



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การแยกสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะ
ก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
(Removal of Arsenic and Mercury in Wastewater from
Natural Gas Wells via Hollow Fiber Supported Liquid
Membrane)

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรวัฒน์ ปัตทวิคองคา

ธันวาคม 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การแยกสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
(Removal of Arsenic and Mercury in Wastewater from Natural Gas Wells via Hollow Fiber Supported Liquid Membrane)

คณะผู้วิจัย

- ผศ.ดร. วีรวัฒน์ ปัตติวงศ์
- รศ.ดร. อรุณ ปานเจริญ

สังกัด

มหาวิทยาลัยศิลปากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากหลายๆ ฝ่ายที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการวิจัยนี้ โดยผู้วิจัยต้องขอขอบคุณเป็นลำดับดังนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ด้วยดีตลอดมา และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชนน ลิขิตพัฒน์ไพบูลย์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการประสานงานเพื่อใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ตรรกะวิวัฒนาการและสารปรอท

ขอขอบคุณ บริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์น้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นสารป้อนในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ บริษัท ระยองเพียวริฟายเออร์ จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันเคโรซีน สำหรับใช้เป็นตัวทำละลาย ในการเตรียมเยื่อแผ่นเหลว

และท้ายสุดนี้ต้องขอขอบคุณ สำนักงาน กองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาที่ได้ให้ความสนับสนุนทุนวิจัยนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรวัฒน์ ปัททวิคองคา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสกัดแยกสารหนูและสารปรอท ออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารละลายผสมระหว่างสารสกัดกับตัวทำละลายน้ำมันก๊าด ซึ่งทำการศึกษากับสารสกัด 6 ชนิดคือสารสกัดชนิด Aliquat336, สารสกัดชนิด Bromo-PADAP, สารสกัดชนิด TOA, สารสกัดชนิด Cyanex923, สารสกัดชนิด Cyanex921 และสารสกัดชนิด Cyanex471 ซึ่งสารละลายเยื่อแผ่นเหลวจะถูกนำไปเคลือบฝังในรูปพุนจุลภาคชนิดไม่ชอบน้ำของมอดูลเส้นใยกลวง ส่วนสารละลายสตริปเป็นสารละลาย 5 ชนิดที่ทำการศึกษานั้นคือ สารละลายโซโอยูเรีย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำปราศจากไอออน สารละลายกรดกำมะถัน และสารละลายกรดไนตริก โดยจะทำการศึกษากับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดดังนี้คือชนิดและความเข้มข้นของทั้งสารสกัดและสารละลายสตริป ความเข้มข้นของกรดกำมะถันที่ใช้ในสารป้อน การสกัดแบบเสริมฤทธิ์กันของสารสกัด 2 ชนิด และจำนวนรอบในการปฏิบัติการ

จากผลการศึกษาพบว่าสารสกัดทุกชนิดสามารถสกัดสารปรอทได้ดีมากกว่าร้อยละ 94 ซึ่งสารสกัดที่สกัดสารปรอทได้มากที่สุดคือ สารสกัดชนิด TOA ส่วนสารสกัดที่สกัดสารหนูได้มากที่สุดคือ Bromo-PADAP ซึ่งสามารถสกัดสารหนูได้มากที่สุดเท่ากับร้อยละ 66 โดยการสกัดแบบเสริมฤทธิ์กันนั้น จะมีเพียงคู่ของสารสกัดผสมระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat336 ที่ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตรกับสารสกัดชนิด Cyanex471 ที่ความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร เท่านั้นที่เสริมฤทธิ์กัน นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารละลายกรดกำมะถันในสารป้อนเริ่มต้น ทำให้การสกัดเกิดขึ้นได้ดี โดยมีความเข้มข้นของกรดกำมะถันที่เหมาะสมเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร และจำนวนรอบของการปฏิบัติการที่เหมาะสมเท่ากับ 3 เพราะทำให้สารหนูและสารปรอทที่เหลือมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

คำสำคัญ : การเสริมฤทธิ์, การสกัด, สารหนู, สารปรอท, เยื่อแผ่นเหลว, เส้นใยกลวง, น้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ

Abstract

This research was examined the extraction of arsenic and mercury ions simultaneously from natural-gas-wells produced water through hollow fiber supported liquid membrane was examined. Aliquat336, Bromo-PADAP, TOA, Cyanex923, Cyanex921 and Cyanex471 were used as carrier extractants. The carrier dissolve in kerosene as liquid membrane was supported by hollow fiber hydrophobic micro-porous. Thiourea, sodium hydroxide, Deionized water, sulphuric acid, and nitric acid solution were used as stripping solution. The transport system were studied as function of types and concentrations of carriers in kerosene solvent and stripping solution, concentration of sulphuric acid in feed solution, synergistic of mixed 2 extractants and the number of run.

The results demonstrated that all of carriers have the percentage of mercury more than 94%. TOA was the best carrier for mercury extraction and Bromo-PADAP was the best carrier for arsenic extraction with 66% removal. Only mixed between 0.40 mol/l of Aliquat336 with 0.06 mol/l of Cyanex471 was the synergistic extraction. Furthermore, when sulphuric acid solution was added in feed, The percentage of arsenic and mercury removal was increased. It is found that the concentration of sulphuric acid in feed at 0.1 mol/l and the number of run equal to 3 is the optimal condition that can reduce arsenic and mercury residue lower that standard.

Keywords: Synergistic, Extraction, Arsenic, Mercury, Liquid membrane, Hollow fiber, natural gas wells, wastewater

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
กิตติกรรมประกาศ	ฅ
สารบัญ	ญ
บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	7
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	34
4.1 ผลการตรวจวัดปริมาณสารหนูและสารปรอทที่มีอยู่ในสารป้อนเริ่มต้น	34
4.2 ผลการศึกษาชนิดของสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดไอออนสารหนูและสารปรอท	35
4.3 ผลการศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์	42
4.4 ผลของกรดกำมะถันในสารป้อนต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท	43
4.5 ผลของชนิดสารละลายนำกลับต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท	44
4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท	45
4.7 ผลของจำนวนรอบในการป้อนผ่านมอดูลเส้นใยกลวง	46
4.8 ค่าคงที่สมดุล	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
บรรณานุกรม	53
ภาคผนวก	57
ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด	57
ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ	57
ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุลของไอออนปรอท	58
ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย	60

บทที่ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลังจากเกิดภาวะวิกฤตการน้ำมัน ทำให้ราคาน้ำมันทุกประเภท ตลอดจนผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีมีราคาปรับตัวเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและยาวนาน ส่งผลให้มาตรการจูงจูงใจให้ประชาชนประหยัดพลังงาน และหันมาใช้พลังงานรูปแบบอื่นทดแทนจึงบังเกิดผลอย่างเป็นรูปธรรม รูปแบบของพลังงานทดแทนใหม่ๆ ได้เริ่มทยอยเข้าสู่ตลาดการซื้อขายเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาลอีกด้วย ตัวอย่างเช่น แก๊สโซฮอล์ น้ำมันไบโอดีเซล เป็นต้น (กรมพลังงานทดแทน, 2548) นอกจากนี้แหล่งพลังงานในรูปแบบของก๊าซธรรมชาติซึ่งประชาชนทั่วไปมักไม่ค่อยได้ให้ความสนใจ กลับถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญในขณะนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ หรือที่เราเรียกกันดีในชื่อย่อว่า “NGV” (Natural Gas for Vehicle) ซึ่งมีกลุ่มผู้ใช้นายยนต์เป็นจำนวนมากได้หันมาปรับปรุงระบบเครื่องยนต์ ให้สามารถใช้ได้ทั้งน้ำมันเบนซิน และก๊าซ NGV เพื่อประหยัดพลังงานและยังลดภาระค่าใช้จ่ายอีกด้วย โดยอัตราการใช้ก๊าซธรรมชาติที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ ส่งผลให้ผู้ประกอบการเร่งขุดเจาะแหล่งก๊าซธรรมชาติ ให้ได้ปริมาณที่มากเพียงพอ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติที่นับวันจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ

โดยในปัจจุบันการขุดเจาะน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติ จากแหล่งหลุมขุดเจาะในอ่าวไทย จะมี น้ำปะปนมากับน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติที่ขุดได้ ในปริมาณมากกว่า 200 บาเรลต่อวัน (กรมทรัพยากรธรณี, กองเชื้อเพลิงธรรมชาติ 2548) ซึ่งในน้ำที่ปะปนมากับน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาตินั้น จะมีสารหนูเจือปนอยู่ในรูปสารหนู As(III) และ As(v) ในปริมาณสูงถึง 3,500 ส่วนในพันล้านส่วน โดยในปริมาณดังกล่าวสารหนูจะมีความเป็นพิษสูง และยังเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งความเป็นพิษของสารหนูนั้นถ้าหากได้รับเข้าสู่ร่างกายปริมาณในช่วงตั้งแต่ 1.5 mg ถึง 500 mg ต่อน้ำหนักตัว 1 kg แล้วจะมีความเป็นพิษถึงขั้นทำให้เสียชีวิตโดยฉับพลัน โดยจะมีอาการพิษเฉียบพลันดังนี้คือ อาเจียน ท้องเสีย ปวดท้อง กล้ามเนื้อเกร็งอย่างรุนแรง มีอาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ และเสียชีวิตเนื่องจากการทำงานล้มเหลวของหัวใจในเวลาต่อมา ซึ่งถ้าหากได้รับสารหนูในปริมาณเกินระดับค่ามาตรฐาน (0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะเกิดอาการเป็นพิษสารหนูเรื้อรัง ได้แก่ ผิวหนังเปลี่ยนสีที่เป็นลักษณะเฉพาะโรค ผื่นที่ตุ่มตามฝ่ามือฝ่าเท้า มีปัญหาทางระบบเส้นโลหิต ระบบประสาท ระบบเลือด เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

นอกจากจะมีสารหนูปะปนมากับน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติที่ขุดได้แล้ว ยังมีสารปรอท

ที่ปะปนมากับน้ำที่ได้จากการขุดเจาะอีกด้วย โดยสารปรอทที่ปะปนมา มีปริมาณมากถึง 185 ส่วนในพันล้านส่วน ซึ่งมากเกินไปที่กฎหมายกำหนด (ไม่เกิน 5 ส่วนในพันล้านส่วน) โดยปรอทมีความเป็นพิษสูงมาก การเกิดพิษจากสารปรอทมีทั้งชนิดเฉียบพลันและเรื้อรัง พิษชนิดเฉียบพลันมักเกิดจากการได้รับสารปรอทเข้าสู่ร่างกายโดยตรง ซึ่งปริมาณปกติที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายและทำให้คนตายได้ โดยเฉลี่ยประมาณ 0.02 กรัม ปรอทเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะไปทำอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลาง ซึ่งได้แก่ สมอง และไขสันหลัง ทำให้เสียการควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของแขน ขา การพูด และยังทำให้ระบบประสาทรับความรู้สึกเสียไป เช่น การได้ยิน การมองเห็น ซึ่งอันตรายเหล่านี้ เมื่อเป็นแล้วไม่สามารถรักษาให้กลับคืนดังเดิมได้ อาการที่เป็นพิษมากเกิดจากการหายใจ ปอดอักเสบ มีอาการเจ็บหน้าอก มีไข้ แน่นหน้าอก หายใจไม่ออกและตายได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

