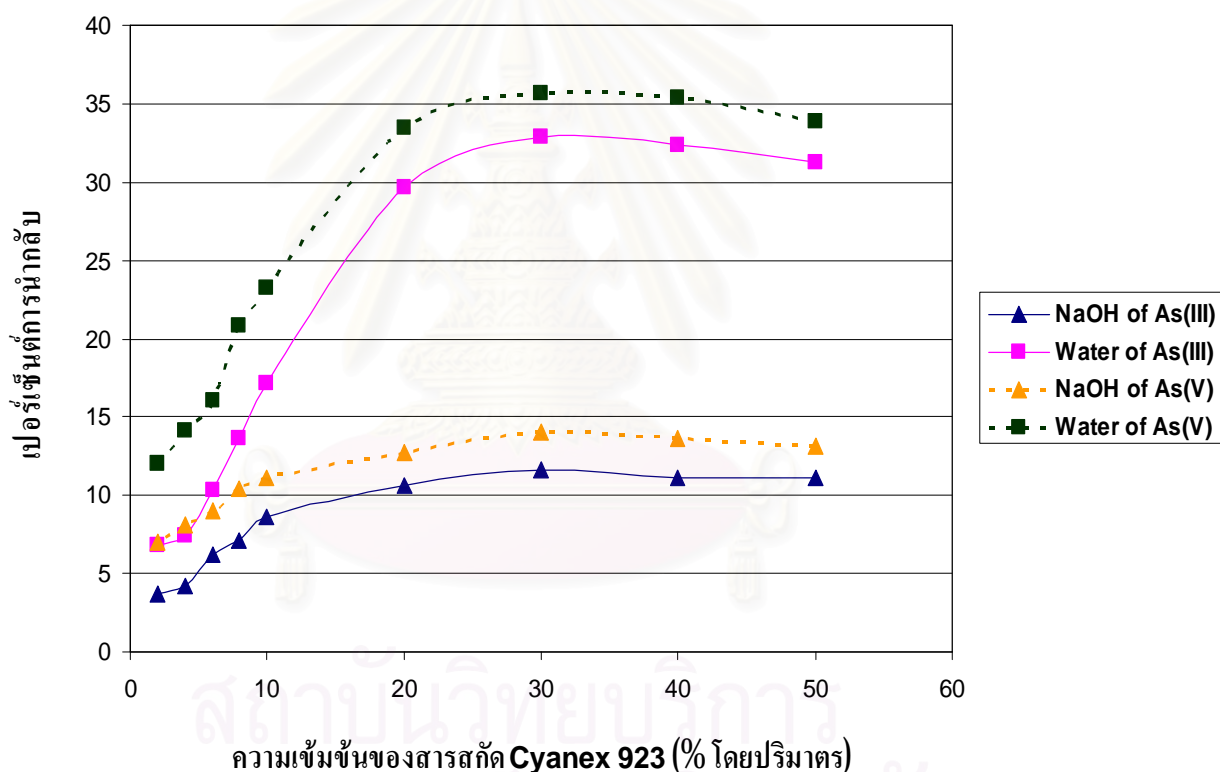


**รูปที่ 44** ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนกับเปอร์เซ็นต์การนำกลับไอออนอาร์ซีนิก (III) และ ไอออนอาร์ซีนิก (V) เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การนำกลับของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำบริสุทธิ์

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารละลายนำกลับ สามารถนำกลับทั้งไอออนอาร์ซีนิก (III) และ ไอออนอาร์ซีนิก (V) ได้ดีกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นค่าอย่างมาก ตามหลักการถ่ายเทมวล สารละลายที่ยังมีความเป็นด่างมากก็จะยิ่งนำกลับไอออนของโลหะได้มาก แต่การที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นำกลับไอออนอาร์ซีนิกได้ไม่คือนั้น เนื่องจากไอออนอาร์ซีนิกอยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก เมื่อเกิดปฏิกิริยาการสกัด กรดที่อยู่ในสารละลายป้อนจะปนเข้าไปในสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นด่าง ซึ่งทำปฏิกิริยากับกรดที่อยู่ในสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นตะกอนเกลือไปปิดรูพรุนของเส้นใยกลวง ทำให้ขัดขวางการนำกลับไอออนอาร์ซีนิก ส่วนการนำกลับไอออนอาร์ซีนิกมีค่าสูงกว่าเมื่อนำน้ำบริสุทธิ์ อธิบายได้ว่ากรดมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ไอออนอาร์ซีนิกที่อยู่ในสารละลายกรดก็จะออกมาในน้ำซึ่งเป็นสารละลายนำกลับด้วย

### 41.33 ผลของชนิดสารละลายนำกลับระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำบริสุทธิ์ต่อการนำกลับไอออนอาร์ซีนิก ที่ค่าความเข้มข้นของสารสกัด *Cyanex 923* ต่าง ๆ

การทดลองนี้ศึกษาชนิดของสารละลายนำกลับระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำบริสุทธิ์ ที่ให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด *Cyanex 923* เท่ากับ 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และที่กำหนดปัจจัยอื่นๆ คงที่ คือ ค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกในสารละลายป้อนมีค่าเท่ากับ 20 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนเท่ากับ 1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ผลการทดลองได้แสดงในรูปที่ 45

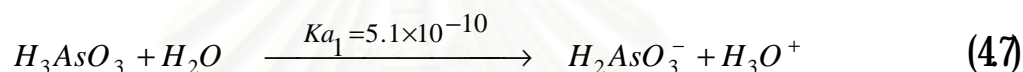
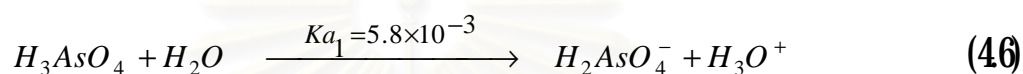


รูปที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัด *Cyanex 923* ในสารละลายเชื่อมแผ่นเหลว กับเปอร์เซ็นต์การนำกลับ ไอออนอาร์ซีนิก (III) และไอออนอาร์ซีนิก (V) เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การนำกลับของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำบริสุทธิ์

จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 41.32 ซึ่งสนับสนุนว่าการใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารละลายนำกลับ สามารถนำกลับไอออนอาร์ซีนิกได้ดีกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และเนื่องจากผลการทดลองที่ได้ในแต่ละภาวะเป็นการยืนยันว่า สามารถนำกลับไอออนอาร์ซีนิก (V) ได้ดีกว่าอาร์ซีนิก (III) เนื่องจากขนาดโครงสร้างของไอออนอาร์ซีนิก

(III) มีขนาดเล็กกว่าไอออนอาร์ซีนิก (V) จึงมีแรงยึดเกาะอยู่ในโมเลกุลของสารสกัด Cyanex 923 มากกว่า ทำให้การนำกลับไอออนอาร์ซีนิก (III) ออกมาในสารละลายนำกลับทำได้น้อยกว่าไอออนอาร์ซีนิก (V) ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะแยกอาร์ซีนิก (III) ออกจากอาร์ซีนิก (V)

การใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับได้ผลดี แสดงว่าไม่เกิดปฏิกิริยาการนำกลับ หากแต่เกิดการละลายของ  $H_3AsO_4$  หรืออาร์ซีนิก (V) ที่อยู่ในสารประกอบเชิงซ้อน  $H_3AsO_4 \cdot H^+ \cdot TRPO$  และ  $HAsO_3$  หรืออาร์ซีนิก (III) ที่อยู่ในสารประกอบเชิงซ้อน  $HAsO_3 \cdot H^+ \cdot TRPO$  บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับน้ำ ดังสมการ (Frederick Pearson Treadwell, 1947)