นอกจากนี้ทั้งสารหนูและสารปรอทยังมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และระบบนิเวศน์วิทยาอีกด้วย โดยในปัจจุบันการขุดเจาะน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติของบริษัทขุดเจาะ อาทิเช่น บริษัท เชฟรอนประเทศไทยสำรวจและผลิต จำกัด หรือบริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) จะทำการบำบัดด้วยสารเคมีแล้วจึงฉีดอัดกลับคืนเข้าสู่โพรงชั้นหินที่เคยกักเก็บน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติในหลุมขุดเจาะที่เลิกใช้ไปแล้ว (Deep Well Re-injection) โดยวิธีนี้เป็นวิธีมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิตปิโตรเลียมที่ทั่วโลกยอมรับกัน แต่จะก่อให้เกิดปัญหาในด้านการกักเก็บน้ำเพื่อเตรียมฉีดอัดกลับคืน ซึ่งมีปริมาณสูงมากในแต่ละวัน นอกจากนี้การใช้ Injection pump ยังต้องใช้พลังงานอย่างมากในการฉีดอัดกลับคืนสู่หลุมขุดเจาะที่เลิกใช้แล้ว อีกทั้งยังต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายการควบคุมระบบความดันและการป้องกันสารหนูรั่วไหลออกนอกระบบ โดยจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และระบบนิเวศน์ได้ทะเลอีกด้วย

ดังนั้นบริษัทต่างๆ จึงพยายามแสวงหาเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งในกระบวนการสูบน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติจากหลุมขุดเจาะ ให้สามารถปล่อยทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยสูญเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการฉีดอัดน้ำทิ้งดังกล่าวลงสู่ใต้ชั้นหินซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง โดยได้มีผู้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการกรอง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการกรองคือ เยื่อแผ่นชนิด Ultrafiltration, Reverse Osmosis และอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่า เยื่อแผ่นชนิด Reverse Osmosis สามารถลดปริมาณของสารหนูในน้ำทิ้งได้สูงที่สุดและสามารถลดได้มากถึง 90—95 % แต่อย่างไรก็ตาม เยื่อแผ่นชนิด Reverse Osmosis ได้เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วซึ่งไม่คุ้มค่าและไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงขอเสนอเทคนิควิธีใหม่ในการกำจัดสารหนูออกจากน้ำทิ้งในกระบวนการขุดเจาะน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติ ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Supported Liquid Membrane) ซึ่งจาก

ผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลว ในการสกัดแยกและนำกลับไอออนโลหะออกจากสารป้อนได้ดี โดยมีค่าการเลือกสกัดสูง ใช้ปริมาณสารสกัดต่ำ ใช้พลังงานต่ำ อีกทั้งยังมีอัตราการถ่ายเทมวลสูงอีกด้วย นอกจากนี้ผลการวิจัยที่ผ่านมายังแสดงให้เห็นว่าระบบเยื่อแผ่นเหลวมีข้อได้เปรียบและยังมีศักยภาพสูงในการศึกษาการสกัดแยกสารหนุออกจากน้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติอีกด้วย

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การขุดเจาะก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันดิบจากแหล่งธรรมชาติใต้ทะเลนั้น จะมีน้ำถูกสูบน้ำขึ้นมากับก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันดิบด้วยทุกครั้ง ซึ่งพบว่าน้ำที่ติดมาดังกล่าวจะมีปริมาณสารหนุสูงมากถึง 3,000 ส่วนในพันล้านส่วน และบางแหล่งยังพบว่ามีการปนเปื้อนมากถึง 185 ส่วนในพันล้านส่วนอีกด้วย ซึ่งถือว่าปริมาณมากเกินไปกว่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษที่ได้กำหนดไว้ (กรมควบคุมมลพิษกำหนดค่ามาตรฐานของสารหนุต้องไม่เกิน 250 ส่วนในพันล้านส่วน และสำหรับสารปรอทต้องไม่เกิน 5 ส่วนในพันล้านส่วน) ดังนั้นจึงไม่สามารถปล่อยทิ้งยังแหล่งน้ำทั่วไป หรือทะเลได้ เนื่องจากปริมาณสารหนุและสารปรอทที่สูงมากเกินไปกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ นั่นจะเป็นตัวสร้างมลพิษให้แก่สิ่งมีชีวิต (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2545) อีกทั้งยังทำลายระบบนิเวศวิทยา ทำลายสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นบริษัทขุดเจาะน้ำมันดิบหรือก๊าซธรรมชาติจะใช้วิธีการฉีดอัดความดันสูง ฉีดน้ำทิ้งดังกล่าวกลับคืนสู่หลุมกักเก็บที่เลิกใช้แล้ว (Deep Well Re-Injection) ซึ่งพบว่าวิธีดังกล่าวถึงแม้จะเป็นวิธีที่ได้ผลและเป็นที่ยอมรับใช้กันทั่วโลก แต่ก็ยังสร้างปัญหาทางด้านการกักเก็บ เนื่องจากจะมีน้ำทิ้งปริมาณมากถูกสูบขึ้นมาพร้อมกับปริมาณก๊าซธรรมชาติ หรือน้ำมันดิบ และจะถูกกักเก็บเพื่อรอการฉีดอัดลงสู่หลุมขุดเจาะที่เลิกใช้แล้ว จึงมีปริมาณสูงมาก ในแต่ละรอบของการอัดฉีด อีกทั้งยังมีปัญหาทางด้านการควบคุมระบบความดันสูงอีกด้วย ซึ่งบริษัทขุดเจาะต่างๆ ได้มีการลงทุนวิจัยศึกษาเพื่อแสวงหาเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพและสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ แต่ยังไม่พบวิธีหรือเทคโนโลยีที่ดีกว่านี้ ต่อมาในปี พ.ศ. 2543 ได้มีการนำระบบการกรองเข้ามาใช้ในการกำจัดมลพิษออกจากน้ำทิ้งจากหลุมก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันดิบ (กิตติพงษ์ เชื้อวัฒน์ชัย, 2000) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นชนิดอัลตราฟิวเตรชั่น และ รีเวสออสโมซิส นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ซึ่งใช้ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในน้ำก่อนส่งเข้าหน่วยบำบัด ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเยื่อแผ่นชนิดอัลตราฟิวเตรชั่น สามารถลดปริมาณน้ำมันและสารปรอทในน้ำทิ้งได้มากกว่า 98% ส่วนเยื่อแผ่นชนิดรีเวสออสโมซิส สามารถลดปริมาณสารหนุในน้ำทิ้งได้มากถึง 90—95% อย่างไรก็ตาม น้ำทิ้งที่ผ่านจากการบำบัดแล้วยังมีคุณภาพไม่ดีพอ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษที่ได้กำหนดไว้ อีกทั้งอัตราการใช้งานของเยื่อแผ่นชนิดอัลตราฟิวเตรชั่น จะลดต่ำลงเนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านการสะสมตัวของปริมาณอนุภาค ที่แขวนลอยและไปอุดตันแผ่นไส้กรอง ส่วนเยื่อแผ่นชนิดรีเวสออสโมซิส จะมีการเสื่อมสภาพจาก

การสัมผัสกับอนุภาคน้ำมันในน้ำ นอกจากนี้จากผลการทดลองยังพบว่าเยื่อแผ่นชนิดอัลตราฟิวเทรชั่น สามารถให้ค่า Permeability มากกว่า 98% ของค่าตั้งต้น และเยื่อแผ่นชนิดรีเวสออสโมซิส ให้ค่า Permeability ประมาณ 50%

ซึ่งงานวิจัยในลักษณะเพื่อใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม ไม่ค่อยได้นำมาเปิดเผยเท่าที่ควร ดังนั้นผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จึงไม่กว้างขวางเท่าใดนัก โดยจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระบบเยื่อแผ่นเหลว เป็นเทคโนโลยีการแยกมวลสารชนิดหนึ่ง ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการกรอง เพียงแค่กลไกการถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคที่แตกต่างกันเพียงเท่านั้น (ประกร รามกุล., 2544) โดยการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวได้รับการพัฒนามาจากการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย แต่แตกต่างกันเพียงแค่การเกิดกลไกการสกัดกับการนำกลับนั้น ระบบเยื่อแผ่นเหลวจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ส่วนกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายจะเกิดการสกัดเป็นขั้นตอนแรกก่อน จากนั้นจึงทำการแยกเอาสารที่สกัดได้นำมาสตรีปออกจากสารสกัดเป็นขั้นตอนต่อมา (Mark C. Porter, 1990) ซึ่งจากผลการศึกษาที่ผ่านมาไม่นานมานี้ Maciej Wisniewski (1997) ได้ทำการศึกษาการสกัดแยก As(III) และ As(v) จากสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยการเปลี่ยนค่าความเข้มข้น (50—200 g/l H_2SO_4) ด้วยตัวทำละลาย Cyanex 923 ซึ่งจากผลการศึกษาดังกล่าวทำให้พบว่า สารสกัดที่เหมาะสมต่อการสกัดสารหนูออกจากสารละลายจะเป็นสารสกัดประเภท Cyanex โดยสารละลายนำกลับที่เหมาะสมควรมีสภาพเป็นกรดอีกด้วย ซึ่งจากผลการศึกษาวิจัยดังกล่าว ได้รับการยืนยัน โดย Iberhan, และ Wisniewski (2001) ได้ทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบการใช้สารสกัดประเภท Cyanex 923 กับ Cyanex 301 พร้อมทั้งได้ศึกษาผลจากการผสมสารสกัดทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน จากผลการศึกษาที่ได้พบว่าสกัด Cyanex แต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการสกัดสารหนูได้มีความแตกต่างกันไม่มากนัก แม้จะผสมกัน ซึ่งสารสกัด Cyanex ที่มีประสิทธิภาพในการสกัดแยก As(v) จากสารละลายกรดซัลฟิวริกได้ดี จะเป็นสารสกัด Cyanex 923 ส่วนสารสกัด Cyanex 301 และสารผสมระหว่างสารทั้งสองจะมีประสิทธิภาพในการสกัดแยก As(III) ได้ดี นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ ค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสารสกัด Cyanex 923 สามารถนำกลับ As(III) และ As(v) ได้มากขึ้นตอนที่สุด ส่วนการนำกลับองค์ประกอบของสารหนูด้วยน้ำออกจาก Cyanex 301 และสารผสมระหว่างสารทั้งสองไม่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้สารสกัด Cyanex ยังได้ถูกนำมาศึกษาการสกัดโลหะมีตระกูลอีกด้วย โดย Alguacil และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาการซึมผ่านของทองผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับแบบแผ่นบาง โดยใช้สารสกัดที่เป็น Cyanex 923 ที่ละลายอยู่ในนอร์มอลโอดีเคน แล้วทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อที่จะใช้อธิบายจลศาสตร์ของการถ่ายเทมวลของทองที่ปรากฏ ซึ่งประกอบด้วยกลไกการถ่ายเทมวลในขั้นตอนต่างๆ เป็นลำดับที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งจากผลการศึกษาที่ได้พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ดังกล่าวสามารถอธิบายปรากฏการณ์การซึมผ่านของทอง และ