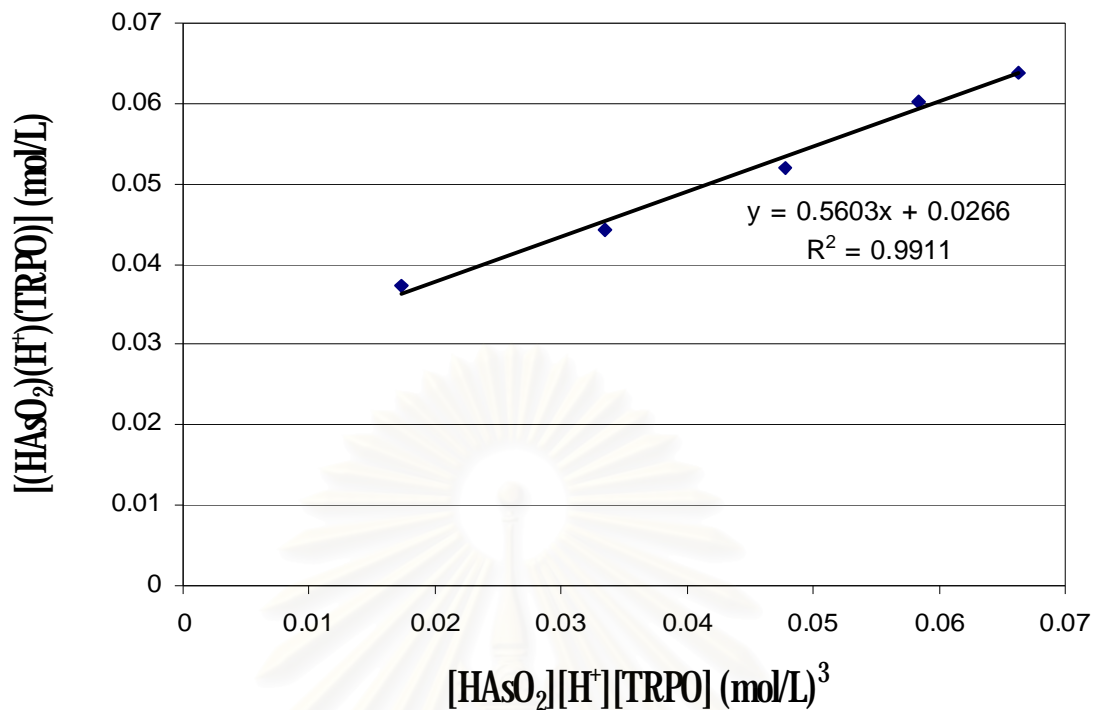
จะเห็นว่าค่าคงที่การแตกตัวของกรดของไอออนอาร์ซีนิก (V) ในสมการที่ (46) มีค่าสูงกว่าของไอออนอาร์ซีนิก (III) ในสมการที่ (47) ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองว่าสามารถนำกลับไอออนอาร์ซีนิก (V) ได้ดีกว่าอาร์ซีนิก (III)

## 4.2 การประยุกต์ผลการทดลองกับทฤษฎี

4.2.1 การคำนวณค่าคงที่สมดุลของการสกัด (Equilibrium Constant,  $K_{ex}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, D)

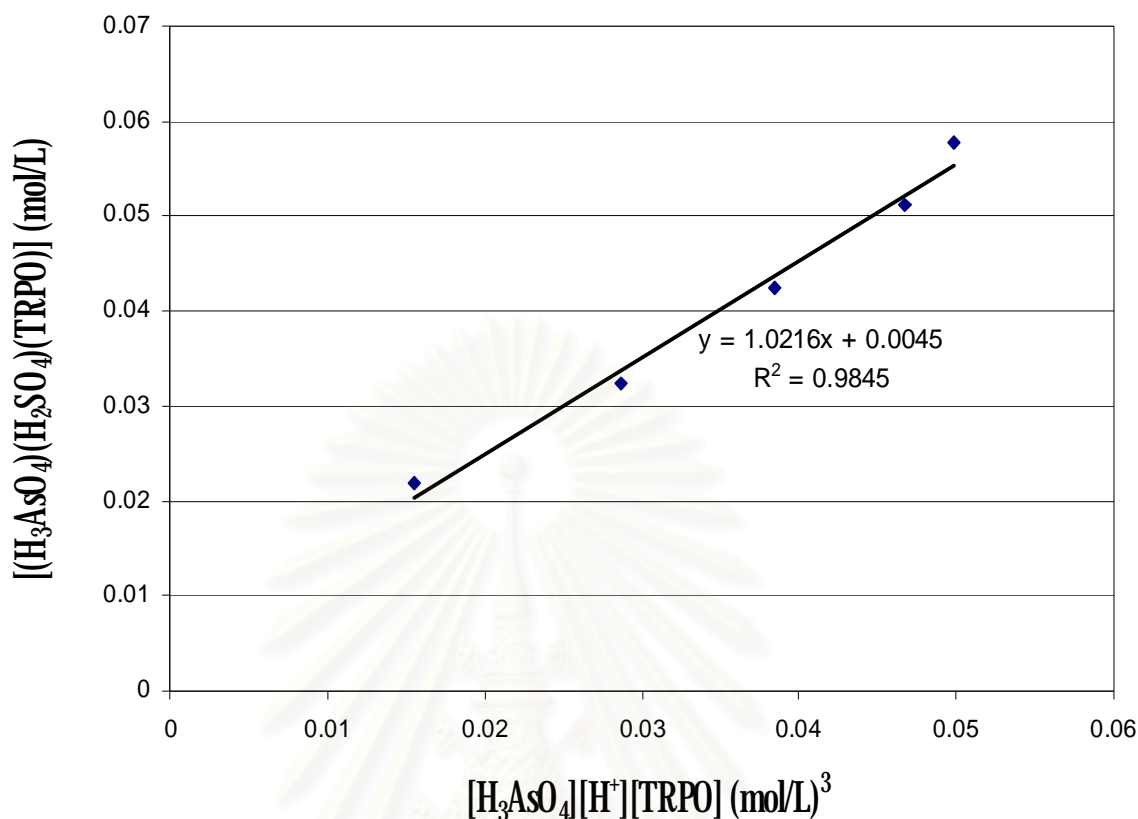
สามารถคำนวณค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์การกระจาย ของการสกัดไอออนอาร์ซีนิกได้จากสมการที่ (212) และ (213) ซึ่งค่าคงที่สมดุลของไอออนอาร์ซีนิก (III) และไอออนอาร์ซีนิก (V) แสดงด้วยความชันของกราฟในรูปที่ 46 และ 47 มีค่าเท่ากับ  $0.5603$  (ลิตรต่อโมล)<sup>2</sup> และ  $1.0216$  (ลิตรต่อโมล)<sup>2</sup> ตารางที่ 41 แสดงค่าคงที่สมดุลและสัมประสิทธิ์การกระจาย ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร





รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เริ่มต้นปฏิกิริยากับสุดท้ายของปฏิกิริยาของไอออนอาร์ซีนิก (III) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 เท่ากับ 30% โดยปริมาตร และใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ

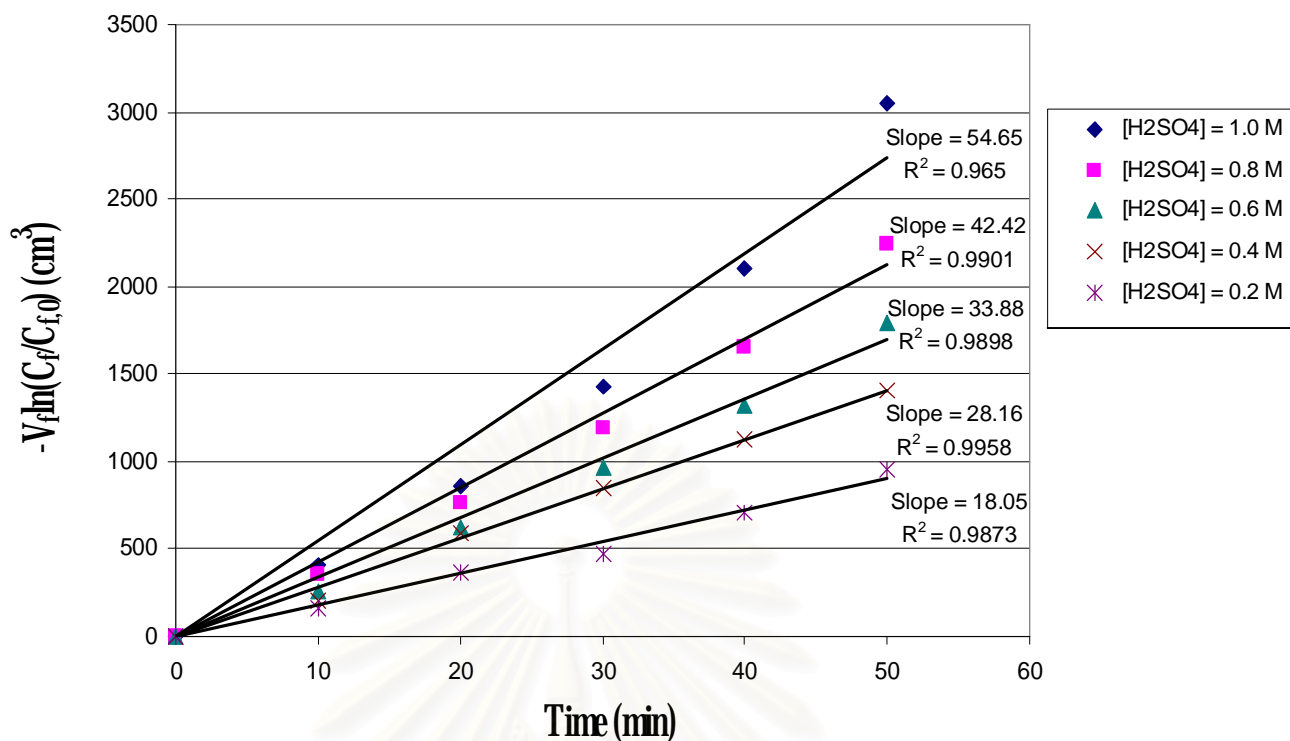
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