แพตตีนั้นได้เป็นอย่างดี ในส่วนของสารปรอท Nambiar และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาการแยกและการตรวจวัดไอออนสารปรอท จากตัวอย่างสารละลายซาลิไซเลตที่ได้จากสิ่งแวดล้อม โดยใช้สารไตรฟีนิลฟอสฟิซัลไฟด์ (TPPS) เป็นสารสกัด ซึ่งไอออนของสารปรอทถูกสกัดได้ปริมาณมากถึงร้อยละ 100 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.4 ถึง 5.9 และปริมาณโซเดียมซาลิไซเลตที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5 โมลต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของสารสกัด TPPS เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร โดยงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสกัดแยกสารปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวโดยเฉพาะนั้นมีงานวิจัยที่ได้รับการศึกษาโดย Uedee และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการสกัดและการนำกลับไอออนปรอทชนิดโคเวเลนต์ 2 ในสารละลายคลอไรด์ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัดไตรนอร์มอลออกทิลลามีน (TOA) ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดเป็นเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งทำการศึกษาก่อนการสกัดแยกไอออนของกรดเกลือที่ใช้ในสารป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด TOA และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารนำกลับ จากผลการศึกษาพบว่าสามารถสกัดแยกไอออนสารปรอทได้มากถึง ร้อยละ 100 เมื่อใช้กรดเกลือที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัด TOA ที่ร้อยละ 3 โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารนำกลับเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาที่ได้สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทมวลในฝั่งสารละลายและฝั่งของสารอินทรีย์ได้เท่ากับ 0.42 และ 1.67 เซนติเมตรต่อวินาทีตามลำดับ

จากผลการศึกษาผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสกัดแยกสารหนูและสารปรอท ออกจากน้ำทิ้งจากหลุมก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันดิบ ด้วยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงนั้นเป็นงานที่ยังไม่มีใครได้ศึกษามาก่อน ซึ่งเป็นประเด็นที่น่าสนใจศึกษา เพราะเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ โดยนำข้อมูลการสกัดด้วยตัวทำละลายตั้งในงานวิจัยที่ผ่านมา นำมาต่อยอดศึกษาโดยปรับเปลี่ยนเทคนิคที่ใช้ในการสกัด ซึ่งอาจเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่งานวิจัย อีกทั้งยังเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ทางด้านเยื่อแผ่นเหลวได้อีกด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบเยื่อแผ่นเหลวในการสกัดแยกสารหนูออกจากน้ำทิ้งจากหลุมชุดเจาะก๊าซธรรมชาติจากบริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)
2. สามารถทราบปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสารหนูออกจากน้ำทิ้งจากหลุมชุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
3. ก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในการศึกษากระบวนการกำจัดโลหะหนักที่มีความเป็นพิษชนิดอื่นๆ ด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
4. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำจัดสารหนูและสารปรอทในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1 ศึกษาการใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ในการสกัดแยกสารหนูและสารปรอท โดยใช้สารสกัด Cyanex 923 ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด
- 2 ศึกษาปัจจัยค่าความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923, ค่าความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในสารป้อน ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายstripperที่มีอิทธิพลต่อการสกัดแยกสารหนูด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงออกจากน้ำทิ้ง จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 มีองค์ความรู้ใหม่ในการสกัดแยกสารหนูและสารปรอทในน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
- 2 ทราบข้อมูลภาวะที่เหมาะสมในการสกัดแยกสารหนูและสารปรอท ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติจาก บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)
- 3 ทราบข้อมูลพื้นฐานในการกำจัดสารหนูและสารปรอท ออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ

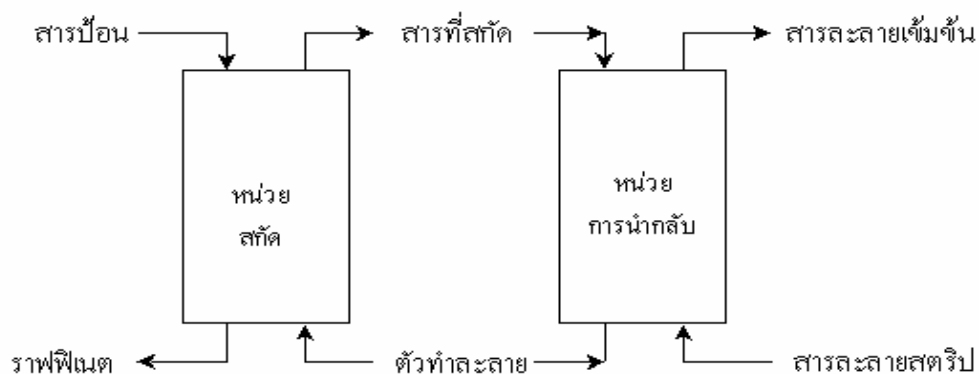
บทที่ 2

ทฤษฎี

เทคนิคการสกัดแยกโลหะได้รับการพัฒนาอย่างเป็นลำดับต่อเนื่องโดยแต่ละเทคนิคต่างก็มีทั้งข้อดีและข้อเสียอยู่ในตัว โดยที่เทคนิคการสกัดสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ เทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย และเทคนิคการสกัดโดยเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งในแต่ละเทคนิคการสกัดมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) (Sulaiman:2000)

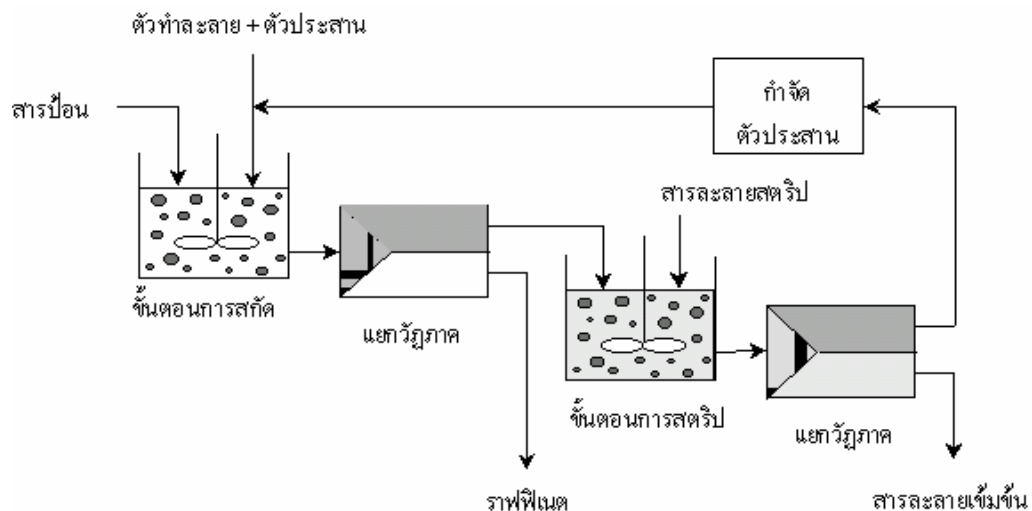
การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นเทคนิคการสกัดพื้นฐานที่อาศัยความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้แตกต่างกันหรือเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวทำละลายกับสารสกัดในอีกวัฏภาคหนึ่ง โดยกระบวนการจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการปฏิบัติการอย่างน้อย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการสกัดและขั้นตอนการนำกลับ (Tavlarides, et. al.1987) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการสกัดและการนำกลับ ในการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย (Sulaiman: 2000)

จากรูปที่ 2.1 เป็นลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย แสดงขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการขั้นตอนการสกัด เริ่มด้วยวัฏภาคของสารป้อน(Feed solution) ซึ่งมีไอออนของตัวถูกละลาย (Solute) ที่ต้องการสกัด (เช่นไอออนของโลหะ) ถูกป้อนเข้าสู่หน่วยสกัด วัฏภาคของสารป้อนจะสัมผัสกับ วัฏภาคของตัวทำละลาย (Solvent) ซึ่งสองวัฏภาคนี้จะไม่ละลายกันทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายเนื่องจากความสามารถในการละลายในตัวทำละลายแตกต่างกันหรือเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดที่อยู่ในตัวทำละลายที่มาสัมผัส การสกัดจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสอง ซึ่งถ้าผิวสัมผัสมีมากประสิทธิภาพการสกัดจะสูงขึ้น จนกระทั่งเมื่อตัวทำละลายอิ่มตัวไปด้วยตัวถูกละลายแล้วก็จะถูกแยกออกมาจากสารป้อน ซึ่งขณะนี้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาคสารป้อนจะลดต่ำลง ขณะที่ตัวทำละลายที่

อิมตัวไปด้วยตัวถูกละลาย (Extract) จะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยการนำกลับ ซึ่งจะเกิดการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายออกจาก วัฏภาคของตัวทำละลายโดยการผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสไปยังสารละลายนำกลับ (Stripping solution) โดยตัวทำละลายที่ผ่านการนำกลับซึ่งถูกแยกสารที่ต้องการออกไปแล้วจะถูป้อนไหลเวียนกลับ



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชัน (Sulaiman: 2000)

จากรูปที่ 2.2 เป็นกระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายแบบอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน (water in oil, W/O) ซึ่งมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารละลายน้ำ (Aqueous Phase) กระบวนการเริ่มต้นโดยสารป้อน ซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลายเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดผสมกับตัวทำละลายซึ่งเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ (Organic Phase) ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันในถังปฏิกรณ์การสกัด ภายในถังปฏิกรณ์วัฏภาคทั้งสองจะถูกตีคววนจนอยู่ในรูปอิมัลชันซึ่งเป็นหยดของสารป้อนที่มีขนาดเล็กมีวัฏภาคของสารอินทรีย์อยู่ล้อมรอบพื้นที่ผิวสัมผัสของวัฏภาคทั้งสองที่สัมผัสกันรอบเม็ดอิมัลชันจะเป็นพื้นที่ในการถ่ายเทมวล ตัวถูกละลายในสารป้อนจะเกิดการถ่ายเทมวลผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคทั้งสองจนกระทั่งวัฏภาคของสารอินทรีย์อิมตัวไปด้วยตัวถูกละลาย จากนั้นวัฏภาคทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันโดยที่วัฏภาคของสารอินทรีย์ที่อิมตัวไปด้วยตัวถูกละลายนั้นจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการนำกลับ โดยนำไปผสมกับสารละลายนำกลับซึ่งเป็นวัฏภาคของสารละลายที่ไม่ละลายเข้าด้วยกันกับตัวทำละลายในถังปฏิกรณ์(Reactor) การนำกลับภายในถังปฏิกรณ์วัฏภาคทั้งสองจะถูกตีคววนให้เกิดอิมัลชันและเกิดการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคสารอินทรีย์ ไปสู่วัฏภาคของสารละลายนำกลับจนกระทั่งวัฏภาคของสารละลายนำกลับอิมตัวไปด้วยตัวถูกละลาย จากนั้นวัฏภาคของสารละลายนำกลับซึ่งเต็มไปด้วยตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากวัฏภาคของสารอินทรีย์ซึ่งมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายเจือจางลง โดยที่วัฏภาคของสารอินทรีย์จะถูกปรับสภาพด้วยการกำจัดตัวประสานเพื่อนำกลับเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดอีกครั้ง

จากกระบวนการข้างต้นจะเห็นได้ว่า พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคมีความสำคัญต่อการ

ถ่ายเทมวลอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารลดแรงตึงผิว เพื่อรักษาเสถียรภาพของเม็ดอิมัลชันเอาไว้จนกระทั่งเกิดการถ่ายเทมวลผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคจนอิมัลชันเกิดกระบวนการวัฏภาคของสารอินทรีย์จะเป็นวัฏภาคต่อเนื่องมีวัฏภาคภายในเป็นสารละลาย ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Surfactant) ในทางกลับกันหากกระบวนการมีวัฏภาคของสารละลายเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และมีวัฏภาคภายในเป็นวัฏภาคของสารอินทรีย์ ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic Surfactant) แม้ว่าสารลดแรงตึงผิวจะมีความสำคัญในการรักษาเสถียรภาพอิมัลชันที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค รอบหดยอิมัลชันมากขึ้น แต่สารลดแรงตึงผิวซึ่งช่วยผสานผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคให้อิมัลชันมีเสถียรภาพอยู่ได้นั้น จะก่อตัวกลายเป็นชั้นฟิล์มขวางกั้นการถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคทั้งในขั้นตอนการแยกวัฏภาคทั้งสองออกจากกัน และการบำบัดสารอินทรีย์ที่ใช้งานแล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ก็ยังมีความยุ่งยากในการปฏิบัติ โดยทั่วไปมีวิธีการบำบัด อยู่ 2 วิธีคือวิธีทางกายภาพ และวิธีทางเคมี วิธีทางเคมีจะทำได้โดยเติมสารลดการประสาน (Demulsifier) ซึ่งจะช่วยให้ตัวประสานแยกออกจากสารอินทรีย์ได้ดี แต่สารอินทรีย์ที่ได้นั้นจะมีคุณสมบัติที่ด้อยคุณภาพลงทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนวิธีทางกายภาพเป็นการบำบัดด้วยกระแสไฟฟ้าความต่างศักย์สูง ซึ่งจะให้ผลในการบำบัดที่ดีมาก สามารถแยกวัฏภาคและทำลายโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวได้ดี อีกทั้งสารเคมีในกระบวนการก็มีคุณภาพด้อยลงเพียง เล็กน้อย แต่อุปกรณ์ที่ใช้มีความยุ่งยากซับซ้อน มีอันตรายสูงและยังมีราคาสูงอีกด้วย

แม้ว่า กระบวนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายจะเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการปฏิบัติและมีกำลังการผลิตสูงซึ่งเหมาะสมในการพัฒนาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม แต่ก็มีข้อด้อยอยู่ด้วย เช่นกระบวนการมีหลายขั้นตอนประสิทธิภาพในการสกัดต่ำเนื่องจากจะถูกจำกัด ไว้ด้วยสมดุลระหว่างวัฏภาคที่ผิวสัมผัสนอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติ ในการเลือกสกัดต่ำ อีกทั้งยังใช้สารเคมีและพลังงานในปริมาณสูงอีกด้วย จากการที่กลไกการถ่ายเทมวลของเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายถูกจำกัดไว้ด้วยสมดุลระหว่างวัฏภาคที่สัมผัสทำให้เกิดการพัฒนาขยายขีดจำกัดในการถ่ายเทมวล เพื่อเกิดกลไกการสกัดอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา จึงเป็นจุดเริ่มของการรวมขั้นตอนการสกัดและการนำกลับจากเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลายไปสู่เทคนิคการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว

2.2 การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลว (Liquid Membrane)

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane process) นั้นประกอบด้วยส่วนของวัฏภาคของสารต่างๆ 3 ส่วน ได้แก่

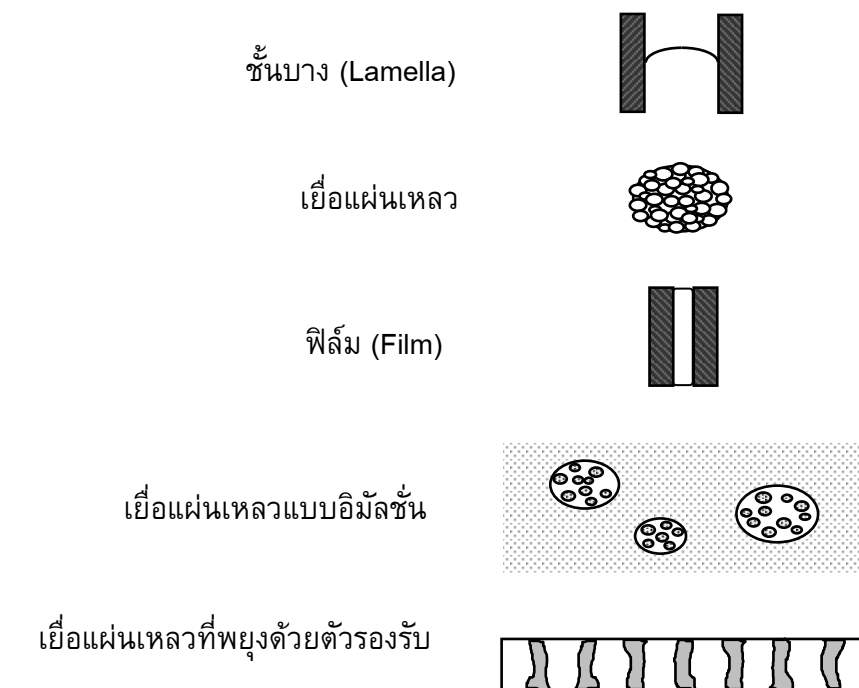
1) ส่วนของสารป้อน (Feed phase) ซึ่งเป็นส่วนที่มีองค์ประกอบที่ต้องการแยกละลายอยู่ซึ่ง ส่วนนี้จะอยู่ใน วัฏภาคสารละลาย

2) ส่วนเยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane phase) ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบไปด้วย สาร

สกัด (Extractant) ละลายในตัวทำละลายส่วนนี้จะอยู่ในรูปของสารละลายของน้ำมัน

3) ส่วนของสารละลายน้ำกลับ (Stripping phase) ซึ่งจะทำหน้าที่รับองค์ประกอบที่ต้องการแยก ซึ่งถ่ายเทผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาจากสารป้อนส่วนนี้จะอยู่ในวัฏภาคสารละลาย เช่นเดียวกับส่วนของสารป้อน

ส่วนที่เป็นเยื่อแผ่นเหลวจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกับส่วนของสารป้อนและสารละลายน้ำกลับ ดังนั้นเมื่อนำเยื่อแผ่นเหลวมากระหว่างสารป้อนและสารละลายน้ำกลับ องค์ประกอบที่ต้องการแยกจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดในเยื่อแผ่นเหลวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ละลายอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายน้ำกลับที่ฝั่งตรงข้าม องค์ประกอบที่ต้องการแยกซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน จะทำปฏิกิริยากับสารละลายน้ำกลับและแยกตัวออกมา ละลายอยู่ในสารละลายน้ำกลับ จึงสามารถถ่ายเทองค์ประกอบที่ต้องการจากสารป้อนผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายน้ำกลับได้



รูปที่ 2.3 รูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่าง ๆ (Sulaiman: 2000)

รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบของเยื่อแผ่นเหลวที่น่าจะเกิดขึ้นได้ โดยเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันและเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่ากรณีอื่น ๆ

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ (Sulaiman: 2000)

เยื่อแผ่นเหลวชนิดอิมัลชัน		เยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวพอง		เยื่อแผ่นเหลวไฟฟ้าสถิตย์	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
มีสัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง	ใช้สารอินทรีย์ปริมาณสูง	มีค่าการคัดเลือกสูง	สัดส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรต่ำ	มีเสถียรภาพสูง	กำลังการผลิตต่ำ
มีกำลังการผลิตสูง	ใช้พลังงานสูง	ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	เยื่อแผ่นเหลวมีประสิทธิภาพต่ำ	ประสิทธิภาพสูง	สารอินทรีย์ต้องมีความเป็นขี้ดต่ำ
กระบวนการไม่ยุ่งยากซับซ้อน	ปัญหาการปนเปื้อน	ใช้สารอินทรีย์ปริมาณต่ำ	การสูญเสียเยื่อแผ่นเหลว	การปนเปื้อนต่ำ	สารอินทรีย์ต้องเป็นวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น
-	ปัญหาในการใช้สารลดแรงตึงผิวและการบำบัด	ใช้พลังงานต่ำ	-	ไม่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิว	ใช้สารอินทรีย์ปริมาณมาก
-	-	ขยายขนาดง่าย	-	-	-
-	-	อัตราการถ่ายเทมวลสูง	-	-	-

จากตาราง เป็นการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเยื่อแผ่นเหลวชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่ารูปแบบของตัวรองรับชนิดเส้นใยกลวงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีข้อดีอยู่มากมายดังที่งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการเยื่อแผ่นเหลวที่มีตัวรองรับในการสกัดแยกไอออนของธาตุหายากออกจากกัน

2.3 ชนิดของสารสกัด

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

ก. สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อย คือ

สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractant) และสารสกัดชนิดคีเลท (Chelate extractant) สารสกัดประเภทแรกจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-SO_3H$ และ $-COOH, =P(O)OH$ เป็นต้น ส่วนประเภทหลังสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับ

ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ ดังสมการ



เครื่องหมายขีดด้านบนบ่งชี้ว่าสารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารอินทรีย์ สมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นกับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ (Tavlarides et al.:1987)