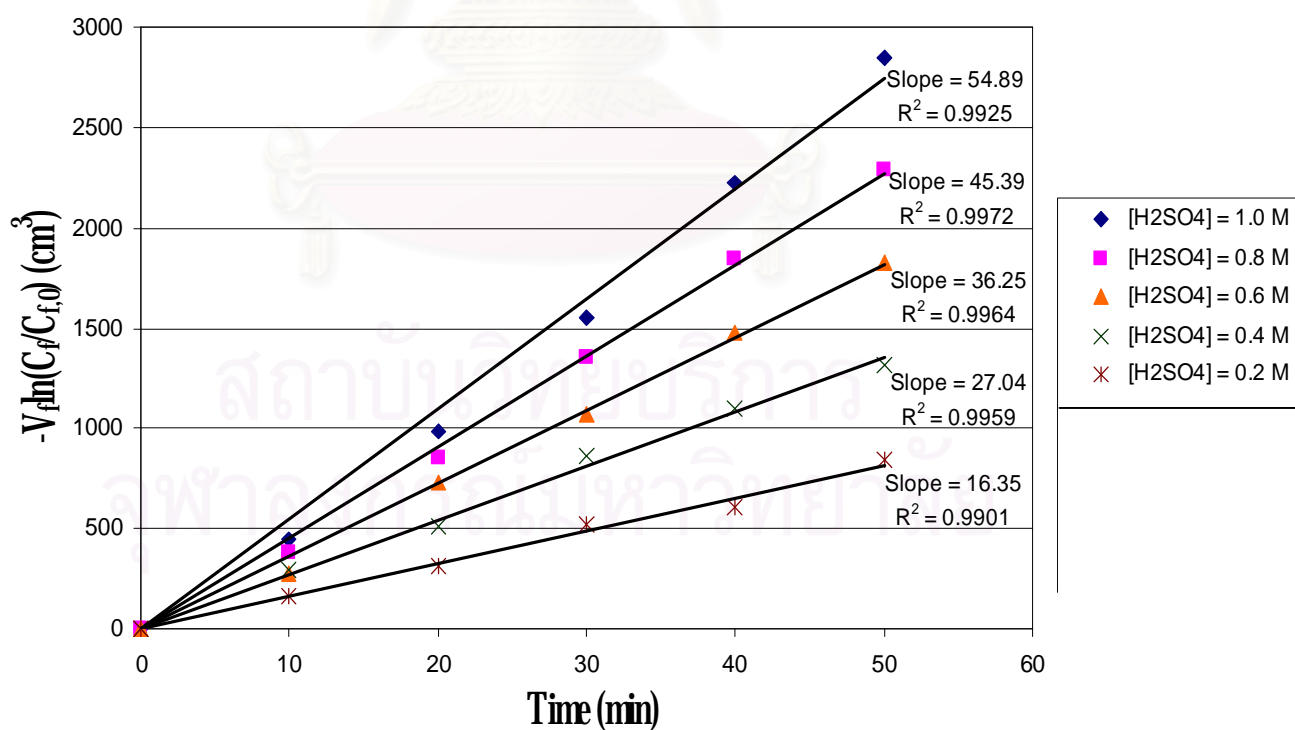
รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เริ่มต้นปฏิกิริยากับสุดท้ายของปฏิกิริยาของไอออนอาร์ซีนิก (V) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 เท่ากับ 30% โดยปริมาตรและใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ

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

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (214) และสมการที่ (215) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนอาร์ซีนิก (III) และไอออนอาร์ซีนิก (V) ที่ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร แสดงในรูปที่ 48 และ 49 ตามลำดับ และตารางที่ 41



รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln(C_f/C_{f0})$  ของไอออนอาร์ซีนิก (III) ในสารละลายป้อนกับ เวลา ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกต่าง ๆ



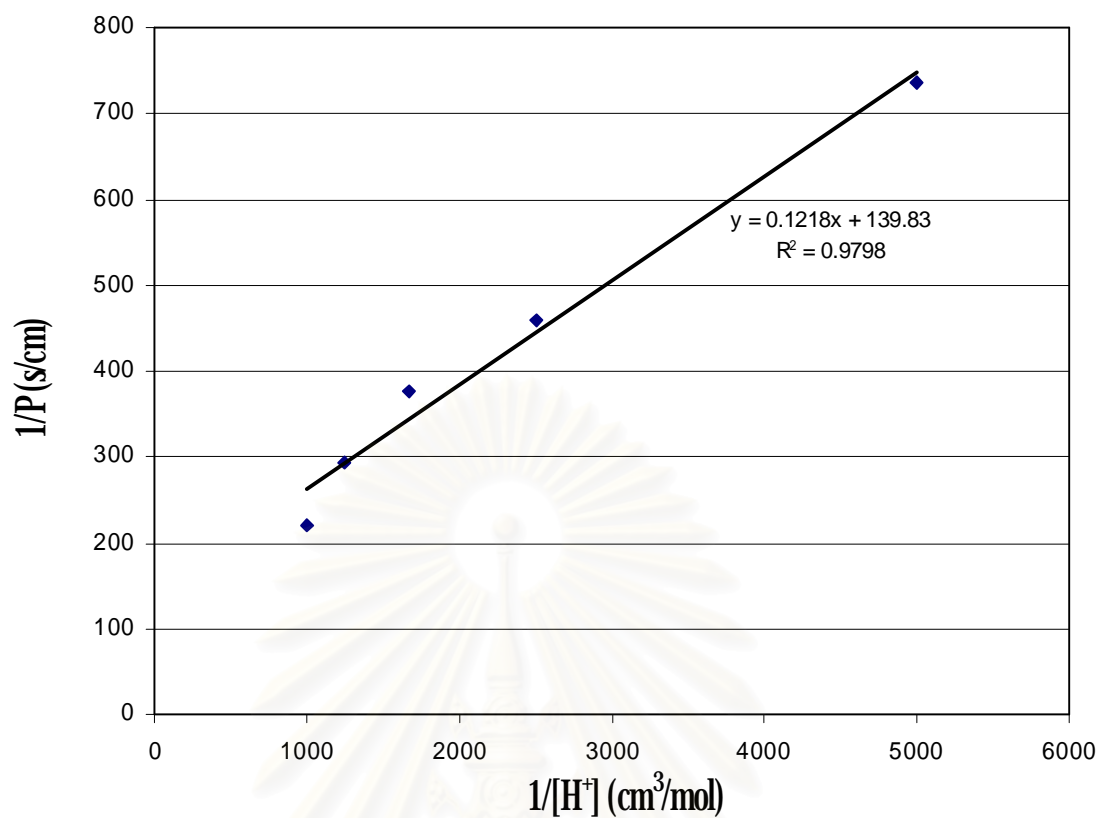
รูปที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln(C_f/C_{f0})$  ของไอออนอาร์ซีนิก (V) ในสารละลายป้อนกับ เวลา ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกต่าง ๆ

ตารางที่ 41 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว และ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของไอออนอาร์ซีนิก (III) และไอออนอาร์ซีนิก (V) ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในช่วง 0.2-1.0 โมลต่อลิตร

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (M)	As (III)		As (V)	
	D (-)	P×10 <sup>5</sup> (cm/s)	D (-)	P×10 <sup>5</sup> (cm/s)
0.2	0.085	2.26	0.155	2.04
0.4	0.170	3.62	0.310	3.47
0.6	0.255	4.42	0.465	4.76
0.8	0.340	5.66	0.620	6.11
1.0	0.425	7.54	0.775	7.58