สารสกัดประเภทกรด ที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์

ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Derivatives of phosphorous acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkylphosphoric acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (Di-2-ethylhexyl phosphoric acids, D2EHPA) สารสกัดประเภทนี้เลหได้แก่สารสกัดที่ประกอบไปด้วย ดอนเนอร์กรุป (Donor groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate complexes) กับไอออนโลหะได้

สารสกัดประเภทคีเลต ผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์มีอยู่ 2 ประเภทได้แก่

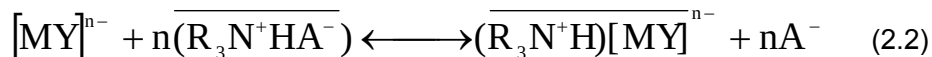
(ก) กลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA

(ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ที่ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการชะละลาย (Acidic leach liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline)

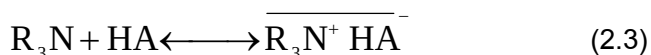
ข. สารสกัดชนิดต่าง(Basic Extractant)

เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาเป็นเกลือ ในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด ที่ใช้กันมากจะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary, RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary, R_2NH) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary, R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium salts, R_4N^+) โดยประสิทธิภาพของการสกัด

ไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Anionic species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน

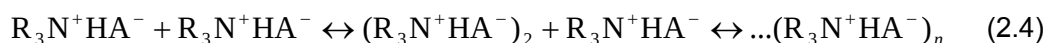


เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



โดยเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีขั้ว $R_3N^+HA^-$ ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ $[MY]^{n-}$ จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุดังสมการ 2.2

ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้สารสกัดเอมีนคือการรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นกับสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียมที่มีประจุบวกและประจุลบ (Ammonium cation และ ammonium anion) การรวมตัวของเกลือเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการที่ (2.4)



การเกิดวัฏภาคที่สามจะทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifier) เช่น long-chain aliphatic alcohol

ค. สารสกัดชนิดเป็นกลาง (Neutral Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ ไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวก หรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถของไอออนโลหะในการที่จะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำ เช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมกันของอะตอมกลางของสาร ประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตรอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรดเมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดโพลีเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมกันกับ

สารสกัดชนิดเป็นกลางดังสมการ 2.5 และสมการ 2.6



2.4 กลไกการถ่ายเทมวล (Sulaiman: 2000)

การถ่ายเทมวลในกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นการถ่ายเทแบบควบคู่ (Couple transport) คือ กระบวนการถ่ายเทมวลของไอออนสองชนิดจะเกิดขึ้นพร้อมกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งจะถ่ายเทไอออนโลหะที่ต้องการแยกให้เดินทางจากด้านสารละลาย ป้อนไปยังด้านสารละลายนำกลับ แต่แรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลคือผลต่างของความเข้มข้นของไอออนอีกชนิดหนึ่ง ไม่ใช่ไอออนของโลหะที่ต้องการจะแยก ดังนั้นจึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการได้ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทางด้านสารละลายนำกลับจะสูงกว่าด้านสารป้อนก็ตาม เยื่อแผ่นเหลวที่คั่นอยู่ระหว่างสารป้อนและสารละลายนำกลับนั้นจะผสมสารสกัดซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ ไอออนที่ต้องการสกัดจะเกิดสารเชิงซ้อนกับสารสกัดที่ผิวสัมผัสด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นไอออนของสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นกลาง สารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ข้ามเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสด้านตรงข้ามซึ่งมีสารละลายนำกลับ และจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายนำกลับกับเยื่อแผ่นเหลว ไอออนของโลหะจะหลุดไปอยู่ที่ด้านสารละลายนำกลับในขณะที่สารประกอบเชิงซ้อน จะกลายเป็นสารสกัดดั้งเดิมแล้วแพร่กลับผ่านเยื่อแผ่นเหลวมาอยู่ที่ด้านเดิม(ด้านสารป้อน) เพื่อมารับไอออนโลหะอีกครั้ง ดังนั้นสารสกัดจะทำหน้าที่คล้ายกับตัวขนย้ายไอออนผ่านเยื่อแผ่นเหลว

การถ่ายเทมวล แบบควบคู่แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

การถ่ายเทแบบสวนทาง (Counter-Transport)

การถ่ายเทที่ไอออนทั้งสองเคลื่อนที่สวนทางกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว การเกิดปฏิกิริยาไอออนโลหะ M^{n+} ที่อยู่ในสารป้อน ทำปฏิกิริยากับสารสกัด RH ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน MR_n และไฮโดรเนียมไอออน (H^+) ดังสมการ 2.7 ซึ่งไฮโดรเนียมไอออนนี้ที่อยู่ในสารป้อน และสารประกอบเชิงซ้อน MR_n อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว



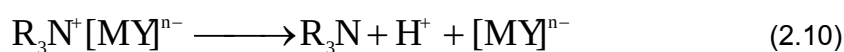
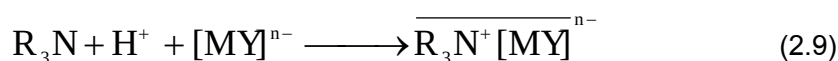
สารประกอบเชิงซ้อน (MR_n) ที่เกิดขึ้น จะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจาก ผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสนี้ (MR_n) จะทำปฏิกิริยาแบบย้อนกลับกับไฮโดรเนียม

ไอออนที่อยู่ในสารละลายนำกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับดังสมการ 2.8 และได้สารสกัด (RH) กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลว และแพร่กลับไปยังด้านสารป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารป้อน วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป ดังรูปที่ 2.4

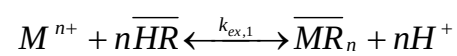
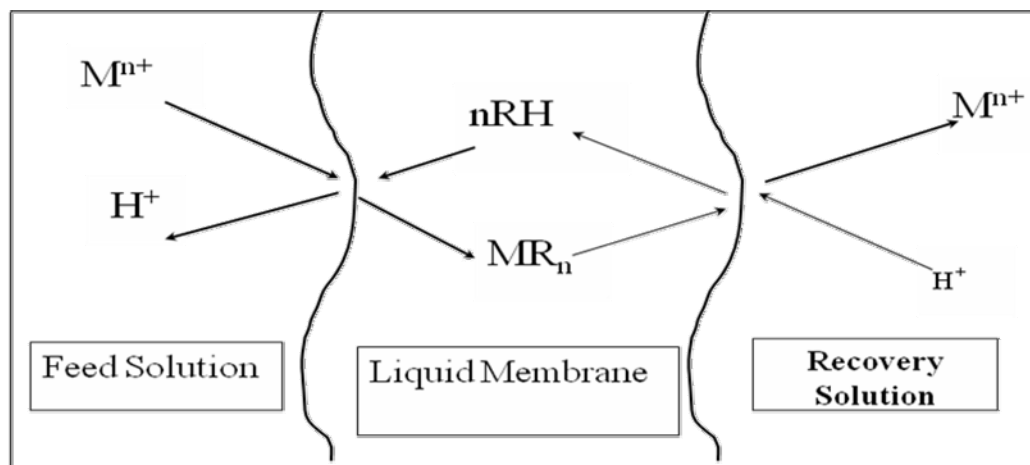


การถ่ายเทแบบไปทางเดียวกัน (Co-Transport)

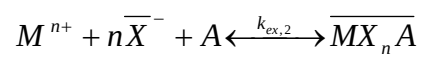
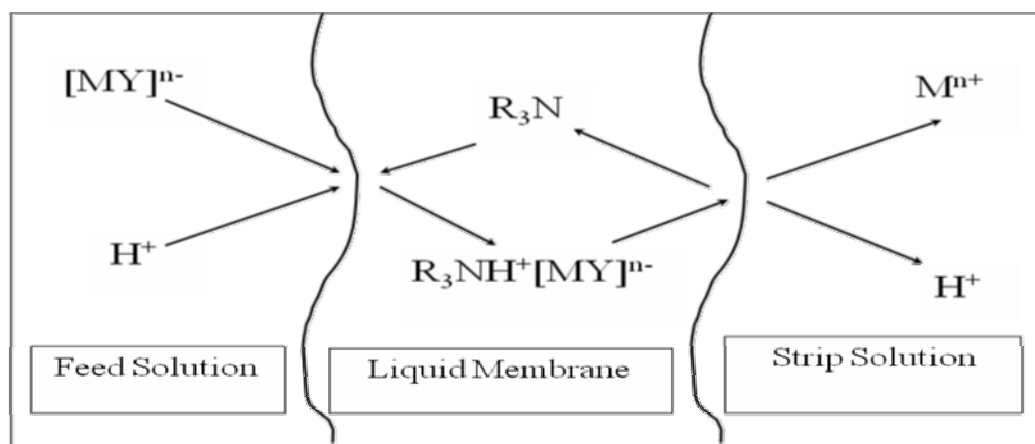
การถ่ายเทชนิดไปทางเดียวกันนี้จะเกิดขึ้นเมื่อใช้สารสกัดชนิดที่เป็นเบส ไอออนของโลหะและไฮโดรเนียมไอออน (H^+) จะเคลื่อนที่ไปในทางเดียวกันกันผ่านเยื่อแผ่นเหลว ในการเกิดปฏิกิริยานั้น ทั้งไอออนโลหะที่อยู่ในรูปประจุลบ $[MY]^{n-}$ และไฮโดรเนียมไอออน H^+ ที่อยู่ในสารป้อนทำปฏิกิริยากับสารสกัด R_3N ที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน $R_3NH^+[MY]^{n-}$ ดังสมการ 2.9 โดยที่สารประกอบเชิงซ้อน $R_3NH^+[MY]^{n-}$ นั้น จะ อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว



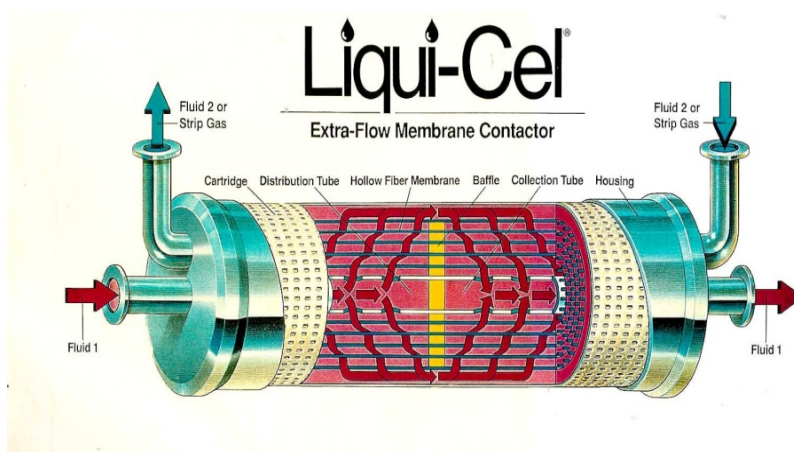
สารประกอบเชิงซ้อน $R_3NH^+[MY]^{n-}$ ที่เกิดขึ้นจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นแรงขับไปยังอีกด้านหนึ่งคือด้านผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับที่ผิวสัมผัสนี้ สารประกอบเชิงซ้อน $R_3NH^+[MY]^{n-}$ จะทำปฏิกิริยาแบบย้อนกลับเกิดเป็นไอออนโลหะออกมาอยู่ในสารละลายนำกลับดังสมการ 2.10 และได้สารสกัด R_3N กลับมาอีกครั้งซึ่งอยู่ในเยื่อแผ่นเหลวและแพร่กลับไปยังด้านสารป้อนอีกเพื่อที่จะไปทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะที่อยู่ในสารป้อน ต่อเนื่องไปจนสิ้นสุดการสกัด ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 กลไกการถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (Counter-Transport) (Ramakul et al.:2003)