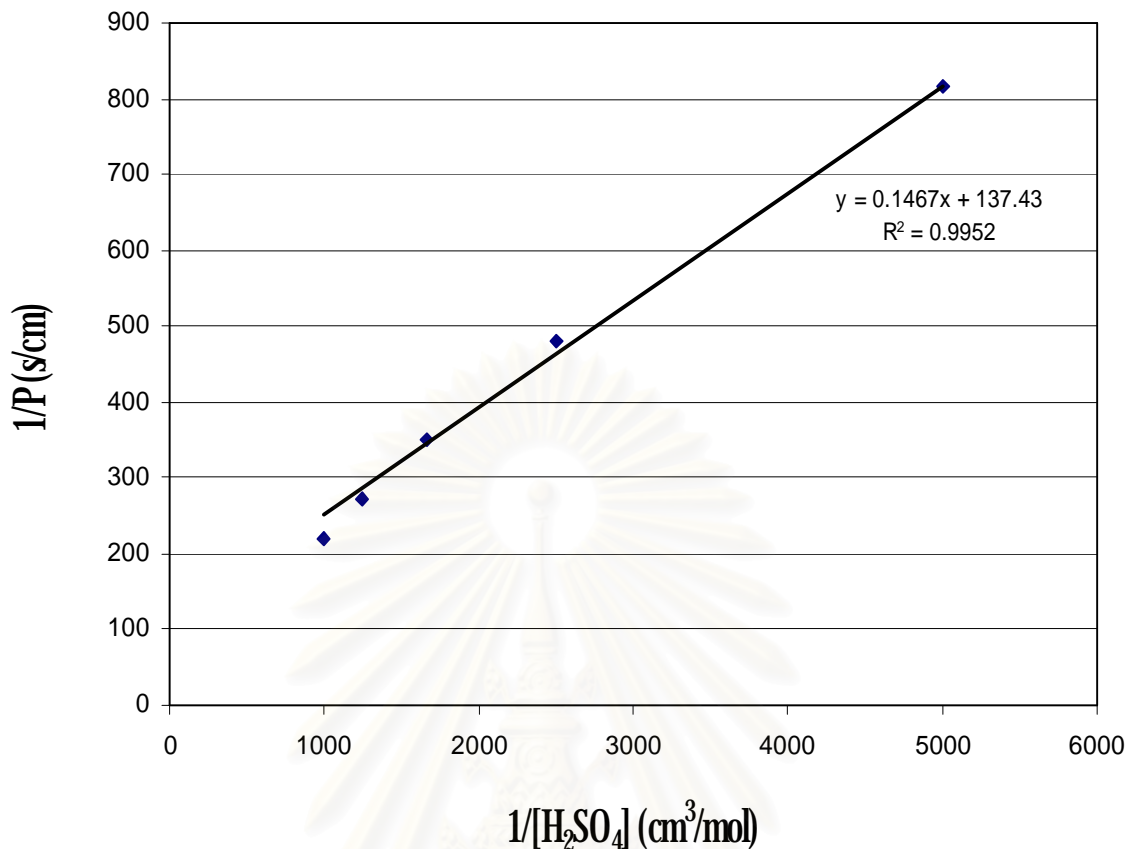
4.2.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ ( $k_f$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ ( $k_f$ ) และของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.20) เมื่อสร้างกราฟระหว่าง  $1/P$  และ  $1/[H^+]$  ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ของกรดซัลฟิวริก จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ ( $k_f$ ) และของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ของอาร์ซีนิก (III) และอาร์ซีนิก (V) ได้ดังรูปที่ 4.10 (หรือรูป ก.3) และ 4.11 ตามลำดับ จากความชันของกราฟ คือ  $\frac{r_i}{r_{lm} K_{ex} k_m [TRPO]}$  และจุดตัดแกน คือ  $\frac{1}{k_i}$  ตัวอย่างแสดงในภาคผนวก ก.5



รูปที่ 410 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน  $1/P$  และ ฟังก์ชัน  $1/[H^+]$  ของไอออนาร์ซีนิก (III)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 411 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน  $1/P$  และ ฟังก์ชัน  $1/[H^+]$  ของไอออนอาร์ซีนิค (V)

จากรูปที่ 410 และ 411 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลวของไอออนอาร์ซีนิค (III) เท่ากับ  $7.15 \times 10^3$  และ  $1.614 \times 10^2$  เซนติเมตรต่อวินาที และของไอออนอาร์ซีนิค (V) เป็น  $7.28 \times 10^3$  และ  $7.35 \times 10^3$  เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ สังเกตได้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำของไอออนอาร์ซีนิค (V) สูงกว่าของไอออนอาร์ซีนิค (III) ดังนั้น จากเหตุผลเหล่านี้ ทำให้กล่าวได้ว่าขั้นตอนควบคุมอัตรา คือ การถ่ายโอนมวลของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษา ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิคโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด **Cyanex 923** ในตัวทำละลายโทลูอิน ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนมวลของการสกัดไอออนอาร์ซีนิคเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นๆ คงที่ คือ ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิคในสารละลายป้อนเป็น **20** ส่วนในล้านส่วน อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับมีค่าเท่ากับ **100** มิลลิลิตรต่อนาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน และเป็นการไหลผ่านครั้งเดียว ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ในช่วงความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนที่ศึกษาจาก **0.2-1.0** โมลต่อลิตร การสกัดของไอออนอาร์ซีนิคจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกสูงขึ้น
2. เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของสารสกัด **Cyanex 923** ในตัวทำละลายโทลูอิน ไอออนอาร์ซีนิคจะถูกสกัดออกมาได้ดีเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด และมีค่าการสกัดสูงสุดที่ความเข้มข้นของสารสกัด **30** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารสกัดมากกว่า **30** เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
3. เมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง **0.2-1.0** โมลต่อลิตร พบว่าการนำกลับไอออนอาร์ซีนิคมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าใกล้ศูนย์ (ซึ่งสภาพใกล้เคียงกับน้ำบริสุทธิ์) ดังนั้น เมื่อเปลี่ยนสารละลายนำกลับจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มาเป็นน้ำ พบว่าการนำกลับไอออนอาร์ซีนิคเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์
4. อาร์ซีนิค (V) ถูกสกัดและนำกลับได้ดีกว่า อาร์ซีนิค (III) ในภาวะการทดลองเดียวกัน จึงมีความเป็นไปได้ในการแยกไอออนอาร์ซีนิค (V) ออกจากไอออนอาร์ซีนิค (III)
5. จากการศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนมวล
  - ค่าคงที่สมดุลของการสกัดอาร์ซีนิค (III) และไอออนอาร์ซีนิค (V) เท่ากับ **0.5603** (ลิตรต่อโมล)<sup>2</sup> และ **1.0216** (ลิตรต่อโมล)<sup>2</sup> ตามลำดับ

- สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ ( $k$ ) ของไอออนอาร์ซีนิก (III) และ ไอออนอาร์ซีนิก (V) เท่ากับ  $7.15 \times 10^3$  และ  $7.28 \times 10^3$  เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) ของไอออนอาร์ซีนิก (III) และ ไอออนอาร์ซีนิก (V) เท่ากับ  $1.614 \times 10^2$  และ  $7.35 \times 10^3$  เซนติเมตรต่อวินาที

**6** จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ของไอออนอาร์ซีนิก (III) และ ไอออนอาร์ซีนิก (V) สรุปได้ว่า

- สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลวมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ แสดงว่า ขั้นตอนควบคุมอัตรา คือ การถ่ายโอนมวลของชั้นฟิล์มระหว่างสารละลายป้อนและเยื่อแผ่นเหลว
- สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำของไอออนอาร์ซีนิก (V) สูงกว่าของไอออนอาร์ซีนิก (III) แสดงว่า การถ่ายโอนมวลของไอออนอาร์ซีนิก (V) จากสารละลายป้อนเข้าไปในเยื่อแผ่นเหลวดีกว่าไอออนอาร์ซีนิก (III) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่สามารถสกัดไอออนอาร์ซีนิก (V) ได้ดีกว่าไอออนอาร์ซีนิก (III)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนที่มีต่อการสกัดไอออนอาร์ซีนิก ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้นั้นถูกจำกัด ด้วยความสามารถในการต้านทานของเส้นใยกลวง ซึ่งสามารถทนความเป็นกรดได้ ไม่เกิน 1.0 โมลต่อลิตร ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วนั้น จะเห็นว่า การสกัดไอออนอาร์ซีนิก ยังมีแนวโน้มสูง ถ้าหากความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกสูงขึ้น
2. นอกจากการศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนแล้ว เพื่อเป็นแนวทางในงานวิจัยต่อไป ควรทดสอบชนิดและความเข้มข้นของกรดชนิดอื่น ๆ แล้วสังเกตว่าผลที่ได้รับนั้นมีความใกล้เคียงกับผลงานวิจัยนี้หรือไม่ ซึ่งอาจจะทำให้การสกัดไอออนอาร์ซีนิกนั้นสูงขึ้นก็เป็นได้
3. ควรที่จะทดลองเปลี่ยนชนิดของสารสกัดเป็นชนิดอื่น ๆ ซึ่งอาจจะใช้สารสกัดชนิดเดียว หรือใช้สารสกัดสองชนิดผสมกัน
4. ควรทดลองศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารละลายนำกลับชนิดอื่นๆ ที่เป็นกรดอ่อนหรือต่างชนิดอื่นๆ

5. ควรศึกษาผลของอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับด้วย ซึ่งอาจจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดและการนำกลับ
6. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มขนาดของกระบวนการสกัดและการนำกลับไอออนอาร์ซีนิก เพื่อที่จะได้นำมาใช้กับสารละลายป้อนที่มีปริมาณมาก ๆ สำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมจริง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กิตติพงษ์ เชิญวัฒนชัย. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งจากหลุมก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2541(ก). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อทำ แผนปฏิบัติการฟื้นฟูสภาพการปนเปื้อนของสารหนูที่อำเภอรัตนบุรี จังหวัด นครศรีธรรมราช เล่มที่1/2 กรุงเทพมหานคร: กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. (อัดสำเนา)