รูปที่ 2.5 กลไกการถ่ายเทมวลไปทางเดียวกัน (Co-Transport) (Ramakul et al.:2003)



รูปที่ 2.6 ลักษณะของเยื่อแผ่นเหลวที่ผุ่ด้วยเส้นใยกลวง (Ramakul et al.:2005)

ตารางที่ 2.2 ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว (Sulaiman: 2000)

ขั้นตอนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว
1) การแพร่ของไอออนโลหะจากสารป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
2) การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
3) การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวเข้าไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ
4) การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นและสารละลายนำกลับ
5) การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ

2.5 การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Extraction)

เป็นการสกัดแยกไอออนโลหะโดยใช้สารสกัดสองชนิดมาผสมกันแล้วได้ประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเทียบกับการนำสารสกัดทั้งสองชนิดนั้นมาแยกกันสกัดแล้วนำผลการสกัดมารวมกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic Coefficient, S.C.) Taube และ Siekierski ได้ให้นิยามไว้ดังนี้

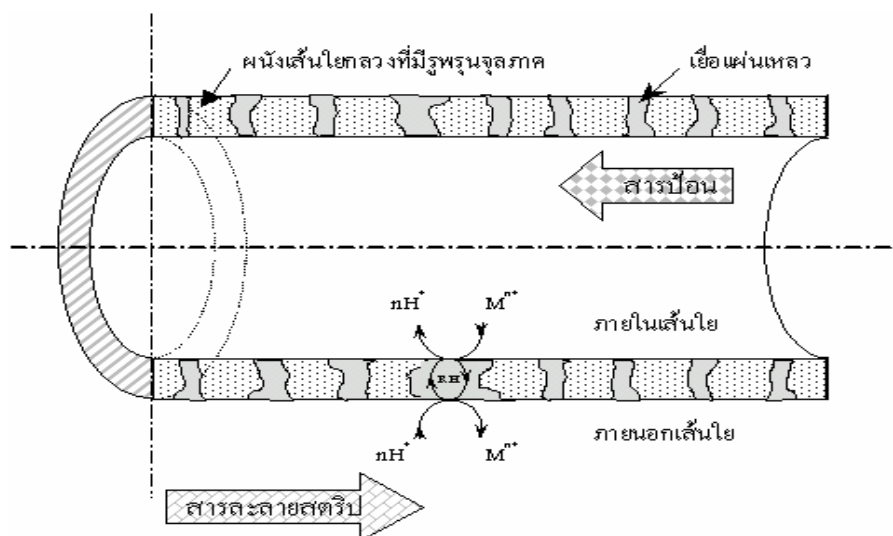
$$S.C. = \log \left(\frac{D_{(1,2)}}{D_{(1)} + D_{(2)}} \right) \quad (2.11)$$

$D_{(1)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) เมื่อใช้สารสกัดชนิดแรก

$D_{(2)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) เมื่อใช้สารสกัดชนิดที่สอง

$D_{(1,2)}$ คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution Ratio) เมื่อนำสารสกัดทั้งสองชนิดนั้นผสมกัน

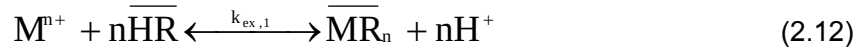
เมื่อ D คือ อัตราส่วนการกระจาย (Distribution ratio) หมายถึง อัตราส่วนของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคน้ำมันต่อไอออนโลหะที่อยู่ในสารป้อนเมื่อเข้าสู่สมดุล ถ้าค่า $S.C.$ มากกว่า 0 หมายความว่าเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) แต่ถ้าค่า $S.C.$ น้อยกว่า 0 หมายความว่าชนิดของสารสกัดที่นำมาผสมกันนี้ทำให้ความสามารถในการสกัดด้อยลง (antagonistic)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการไหลภายในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Ramakul et al.:2005)

สารสกัดทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันเพื่อที่จะให้เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์นั้นจะต้องมีสารสกัดชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นสารสกัดหลัก ซึ่งโดยมากจะใช้ HTTA เป็นสารสกัดหลัก และสารสกัดอีกชนิดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (ดอเนอร์) คอยเสริมการสกัด สารสกัดที่ให้อิเล็กตรอนนี้ จะเป็นสารสกัดที่ไม่สามารถแตกโปรตอนได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวไว้เกิดปฏิกิริยาซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับสารสกัดหลักและไปจับโลหะอีกทีหนึ่ง สารสกัดที่เป็นพวก

ดอเนอร์ เช่น Tri-n-octylamine (TOA), Tri-n-butylphosphate (TBP), Tri-n-octylphosphineoxide (TOPO), Aliquat chloride เป็นต้น ปฏิริยาของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) จะเริ่มจากปฏิริยา



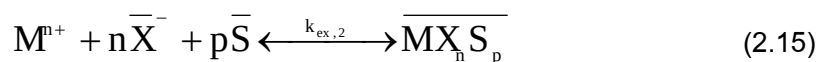
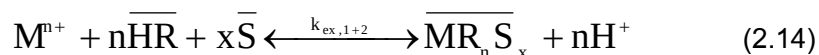
$$k_{ex,1} = \frac{[H^+]^n [\overline{MR_n}]}{[M^{n+}] [\overline{HR}]^n} \quad (2.13)$$

สมการ 2.12 เป็นการสกัดของสารสกัดหลักซึ่งเป็นสารสกัดชนิดกรดโดยทั่วไป

เมื่อ R คือสารสกัดหลัก

$k_{ex,1}$ คือค่าคงที่ของการเกิดปฏิริยาในกรณีที่สารสกัดหลักทำปฏิริยากับไอออนโลหะโดยตรง

ปฏิริยาของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) คือ สารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นดอเนอร์ (S) จะทำปฏิริยากับสารสกัดหลัก HR แล้วไปทำปฏิริยากับไอออนโลหะในสารป้อนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนอีกชนิดคือ $\overline{MR_n S_x}$ ดังสมการ 2.14 ทำให้สกัดโลหะได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้สารสกัดที่เป็นตัวให้อิเล็คตรอน (ดอเนอร์) ยังสามารถไปจับโลหะโดยไม่ต้องทำปฏิริยากับสารสกัดหลักก่อนดังสมการ 2.15 ซึ่งจะทำให้สกัดโลหะได้มากยิ่งขึ้นและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนคือ $\overline{MX_n S_p}$ เมื่อ X คือไอออนประจุลบที่อยู่ในสารละลายป้อนซึ่งเป็นสารละลายของน้ำ



จากสมการ 2.14 และ 2.15 จะได้ว่า

$$k_{ex,1+2} = \frac{[H^+] [\overline{MR_n S_x}]}{[M^{n+}] [S]^x [HR]^n} \quad (2.16)$$

$$k_{ex,2} = \frac{[\overline{MX_n S_p}]}{[M^{n+}][X^-]^n[\bar{S}]^p} \quad (2.17)$$

เมื่อ $k_{ex,1+2}$ และ $k_{ex,2}$ คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ และค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่เกิดการสกัดโดยสารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นดอนเนอร์โดยตรงตามลำดับ และอัตราส่วนการกระจาย(distribution ratio) คือ

$$D_{(1)} = \frac{[\overline{MR_n}]}{[M^{n+}]} = \frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} \quad (2.18)$$

$$D_{(2)} = \frac{[\overline{MX_n S_p}]}{[M^{n+}]} = k_{ex,2} [X^-][\bar{S}]^p \quad (2.19)$$

$$D_{(1+2)} = D_{(1)} + D_{(2)} + \frac{[\overline{MR_n S_x}]}{[M^{n+}]} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ 2.18, 2.19 และ 2.20 จะได้

$$D_{(1+2)} = \frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-][\bar{S}]^p + K_{ex,1+2} \frac{[\bar{S}]^x [\overline{HR}]^n}{[H^+]} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.11 จะได้

$$S.C. = \log \left(\frac{\frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-][\bar{S}]^p + K_{ex,1+2} \frac{[\bar{S}]^x [\overline{HR}]^n}{[H^+]}}{\frac{k_{ex,1} [\overline{HR}]^n}{[H^+]} + K_{ex,2} [X^-][\bar{S}]^p} \right) \quad (2.22)$$

โดยค่าของ $K_{ex,2}$ นั้นมีค่าน้อยมาก เนื่องจากสารสกัดที่เป็นดอนเนอร์นั้น สามารถจับโลหะที่เป็นไอออนบวกได้น้อยมากจึงให้เทอมที่มี $K_{ex,2}$ นั้นเป็นศูนย์ จากสมการ 2.22 จะได้

$$S.C. = \log \left(1 + \frac{K_{ex,1+2} [\bar{S}]^x}{K_{ex,1}} \right) \quad (2.23)$$

$$S.C. = \log (1 + \beta_{n,x} [S]^x) \quad (2.24)$$

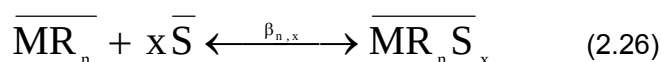
โดย

$$\beta_{n,x} = \frac{K_{ex,1+2}}{K_{ex,1}} \quad (2.25)$$

$\beta_{n,x}$ คือค่าคงที่ความเสถียรของปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) ที่เกิดในวัฏภาคน้ำมันหรือในเยื่อแผ่น

$\beta_{n,x}$ คืออัตราส่วนระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดผสมกันกับค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ใช้สารสกัดหลักเพียงชนิดเดียว นั่นคืออัตราส่วนของค่าคงที่ของปฏิกิริยาในสมการที่ 2.14 กับสมการที่ 2.12

ดังนั้น $\beta_{n,x}$ ก็คือค่าคงที่สมดุลของสมการที่ 2.14 ลบด้วยสมการที่ 2.12 จะได้



สมการที่ 2.26 เป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) ที่เกิดในเยื่อแผ่น โดยมี $\beta_{n,x}$ เป็นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ถ้า $\beta_{n,x}$ มีค่ามากหมายถึงเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) มาก และถ้าสารสกัดที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนนั้นมีการทำปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนหลายตัวสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยารวม

$$S.C. = \left(1 + \sum_{i=1}^{i=x} \beta_{n,i} [\bar{S}]^i \right) \quad (2.27)$$