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2541(ข). เอกสารชุดสารเคมีเฉพาะเรื่อง (Monograph), สารหนู(Arsenic) พิมพ์ ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายศูนย์ข้อมูลสารอันตรายและอนุสัญญา กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ. (อัดสำเนา)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิทยาศาสตร์. 2532. เคมีทั่วไป. กรุงเทพมหานคร: คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นิติต สุลโกลมาน. 2544. การสกัดนีโอดีเมียมโดยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

ประกร รามกุล. 2544. การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดีเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่ พองด้วยเส้นใยกลวง วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกพิชญ์ ทรงคุณ. 2548. การถ่ายเทมวลโคบอลต์ไอออนด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Alguacil, F.J., Coedo A.G., Dorado MT., and Padilla I. 2001. Phosphine oxide mediate transport: modeling of mass transfer in supported liquid membrane transport of gold (III) using cyanex 923. Chemical Engineering Science 56: 3115-3122.
- Bhaumik, A., Samanta, S., and Mal, N.K. 2004. Efficient Removal of Arsenic from Polluted Ground Water. Journal of Applied Sciences 4(3): 467-471.
- Bird R.B. Stewart W.E., and Lightfoot E.N. 1960. Transport Phenomena John Wiley & Sons
- Bogacki M, B., Wisniewski, M., and Szymanowski, J. 1998. Effect of Extractant on Arsenic (V) Recovery from Sulfuric Acid Solutions. J. Radioanal. Nucl. Chem 228(1-2): 57-61.
- Breembroek, G.R.M, Witkamp, G.J., and Rosmalen, G.M 1998. Extraction of Cadmium with Trilaurylamine Kerosene through a Flat-sheet-supported Liquid Membrane. Journal of Membrane Science 147:195-206.
- Cussler E.L. 1997. Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems Cambridge University Press, USA.
- Dahuron L., and E.L. Cussler. 1988. Protein extractions with hollow fibers. AIChE. 34(1):130
- Danesi, P. R. 1984. A simplified model for the coupled transport of metal ions through hollow fiber supported liquid membranes. Journal of Membrane Science. 20: 231.
- Danesi, P.R., and Rickert, P.G. 1986. Some Observation on the Performance of Hollow Fiber Supported Liquid Membrane 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.
- Frederick Pearson Treadwell. 1947. Analytical Chemistry. University of Michigan Chapman & Hall, Limited
- Gu, Z., 1990. A new liquid membrane technology-electrostatic pseudo liquid membrane. Journal of Membrane Science 52: 77-88



- Iberhan L., and Wisniewskisi M. 2001. Extraction of arsenic (III) and arsenic(V) with Cyanex 301, Cyanex 925 and their mixture. Hydrometallurgy 63: 23-30.
- Izatt, R. M., Lamp, J. D., and Bruening R. L. 1988. Comparison of bulk, emulsion, thin sheet supported, and hollow fiber supported liquid membrane in macrocycle-mediated cation separation. Separation Science and Technology 23(12&13): 1645-1658.
- Komasawa, I., Otake, T., and Yamashita, T. 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: 17-30.
- Longquan, L., Ping Y., Wenzhong G., and Yadong L. 1999. Emulsion liquid membrane separation of As (III) and As(V). Fresenius J. Anal Chem 363: 317-319.
- 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 membrane. Journal of Membrane Science 174: 217-224.
- Marr, R., and Kopp, A. 1982. Liquid membrane Technology: a Survey of Phenomena Mechanism and Models. Ind. Chem Eng 22(1): 44-60.
- Nakano, M., Takahashi, K., and Takeuchi, H. 1987. A Method of 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.
- Panchareon, U., Ramakul, P., and Patthaveekongka, W. 2005. Purely Extraction and Separation of Mixture of Cerium(IV) and Lanthanum(III) Via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. J. Ind. Eng. Chem 11(6): 926-931.
- Pattaveekongka Weerawat, Vijitchaleompong Nattapol and Panchareon Ura. 2003. Selective Recovery of Palladium from Used Aqa Regia by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Korean J. Chem Eng 20(6): 1092-1096.



- Patthaveekongka W., Ramakul, P., Assabumrungrat, S. 2006. Transport of Cerium, Lanthanum, Neodymium and Palladium via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane Based on Equilibrium Theory. Journal of Chinese Institute of Chemical Engineer 37(3): 1-11.
- Porter C. 1990. Handbook of Industrial Membrane Technology New Jersey: Noyes Publications.
- Ramakul Prakorn and Panchareon Ura. 2003. Synergistic Extraction of Mixture of Lanthanum and Neodymium by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Korean J. Chem Eng 20(4): 724-730
- Ramakul, P., Nakararueng K., and Panchareon, U. 2004. One-through Selective Separation of Copper, Chromium and Zinc Ions by Hollow Fiber Support Liquid Membrane. Korean J. Chem Eng 21(6): 1212-1217.
- Ramakul, P., Pattaveekongka, W., and Panchareon, U. 2005. Selective Separation of Trivalent and Tetravalent Lanthanide from Mixture by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. J. Chin. Inst. Chem Engs. 36(5): 1-7.
- Ramakul, P., Pattaveekongka, W., and Panchareon, U. 2006. Mass transfer modeling of membrane carrier system for extraction of Ce(IV) from sulfate media using hollow fiber supported liquid membrane. Korean J. Chem Eng 23(1): 85-92
- Ramakul, P., Songkun, E., Pattaveekongka, W., Hronec, M., and Panchareon, U. 2006. Permeation study on the hollow fiber supported liquid membrane for the extraction of Cobalt(II). Korean J. Chem Eng 23(1): 117-123
- Rathore, N. S., Sorawane, 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
- 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.

- Sheng S. F., Hideto, M., and Masaaki, T. 2004. Ce(III) recovery by supported liquid membrane using polyethylene hollow fiber prepared via thermally induced phase separation. Sep. and Purifi. Tech. 36: 17.
- Tanigaki, Ueda, M., Shiode, T., and Eguchi, W. 1988. Facilitated Transport of Zinc Chloride Through Hollow Fiber Supported Liquid Membrane. Part I. Transport Mechanisms. Separation Science and Technology 22(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 M, Masuyama H, Takaya H, and Asano S. 1987. Development of Spiral-Type Supported Liquid Membrane Module for Separation and Concentration Metal Ions. Separation Science and Technology 22(11): 2175-2201.
- Wisniewski, M. 1997. Extraction of arsenic from sulphuric acid solution by Cyanex 923. Hydrometallurgy 46: 235-241.
- Wisniewski, M. 1998. Removal of arsenic from sulphuric acid solutions. J. Radioanal. Nucl. Chem 228(1-2): 105-108.
- Yang, Ming-Chien, and Cussler, E.L. 1986. Designing Hollow Fiber Contractor. AIChE Journal. 32(11): 1910-1916.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบและผลการคำนวณ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในสารละลายป้อนต่อการสกัดและการนำกลับ

	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (M)	As (ppm.)			
		สารละลาย ป้อนเข้า	สารละลาย ป้อนออก	สารละลายนำกลับ ขาออกโดยใช้ NaOH	สารละลายนำกลับ ขาออกโดยใช้น้ำ
As (III)	1	17.9	11	2.4	5.4
	0.8	18.71	13	1.8	4.6
	0.6	18.92	14.2	1.4	3.7
	0.4	18.99	15.5	1.1	3.2
	0.2	20.02	17.8	1	2.70
As (V)	1	18.9	10.10	2.90	6.8
	0.8	19.8	11.60	2.40	6.2
	0.6	19.7	13.10	1.97	5.3
	0.4	19.8	14.50	1.80	4.9
	0.2	19.9	15.60	1.7	4.2

ภาวะที่ทำการทดลอง : [As]<sub>f</sub> = 20 ppm, [Cyanex 923] = 30 % โดยปริมาตร, Q<sub>f</sub> และ Q<sub>s</sub> = 100 มิลลิลิตรต่อนาที, [NaOH] ขาเข้า = 0.2 โมลต่อลิตร

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 ต่อการสกัดและการนำกลับ

	Cyanex923 (% v/v)	As (ppm)			
		สารละลาย ป้อนเข้า	สารละลาย ป้อนออก	สารละลายนำกลับ ขาออกโดยใช้ NaOH	สารละลายนำกลับ ขาออกใช้น้ำ
As (III)	50	18.85	12.3	2.1	5.9
	40	18.85	12	2.1	6.1
	30	18.85	11.6	2.2	6.2
	20	18.85	12.28	2	5.6
	10	19.8	15.65	1.7	3.4
	8	21.2	17.78	1.5	2.9
	6	19.4	17.24	1.2	2
	4	18.8	17.2	0.8	1.4
As (V)	2	19	17.6	0.7	1.3
	50	19.8	11.6	2.6	6.7
	40	19.8	11.2	2.7	7.0
	30	19.9	10.8	2.8	7.1
	20	19.7	11.4	2.5	6.6
	10	19.8	15.2	2.2	4.6
	8	20.1	16.3	2.1	4.2
	6	19.9	16.6	1.8	3.2
	4	19.8	16.9	1.6	2.8
2	19.9	17.2	1.4	2.4	