ไอออนที่อยู่ในสารป้อน เช่น M^{n+} , X^- และ H^+ นั้นไม่มีผลต่อค่า $\beta_{n,x}$ นั่นคือไม่มีผลต่อการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) ของกระบวนการสกัดไอออนโลหะ ผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พวยด้วยเส้นใยกลวง แต่สารสกัดที่ใช้ในการวิจัย ครั้งนี้คือ TBP ซึ่งเป็นกลางสามารถสกัดไอออนบวก ของธาตุหายาก (Rare earth) ได้ การดูว่าเป็น Synergistic extraction หรือไม่ ควรดูที่ผลการทดลองจะดีกว่า

ในงานวิจัยนี้ไอออนของสารหนูและปรอทอยู่ในรูปของ H_2AsO_4^- และ HgCl_4^{2-} ตามลำดับ สำหรับสมการการสกัดไอออนของสารหนูกับ Cyanex 471 (TIBPS) ผสมกับ Aliquat 336 (NR_4^+Cl^-) แสดงดังสมการที่ (2.28) ส่วนสมการการสกัดไอออนของปรอทที่อยู่ในรูปของ HgCl_2^- แสดงดังสมการที่ (2.29) (Juang and Wu, 1999)



2.6.2 สมดุลการสกัด (extraction equilibrium constant, K_{ex})

จากสมการการสกัดไอออนสารหนูและปรอทที่แสดงในสมการที่ (2.28) และ (2.29) สามารถคำนวณค่าคงที่สมดุล (equilibrium constants) สำหรับการสกัดไอออนสารหนูและปรอท ($K_{ex,As}$ และ $K_{ex,Hg}$) ได้จากสมการที่ (2.30) และ (2.31) ตามลำดับ

$$K_{ex,As} = \frac{[(\text{NR}_4) \cdot (\text{H}_2\text{AsO}_4) \cdot (\text{TIBPS})_m]}{[\text{H}_2\text{AsO}_4^-][\text{NR}_4^+][\text{TIBPS}]^m} \quad (2.30)$$

$$K_{ex,Hg} = \frac{[(\text{NR}_4)_2 \cdot (\text{HgCl}_4) \cdot (\text{TIBPS})_n]}{[\text{HgCl}_4^{2-}][\text{NR}_4^+]^2[\text{TIBPS}]^n} \quad (2.31)$$

2.6.3 สัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution ratio, D)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (distribution coefficient, D) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.32) (Stas, 2008)

$$D = \frac{[\text{ไอออนโลหะในสารละลายอินทรีย์ที่สภาวะสมดุล}]}{[\text{ไอออนโลหะในสารป้อนที่สภาวะสมดุล}]} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.30) และ (2.31) เขียนในรูปสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนสารหนู (D_{As}) ได้ดังสมการที่ (2.33) ส่วนสัมประสิทธิ์การกระจายของปรอท (D_{Hg}) แสดงดังสมการที่ (2.34)

$$D_{As} = \frac{[(\text{NR}_4) \cdot (\text{H}_2\text{AsO}_4) \cdot (\text{TIBPS})_m]}{[\text{H}_2\text{AsO}_4^-]} = K_{ex,As} [\text{NR}_4^+][\text{TIBPS}]^m \quad (2.33)$$

$$D_{Hg} = \frac{[(\text{NR}_4)_2 \cdot (\text{HgCl}_4) \cdot (\text{TIBPS})_n]}{[\text{HgCl}_4^{2-}]} = K_{ex,Hg} [\text{NR}_4^+]^2[\text{TIBPS}]^n \quad (2.34)$$

ในสมการที่ (2.33) และ (2.34) m และ n คือเลขมวลสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ซึ่งในการหาค่าของ m หาได้โดยการจัดรูปสมการที่ (2.33) ในรูปของลอการิทึม (logarithm) ดังแสดงในสมการที่ (2.35) จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง $\log D_{As}$ กับ $\log[TIBPS]$ โดยค่าของ m คำนวณได้จากความชันของกราฟ เช่นเดียวกันการหาค่าของ n หาได้โดยการจัดรูปสมการที่ (2.34) ในรูปของลอการิทึม (logarithm) ดังแสดงในสมการที่ (2.36) จากนั้นพล็อตกราฟระหว่าง $\log D_{Hg}$ กับ $\log[TIBPS]$ โดยค่า n คำนวณได้จากความชันของกราฟ

$$\log D_{As} = \log(K_{ex,As} \cdot [NR_4^+]) + m \log[TIBPS] \quad (2.35)$$

$$\log D_{Hg} = \log(K_{ex,Hg} \cdot [NR_4^+]^2) + n \log[TIBPS] \quad (2.36)$$

2.6.4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านคำนวณได้จากสมการที่ (2.37) และ (2.38)

$$-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,o}}\right) = AP \frac{\phi}{\phi+1} t \quad (2.37)$$

โดย

$$\phi = \frac{Q_f}{PL\varepsilon\pi Nr_i} \quad (2.38)$$

เมื่อ P คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน $C_{f,o}$ คือ ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาเริ่มต้น C_f คือ ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่เวลาใดๆ A คือ พื้นที่การถ่ายโอนมวล V_f คือ ปริมาตรของสารป้อน Q_f คือ อัตราการไหลของสารป้อน L คือ ความยาวของเส้นใยกลวง N คือ จำนวนเส้นใยกลวงในโมดูล r_i รัศมีภายในของเส้นใยกลวง และ ε คือ ความพรุนของเส้นใยกลวง

การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านหาได้จากการสร้างกราฟระหว่าง $-V_f \ln\left(\frac{C_f}{C_{f,o}}\right)$ กับ เวลา (t) จะได้ความชันของกราฟ คือ $AP \frac{\phi}{\phi+1}$ จากความชันที่ได้สามารถคำนวณค่า P หรือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และวิธีการทดลองในการศึกษาการแยกสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

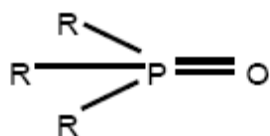
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังในตารางที่ 3.1

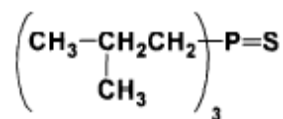
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	บริษัท
สารป้อน	น้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะ ก๊าซธรรมชาติ	-	บริษัท ปตท.สำรวจและ ผลิตปิโตรเลียม จำกัด
สารสกัด	Aliquat 336 Bromo-PADAP Trioctylamine Cyanex 923 Cyanex 921 Cyanex 471	$\text{CH}_3\text{N}[(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3]_3\text{Cl}$ $\text{C}_{15}\text{H}_{17}\text{BrN}_4\text{O}$ $\text{C}_{24}\text{H}_{51}\text{N}$ PR_3O $\text{C}_{24}\text{H}_{51}\text{PO}$ $(\text{CH}_3\text{-CH}_2(\text{CH}_3)\text{-CH}_2\text{-})_3\text{PS}$	Sigma-Aldrich Sigma-Aldrich Fluka Cytec Candada Inc. Cytec Candada Inc. Cytec Candada Inc.
ตัวทำละลาย	น้ำมันก๊าด	-	บริษัท ระยองเพียวริฟาย เออร์ จำกัด (มหาชน)
สารละลาย น้ำกลับ	น้ำที่ปราศจากไอออน (น้ำ DI) โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดกำมะถัน กรดไนตริก thiourea	H_2O NaOH H_2SO_4 HNO_3 NH_2CSNH_2	- Merck QReC Merck Fluka

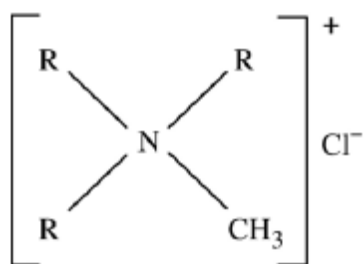
สูตรโครงสร้างสารสกัด Aliquat 336, Bromo-PADAP, TOA, Cyanex 923, Cyanex 921 และ Cyanex 471 แสดงดังรูปที่ 3.1



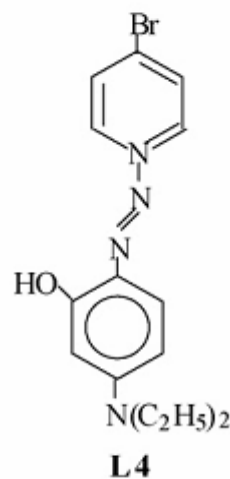
Cyanex 923 เมื่อ R เป็น C_6H_{13}
ผสมกับ C_8H_{17} (Wisniewski, 1997)



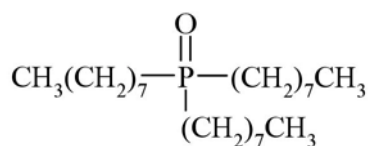
Cyanex 471 (Congost *et al.*, 1996)



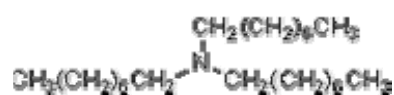
Aliquat 336 เมื่อ R = $\text{CH}_2(\text{CH}_2)_6\text{CH}_3$
(Fábrega and Mansur, 2007)



Bromo-PADAP (Deligöz & Erdem, 2008)



Cyanex 921 (Prapasawat, 2008)



TOA (Pancharoen, 2010)

รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดที่ใช้ในการทดลอง

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation ประกอบด้วย
 - เครื่องสูบ 2 ชุด ที่มีอัตราไหลสูงสุด 1 ลิตรต่อนาที
 - มาตรวัดและชุดควบคุมอัตราการไหล 2 ชุด
 - มาตรวัดความดัน 2 ชุด



รูปที่ 3.2 ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat. #5PCM-106

2. อุปกรณ์เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งมีตัวรองรับเป็นเส้นใยกลวงพอลิโพรไพลีน ชนิดมีรูพรุน Celgard[®] X-30 ที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นมอดูล ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีสมบัติดังตารางที่ 3.2
3. เครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) Perkin Elmer Model PLASMA-1000 ใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนของสารหนูและปรอท



รูปที่ 3.2 มอดูลเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 สมบัติของมอดูลเส้นใยกลวงพอลิพรไพลีนที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	ชนิด / ขนาด
วัสดุเส้นใยกลวง	พอลิพรไพลีน
จำนวนเส้นใยกลวง	10,000
ความพรุนของเส้นใยกลวง	30 เปอร์เซ็นต์
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเส้นใยกลวง	240 ไมโครเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเส้นใยกลวง	300 ไมโครเมตร
ขนาดรูพรุนที่มีประสิทธิภาพ	0.05 ไมโครเมตร
พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพ	1.4 ตารางเมตร (15.2 ตารางฟุต)
อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรที่มีประสิทธิภาพ	29.3 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
มิติของชุดเส้นใยกลวง (D x L)	2.5 x 8 นิ้ว
ความดันแตกต่างสูงสุด	4.2 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
ช่วงอุณหภูมิในการปฏิบัติการสูงสุด	1 – 60 องศาเซลเซียส