ภาวะที่ทำการทดลอง :  $[As]_f = 20 \text{ ppm}$ ,  $[H_2SO_4] = 1.0$  โมลต่อลิตร,  $Q_f$  และ  $Q_s = 100$  มิลลิลิตร  
ต่อนาที,  $[NaOH] = 0.2$  โมลต่อลิตร

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการสกัดและการนำกลับ

	NaOH (M)	As (ppm.)		
		สารละลายป้อนขาเข้า	สารละลายป้อนขาออก	สารละลายนำกลับขาออก
As (III)	1	19.7	12.2	1.57
	0.8	19.6	12.2	1.72
	0.6	19.4	12.0	1.87
	0.4	19.4	12.0	2.2
	0.2	19.9	12.3	2.7
As (V)	1	19.9	10.9	1.7
	0.8	19.8	10.8	1.82
	0.6	20.1	11	2.1
	0.4	19.7	10.8	2.5
	0.2	19.8	10.8	3

ภาวะที่ทำการทดลอง :  $[As]_f = 20 \text{ ppm}$ ,  $[H_2SO_4] = 1.0$  โมลต่อลิตร,  $[Cyanex 923] = 30\%$  โดยปริมาตร,  $Q_f$  และ  $Q_s = 100$  มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.4 ข้อมูลผลการศึกษาค่าอัตราส่วนการกระจายตัวและค่าการซึมผ่านที่ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกต่าง ๆ

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (M)	As (III)		As (V)	
	D (-)	P×10 <sup>5</sup> (cm/s)	D (-)	P×10 <sup>5</sup> (cm/s)
0.2	0.085	2.26	0.155	2.04
0.4	0.170	3.62	0.310	3.47
0.6	0.255	4.42	0.465	4.76
0.8	0.340	5.66	0.620	6.11
1.0	0.425	7.54	0.775	7.58

ภาวะที่ทำการทดลอง : [As]<sub>f</sub> = 20 ppm, [Cyanex 923] = 30 % โดยปริมาตร, Q<sub>f</sub> และ Q<sub>s</sub> = 100 มิลลิลิตรต่อนาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา

#### ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา (Equilibrium Constant, $K_{ex}$ )

จากสมการที่ปฏิกิริยาการสกัด ไอออนอาร์ซีนิก (III) และ ไอออนอาร์ซีนิก (V) ในสมการที่ (210) และ (211) สามารถเขียนความสัมพันธ์ค่าคงที่สมดุลได้ตามลำดับ ดังนี้

$$K_{ex} = \frac{[(HAsO_2)(H^+)(TRPO)]}{[HAsO_2][H^+][TRPO]} \quad (ข.1)$$

$$K_{ex} = \frac{[(H_3AsO_4)(H^+)(TRPO)]}{[H_3AsO_4][H^+][TRPO]} \quad (ข.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, D) (Seader and Ernest, 1988; Rathore et al., 2001)

$$D = \frac{[(HAsO_2)(H^+)(TRPO)]}{[HAsO_2]} = K_{ex} [H^+][TRPO] \quad (ข.3)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, P) (Danesi, 1984)

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

โดยที่

$$f = \frac{Q_f}{PLepNr_i} \quad (\text{จ.4})$$

เมื่อ

- $P$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน  
 $C_f$  = ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกที่เวลา  $t$   
 $C_{f,0}$  = ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกที่เวลาเริ่มต้น  
 $A$  = พื้นที่การถ่ายโอนมวล  
 $V_f$  = ปริมาตรของสารละลายป้อน  
 $Q_f$  = อัตราการไหลของสารละลายป้อนในฝั่งท่อ  
 $L$  = ความยาวของเส้นใยกลาง  
 $N$  = จำนวนเส้นใยกลางในโมดูล  
 $r_i$  = รัศมีภายในของเส้นใยกลาง  
 $e$  = ความพรุนของเส้นใยกลาง  
 $v_f$  = ความเร็วของสารละลายป้อน

#### ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Coefficient)

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการถ่ายโอนมวลกับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Rathore N.S. et al., 2001)

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

เมื่อ

- $r_{lm}$  = รัศมี **Log-mean** ของเส้นใยกลาง  
 $k_i$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของฝั่งสารละลายป้อน  
 $k_s$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของฝั่งสารละลายนำกลับ  
 $P_m$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว

ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, D) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (Permeability Coefficient,  $P_m$ ) และค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant,  $K_{ex}$ ) (Rathore N.S. et al., 2001)

$$P_m = Dk_m \quad (จ.6)$$

$$P_m = K_{ex} k_m [H^+] [TRPO] \quad (จ.7)$$

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m [H^+] [TRPO]} \quad (จ.8)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ค.1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด (Percent Extraction)

ข้อมูลจากภาคผนวก ก.1 สามารถคำนวณร้อยละการสกัดได้ดังนี้

พิจารณาข้อมูลของไอออนอาร์ซีนิก (III) ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร

โดยที่

ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกในสารละลายป้อนขาเข้าเท่ากับ	2002	ppm
ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกในสารละลายป้อนขาออกเท่ากับ	178	ppm

$$\text{ดังนั้น ร้อยละการสกัดมีค่าเท่ากับ } \frac{2002 - 178}{2002} \times 100 = 11.09$$

ค.2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ

ข้อมูลจากภาคผนวก ก.1 สามารถคำนวณร้อยละการสกัดได้ดังนี้

พิจารณาข้อมูลของไอออนอาร์ซีนิก (III) ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.2 ppm

โดยที่

ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกในสารละลายป้อนขาเข้าเท่ากับ	2002	ppm
ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกในสารละลายนำกลับขาเข้าเท่ากับ	0	ppm
ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกในสารละลายนำกลับขาออกเท่ากับ	218	ppm

$$\text{ดังนั้น ร้อยละการนำกลับมีค่าเท่ากับ } \frac{178 - 0}{2002} \times 100 = 10.9$$

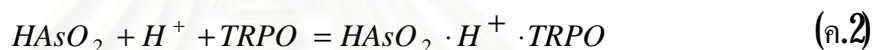
### ค.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุล ( $K_{ex}$ ) และสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution Coefficient, D)

#### 1. การหาค่าคงที่สมดุล

$$K_{ex} = \frac{[(HAsO_2)(H^+)(TRPO)]}{[HAsO_2][H^+][TRPO]} \quad (ค.1)$$

วิธีการหาค่าความเข้มข้นของสารแต่ละตัว

จากสมการการสกัดของไอออนอาร์ซีนิก (III) และข้อมูลที่ภาวะความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร ซึ่งมีข้อมูลดังนี้



สารละลายป้อนขาเข้า = 0.186 โมลต่อลิตร

สารละลายป้อนขาออก = 0.148 โมลต่อลิตร

ดังนั้น สารละลายป้อนที่หายไปทำปฏิกิริยา =  $0.186 - 0.148 = 0.038$  โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นสารตั้งต้นที่เวลาเริ่มต้น มีค่าดังนี้

$HAsO_2$  = 0.186 โมลต่อลิตร (สารละลายป้อนขาเข้า)

$H^+$  = 0.2 โมลต่อลิตร

TRPO = 0.759 โมลต่อลิตร (30% โดยปริมาตร)

ความเข้มข้นสารตั้งต้นที่เวลาสมดุล มีค่าดังนี้

$HAsO_2$  = 0.148 โมลต่อลิตร (สารละลายป้อนขาออก)

$H^+$  =  $0.2 - 0.038 = 0.162$  โมลต่อลิตร

TRPO =  $0.759 - 0.038 = 0.721$  โมลต่อลิตร

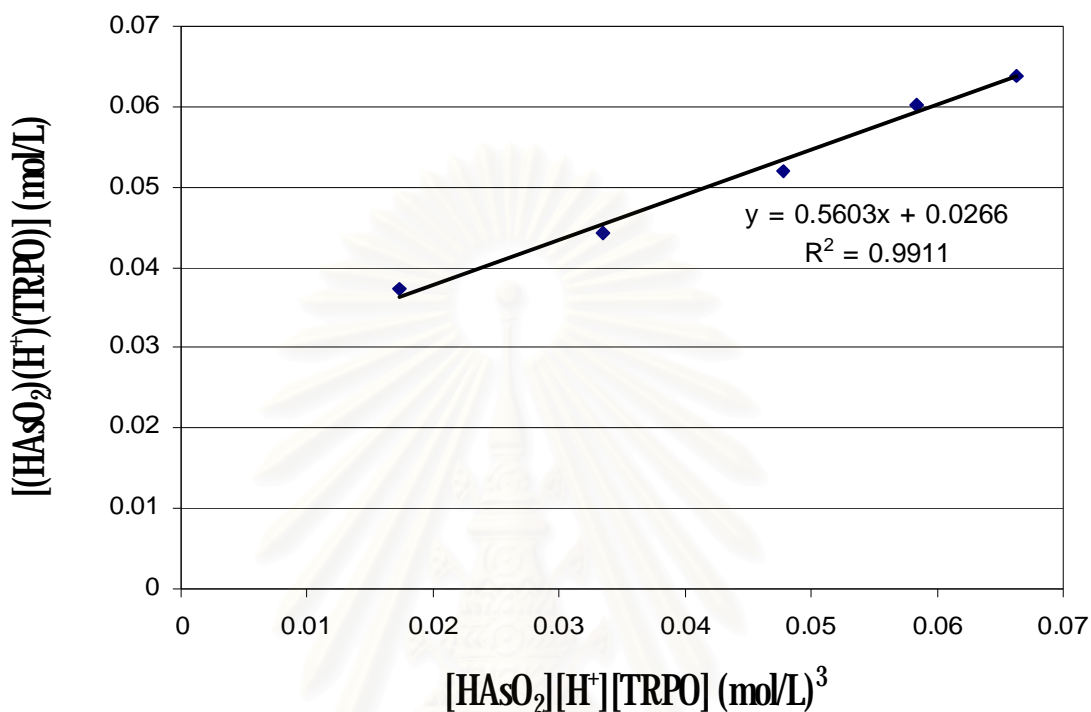
ดังนั้น  $[HAsO_2][H^+][TRPO]$  มีค่าเท่ากับ 0.0173 โมลต่อลิตร

∴ สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น คือ ส่วนของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาหรือความเข้มข้นที่หายไป



ดังนั้น  $[(HAsO_2)(H^+)(TRPO)]$  มีค่าเท่ากับ **0.038** โมลต่อลิตร

และรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เริ่มต้นปฏิกิริยากับสุดท้ายของปฏิกิริยาของไอออนอาร์ซีนิก (III) ที่ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 เท่ากับ 30% โดยปริมาตรและใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ

โดยที่เราสามารถหาค่าคงที่สมดุลได้จากความชันของกราฟ ซึ่งมีค่าเท่ากับ **0.5603** (ลิตรต่อโมล)<sup>2</sup>

## 2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

จากสมการสัมประสิทธิ์การกระจาย

$$D = \frac{[(HAsO_2)(H^+)(TRPO)]}{[HAsO_2]} = K_{ex}[H^+][TRPO] \quad (\text{ค.3})$$

เมื่อ

ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร  
 ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร  
 หรือ เท่ากับ 0.759 โมลต่อลิตร

ค่าคงที่สมดุลที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 0.2 โมลต่อลิตรของไอออนอาร์ซีนิก (III) เท่ากับ 0.5603 (ลิตรต่อโมล)<sup>2</sup>

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายมีค่าเท่ากับ  $(0.5603)(0.2)(0.759) = 0.085$

#### ค.4 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability Coefficient, P)

จากสมการ

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

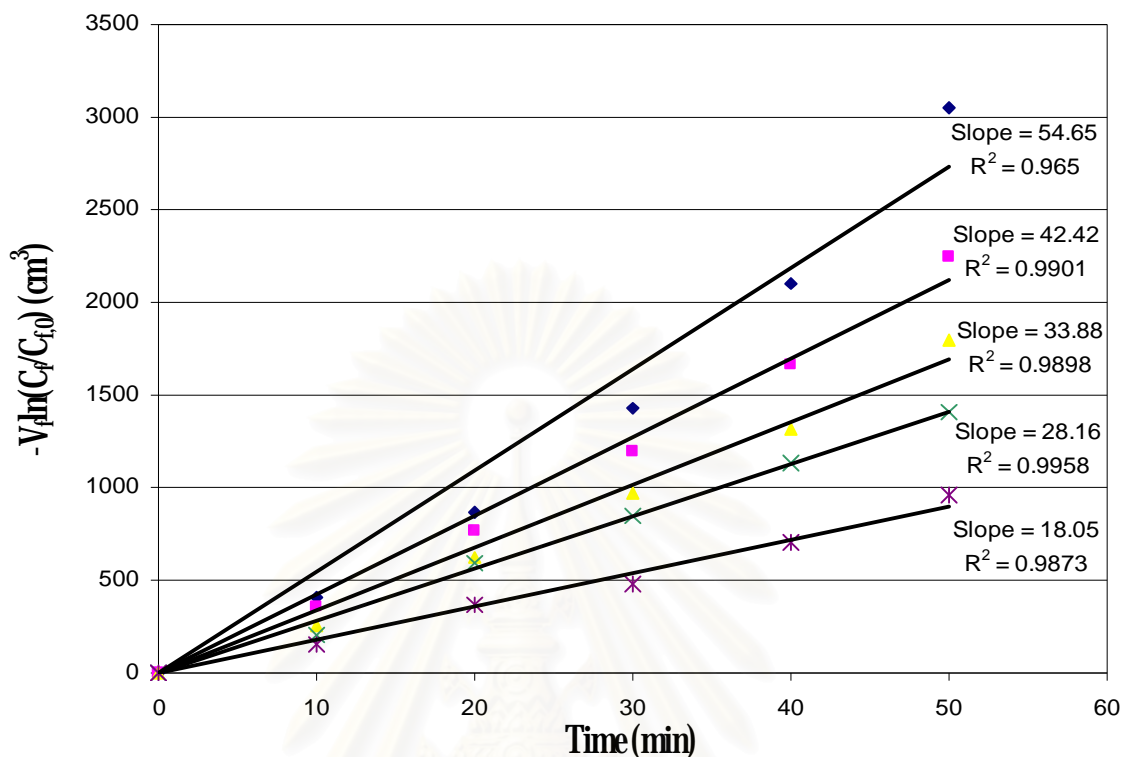
โดยที่

$$f = \frac{Q_f}{PLepNr_i} \quad (\text{ค.5})$$

เมื่อ

- $P$  = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน  
 $C_f$  = ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกที่เวลา  $t$   
 $C_{f,0}$  = ความเข้มข้นของไอออนอาร์ซีนิกที่เวลาเริ่มต้น  
 $A$  = พื้นที่การถ่ายโอนมวล  
 $V_f$  = ปริมาตรของสารละลายป้อน  
 $Q_f$  = อัตราการไหลของสารละลายป้อนในฝั่งท่อ  
 $L$  = ความยาวของเส้นใยกลวง  
 $N$  = จำนวนเส้นใยกลวงในโมดูล  
 $r_i$  = รัศมีภายในของเส้นใยกลวง  
 $e$  = ความพรุนของเส้นใยกลวง  
 $v_f$  = ความเร็วของสารละลายป้อน

และรูปที่ ค.2



รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $-V_f \ln(C_f/C_{f,0})$  ของไอออนอาร์ซีนิก (III) ในสารละลายป้อนกับ เวลาที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกรดซัลฟิวริก

การหาค่าการซึมผ่านกระทำได้โดยการสร้างกราฟระหว่าง  $V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,0}}\right)$  กับเวลา ( $t$ ) ก็จะได้ ความชันของกราฟคือ  $AP \frac{f}{f+1}$  ซึ่งทำให้หาค่า  $P$  หรือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

พิจารณาข้อมูลของไอออนอาร์ซีนิก (III) ที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร

โดยที่

$V_f$	=	5000	ลูกบาศก์เซนติเมตร
$C_f$	=	0.118	โมลต่อลิตร (16.80 ppm)
$C_{f,0}$	=	0.14	โมลต่อลิตร (19.90 ppm)
$A$	=	$1.4 \times 10^4$	ตารางเซนติเมตร
$t$	=	3000	วินาที
$Q_f$	=	1.67	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

$$\begin{aligned}
 L &= 20.3 \text{ เซนติเมตร} \\
 N &= 240 \text{ เส้น} \\
 r_i &= 120 \times 10^4 \text{ เซนติเมตร} \\
 e &= 0.3 \\
 \pi &= 3.1416
 \end{aligned}$$

จากรูปที่ ค.2 พิจารณาความชันที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ **0.2** โมลต่อลิตร โดยที่ความชันมีค่าเท่ากับ **18.05** ซึ่งก็คือเทอม  $AP \frac{f}{f+1}$  และแทนค่าของตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการที่ (ค.3) และ (ค.4)

ดังนั้น สามารถคำนวณหาค่าการซึมผ่านได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{Q_f}{PLepNr_i} = \frac{1.67 \text{ cm}^3 / \text{s}}{P(20.3 \text{ cm})(0.3)(3.1416)(240)(120 \times 10^4 \text{ cm})} \\
 f &= \frac{1.67 \text{ cm}^3 / \text{s}}{P(55.10 \text{ cm}^2)} = \frac{0.0303 \text{ cm} / \text{s}}{P} \quad (\text{ค.6})
 \end{aligned}$$

แทนค่า  $f$  ในสมการที่ (ค.5) ลงในเทอม  $AP \frac{f}{f+1} = 18.05$  จะได้

$$\begin{aligned}
 18.05 &= AP \frac{f}{f+1} \\
 &= (1.4 \times 10^4 \text{ cm}^2) P \left[ \frac{0.0303}{\left(\frac{0.0303}{P}\right) + 1} \right]
 \end{aligned}$$

$$P = 2.26 \times 10^{-5} \text{ cm} / \text{s}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนอาร์ซีนิก (III) มีค่าเท่ากับ  **$2.26 \times 10^5$**  เซนติเมตรต่อวินาที

ค.5 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ ( $k_i$ ) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

พิจารณาข้อมูลของไอออนอาร์ซีนิก (III)

จากสมการที่ (ค.7)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm} K_{ex} k_m [H^+][TRPO]} \quad (\text{ค.7})$$

โดยที่

$r_i$  = รัศมีภายในของเส้นใยกลาง

$r_{lm}$  = รัศมี **Log-mean** ของเส้นใยกลาง

$k_i$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของฝั่งสารละลายป้อน

$K_{ex}$  = ค่าคงที่สมดุล

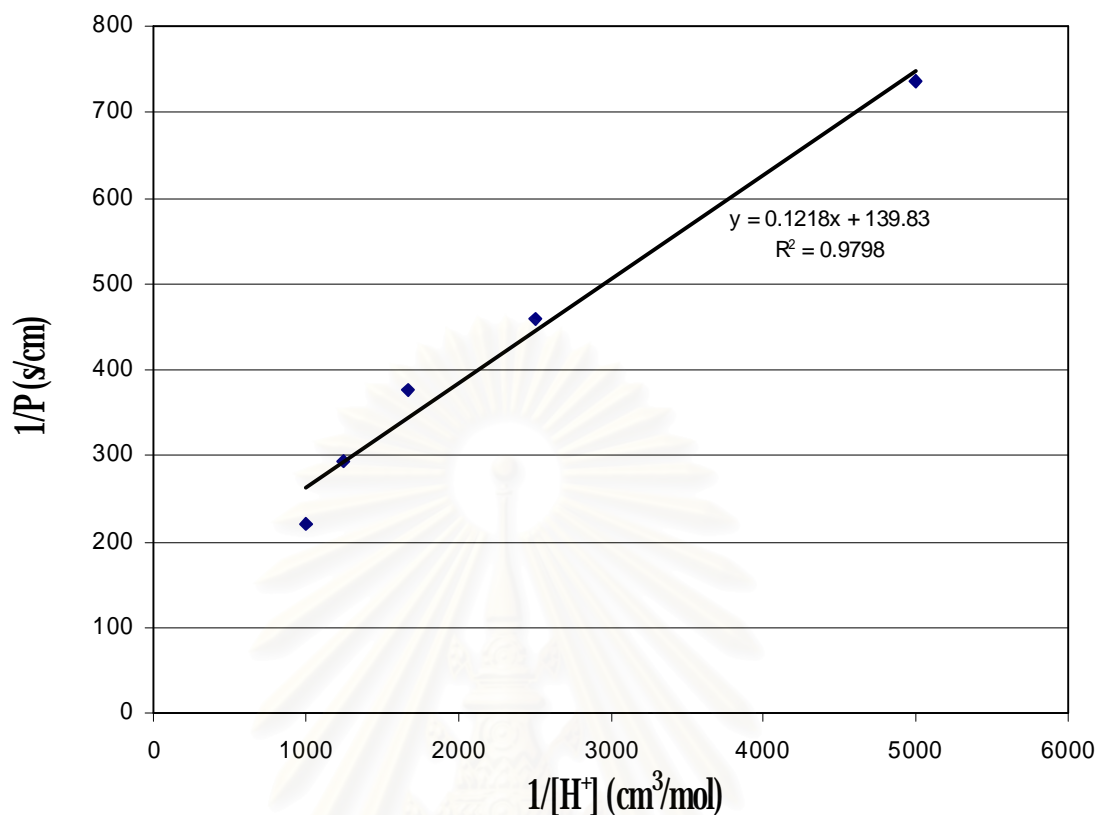
$[TRPO]$  = ความเข้มข้นของสารสกัด **Cyanex 923**

จากหัวข้อ ค.4

และรูปที่ ค.3 สามารถคำนวณหาค่า  $k_m$  ได้จากความชันของกราฟที่เป็นเส้นตรง ซึ่งก็คือ

เทอม  $\frac{r_i}{r_{lm} K_{ex} k_m [TRPO]}$  และคำนวณหา  $k_i$  ได้จากจุดตัดแกน  $\frac{1}{P}$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๓.3 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชัน  $1/P$  และ ฟังก์ชัน  $1/[H^+]$  ของไอออนอาร์ซีนิก (III)

### 1. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ )

จากเทอม  $\frac{r_i}{r_m K_{ex} k_m [TRPO]}$  ซึ่งคือความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ **0.1218**  $\frac{(s/cm)}{(cm^3/mol)}$

เมื่อ

$$\begin{aligned} r_i &= 120 \times 10^4 \text{ เซนติเมตร} \\ r_o &= 150 \times 10^4 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

$$r_m = \frac{r_o - r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} = \frac{(150 \times 10^4) - (120 \times 10^4)}{\ln\left(\frac{150 \times 10^4}{120 \times 10^4}\right)} = 143.53 \times 10^4 \text{ เซนติเมตร}$$

$K_{ex}$  ของไอออนอาร์ซีนิก (III) มีค่าเท่ากับ **0.5603** (ลิตรต่อโมล)<sup>2</sup>  
 $[TRPO]$  มีค่าเท่ากับ **0.759** โมลต่อลิตร (**30%** โดยปริมาตร)



เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงไปในเทอม  $\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m [TRPO]}$  นี้จะได้

$$\frac{r_i}{r_{lm}} \frac{1}{K_{ex} k_m [TRPO]} = 0.1218 \frac{(s/cm)}{(cm^3/mol)}$$

$$\frac{(120 \times 10^{-4} cm)}{(150 \times 10^{-4} cm)} \cdot \frac{1}{(0.5603 (L/mol)^2) k_m (0.759 mol/L)} = 0.1218 \frac{(s/cm)}{(cm^3/mol)}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของเยื่อแผ่นเหลว ( $k_m$ ) มีค่าเท่ากับ  $1.614 \times 10^2$  เซนติเมตรต่อวินาที

## 2. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ ( $k_i$ )

จากรูปที่ ค.3 สามารถหาค่า  $k_i$  จากจุดตัดแกน  $\frac{1}{P}$  โดยที่จุดตัดแกนมีค่าเท่ากับ **139.83** ซึ่งก็คือเทอม

$\frac{1}{k_i}$  ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ ( $k_i$ ) ของไอออนอาร์ซีนิก (III) มีค่าเท่ากับ

$$\frac{1}{k_i} = 139.83 \text{ วินาทีต่อเซนติเมตร}$$

$$k_i = 7.15 \times 10^3 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของสารละลายน้ำ ( $k_i$ ) มีค่าเท่ากับ  $7.15 \times 10^3$  เซนติเมตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นางสาวพรรณนก ประภาสวัตดี

เกิด วันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2525 ที่โรงพยาบาลศิริราช กรุงเทพมหานคร

## การศึกษา

พ.ศ. 2533-2538 ศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนมณีวัฒนา

พ.ศ. 2538-2543 ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนศึกษานารีวิทยา

พ.ศ. 2543-2547 วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2547-2549 ศึกษาระดับมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประสบการณ์

- พ.ศ. 2546
- นักศึกษาฝึกงาน ฝ่ายกระบวนการการผลิต โรงแยกก๊าซธรรมชาติ (ระยอง) การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย
  - เข้าค่ายในโครงการ “Let’s Care Safety Camp” บริษัท Merck (Thailand), Ltd

## ทุนสนับสนุนงานวิจัย

พ.ศ. 2548 กองทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ผลงานทางวิชาการ

1. Tatchanok Prapasawat, Prakom Ramakul, Ura Pancharoen and Anchaleepom W. Lothongkum Separation of As (III) and As (V) by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane on the Mass Transfer Theory. RGJ Seminar Series XLVIII Engineering Applications 19 มกราคม 2550 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. Tatchanok Prapasawat, Prakom Ramakul, Chairit Satayaprasert, Ura Pancharoen and Anchaleepom W. Lothongkum Separation of As (III) and As (V) by Hollow Fiber Supported Liquid Membrane and the Mass Transfer Theory. The Korean Journal of Chemical Engineer (inpress)