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารป้อนจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ

1. สารละลายป้อนเป็นน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ ต้องเก็บในถังพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีน โดยบรรจุปราศจากอากาศ
2. นำน้ำทิ้งดังกล่าวมากรองตะกอนและสิ่งสกปรกที่อาจจะปนเปื้อนมา โดยกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์หนึ่ง
3. เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งทุกครั้งที่ทำทดลองปริมาณ 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปตรวจวัดปริมาณองค์ประกอบของสารหนูและสารปรอทด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ โดยตรวจวัดปริมาณสารหนูด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma: ICP และตรวจวัดปริมาณสารปรอทด้วยเครื่อง Atomic Absorption Cold Vapour Technique

3.3.2 ศึกษาชนิดสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดไอออนสารหนูและสารปรอท

1. เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยผสมสารสกัดชนิด Aliquat 336 กับตัวทำละลายน้ำมันก๊าดให้มีความเข้มข้น 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 และ 1.00 โมลต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับเริ่มต้น โดยเตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์
4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่หลอดเส้นใยกลวง จนกระทั่งซึมผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งของหลอด และป้อนน้ำปราศจากไอออนเพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ค้างอยู่ในหลอด
5. ป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่หลอดเส้นใยกลวง พร้อมกันที่อัตราการไหลเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างของทั้งสารป้อนและสารละลายสตรีปที่ไหลผ่านหลอด เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์
6. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนชนิดของสารสกัดในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดเป็นสารสกัดชนิด TOA และสารสกัดชนิด Cyanex 923 ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 และ 1.00 โมลต่อลิตร สำหรับสารสกัดชนิด Cyanex 921 ความเข้มข้นเท่ากับ 0.005, 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 โมลต่อลิตร สำหรับสารสกัดชนิด Cyanex 471 ความเข้มข้นเท่ากับ 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.1 โมลต่อลิตร และ

สำหรับสารสกัดชนิด BROMO-PADAP ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.0005, 0.001, 0.002, 0.003 และ 0.004 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

7. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปตรวจวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไอออนสารหนูและสารปรอทด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่อไป

3.3.3 ผลการศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์

1. เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัดผสมระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.40 โมลต่อลิตรและสารสกัดชนิด Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.60 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด ปริมาตรเยื่อแผ่นเหลวเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับเริ่มต้น โดยเตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง จนกระทั่งซึมผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งของมอดูล และป้อนน้ำปราศจากไอออนเพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ค้างอยู่ในมอดูล

5. ป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง พร้อมกันที่อัตราการไหลเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างของทั้งสารป้อนและสารละลายสตริปที่ไหลผ่านมอดูลเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

6. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนชนิดของสารสกัดในการผสมสลับคู่กันจนครบ

7. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปตรวจวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไอออนสารหนูและสารปรอทด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่อไป

3.3.4 ผลของกรดกำมะถันในสารละลายป้อนต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท

1. เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ และเติมกรดกำมะถันให้ได้ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ได้ปริมาตรรวมเท่ากับ 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัดผสมระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.40 โมลต่อลิตรและสารสกัดชนิด Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.60 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด ปริมาตรเยื่อแผ่นเหลวเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับเริ่มต้น โดยเตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง จนกระทั่งซึมผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งของมอดูล และป้อนน้ำปราศจากไอออนเพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ค้างอยู่ในมอดูล

5. ป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง พร้อมกันที่อัตราการไหลเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างของทั้งสารป้อนและสารละลายสตรีปที่ไหลผ่านมอดูล เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

6. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดกำมะถัน ในสารป้อนเป็น 0.2, 0.5, 0.7 และ 0.9 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

7. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปตรวจวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไอออนสารหนูและสารปรอทด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่อไป

3.3.5 ผลของชนิดสารละลายนำกลับต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท

1. เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ และเติมกรดกำมะถัน ความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.4 โดยปริมาตรรวมเท่ากับ 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัดผสมระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.40 โมลต่อลิตรและสารสกัดชนิด Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.60 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด ปริมาตรเยื่อแผ่นเหลวเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับเริ่มต้น โดยเตรียมจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง จนกระทั่งซึมผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งของมอดูล และป้อนน้ำปราศจากไอออนเพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ค้างอยู่ในมอดูล

5. ป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง พร้อมกันที่อัตราการไหลเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างของทั้งสารป้อนและสารละลายสตรีปที่ไหลผ่านมอดูล เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

6. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนสารละลายนำกลับเป็น น้ำปราศจากไอออน หรือน้ำ DI กรดกำมะถันเข้มข้น และกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และสารละลาย thiourea เข้มข้น 0.03 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

7. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปตรวจวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไอออนสารหนูและสารปรอทด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่อไป

3.3.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท

1. เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ และเติมกรดกำมะถันความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.4 โดยปริมาตรรวมเท่ากับ 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัดผสมระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.40 โมลต่อลิตรและสารสกัดชนิด Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.60 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด ปริมาตรเยื่อแผ่นเหลวเท่ากับ 500 มิลลิลิตร

3. เตรียมสารละลายนำกลับเริ่มต้น โดยเตรียมจากสารละลายนำกลับที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.3.5 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง จนกระทั่งซึมผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งของมอดูล และป้อนน้ำปราศจากไอออนเพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่ค้างอยู่ในมอดูล

5. ป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง พร้อมกันที่อัตราการไหลเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างของทั้งสารป้อนและสารละลายสตรีปที่ไหลผ่านมอดูล เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

6. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารนำกลับ

7. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปตรวจวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไอออนสารหนูและสารปรอทด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่อไป

3.3.7 ผลของจำนวนรอบในการไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวง

1. เตรียมสารละลายป้อนซึ่งเป็นน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ และเติมกรดกำมะถัน ความเข้มข้นเท่ากับ ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.4 โดยปริมาตรรวมเท่ากับ 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์
2. เตรียมสารละลายเยื่อแผ่นเหลวโดยใช้สารสกัดผสมระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.40 โมลต่อลิตรและสารสกัดชนิด Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.60 โมลต่อลิตร ในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด ปริมาตรเยื่อแผ่นเหลวเท่ากับ 500 มิลลิลิตร
3. เตรียมสารละลายนำกลับเริ่มต้น โดยเตรียมจากสารละลายนำกลับที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.3.5 ปริมาตร 5 ลิตร และเก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตรเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์
4. ป้อนสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง จนกระทั่งซึมผ่านไปยังอีกด้านหนึ่งของมอดูล และป้อนน้ำปราศจากไอออนเพื่อไล่สารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่คงค้างอยู่ในมอดูล
5. ป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวง พร้อมกันที่อัตราการไหลเท่ากันเท่ากับ 100 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างของทั้งสารป้อนและสารละลายสตริปที่ไหลผ่านมอดูล เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์
6. ทำการทดลองซ้ำ โดยป้อนสารป้อนและสารละลายนำกลับที่ไหลออกจากมอดูลเส้นใยกลวงในรอบแรก ให้ไหลเข้าสู่มอดูลเส้นใยกลวงเป็นรอบที่สอง รอบที่สาม รอบที่สี่ ตามลำดับ โดยแต่ละรอบเก็บตัวอย่างหลังผ่านมอดูล
7. นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองทั้งหมดไปตรวจวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของไอออนสารหนูและสารปรอทด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่อไป

3.4 ขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลวง

หลังจากทำการทดลองทุกครั้ง จำเป็นต้องทำความสะอาดเครื่องมือและมอดูลเส้นใยกลวง เนื่องจากสารเคมีหรือสิ่งสกปรกต่างๆ สามารถเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนเส้นใยกลวงได้ง่าย ซึ่งจะเข้าไปขวางกั้นการไหลของสารละลาย ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดลดลง ดังนั้นขั้นตอนการทำความสะอาดเส้นใยกลวง จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการสกัดแยกสารด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พวยด้วยเส้นใยกลวง โดยการทำทำความสะอาดมีขั้นตอนดังนี้

1. ป้อนน้ำปราศจากไอออนให้ไหลผ่านมอดูลของเส้นใยกลวงประมาณ 10 นาที เพื่อไล่สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับที่เหลือค้างอยู่ในมอดูลของเส้นใยกลวง

2. ใช้สารลดแรงตึงผิวที่เจือจางด้วยน้ำ หรือใช้น้ำยาล้างจาน ป้อนให้ไหลลงในมอดูลเส้นใยกลวงเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดเยื่อแผ่นเหลวที่คงค้างอยู่ในรูพรุนของเส้นใยกลวง จากนั้นป้อนสารลดแรงตึงผิวที่เจือจางแล้วปริมาณ 5 ลิตร ให้ไหลผ่านในมอดูลเส้นใยกลวง เพื่อกำจัดคราบของสารละลายเยื่อแผ่นเหลว
3. ป้อนน้ำปราศจากไอออนให้ไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวงอีกครั้งประมาณ 10 – 15 นาที เพื่อไล่สารลดแรงตึงผิวออกจากมอดูลของเส้นใยกลวง
4. เลือกใช้สารละลายที่สามารถละลายสารที่อุดตันในรูพรุนของเส้นใยกลวงได้ ซึ่งในที่นี้เลือกใช้กรดฟอสฟอริกผสมกับกรดไนตริกในสัดส่วนโดยปริมาตร 2:3 ให้ไหลผ่านในมอดูลเส้นใยกลวงเป็นเวลา 15 – 30 นาที
5. ป้อนน้ำปราศจากไอออนให้ไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวงประมาณ 10 – 15 นาที

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูและสารปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยจะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดดังนี้คือ ชนิดและความเข้มข้นของทั้งสารสกัดและสารนำกลับที่เหมาะสม ความเข้มข้นของกรดกำมะถันในสารป้อน รวมทั้งการสกัดแบบเสริมฤทธิ์กันของสารสกัด 2 ชนิดที่มีผลต่อการสกัดไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ โดยผลการศึกษาสามารถแสดงได้เป็นลำดับดังนี้

4.1 ผลการตรวจวัดปริมาณสารหนูและสารปรอทที่มีอยู่ในสารป้อนเริ่มต้น

น้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ปตท. สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ซึ่งนำมาตรวจวัดปริมาณองค์ประกอบของสารหนูโดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma: ICP และตรวจวัดปริมาณองค์ประกอบของสารปรอทด้วยเครื่อง Atomic Absorption Cold Vapour Technique ได้ผลการตรวจวัดดังตารางที่ 4.1

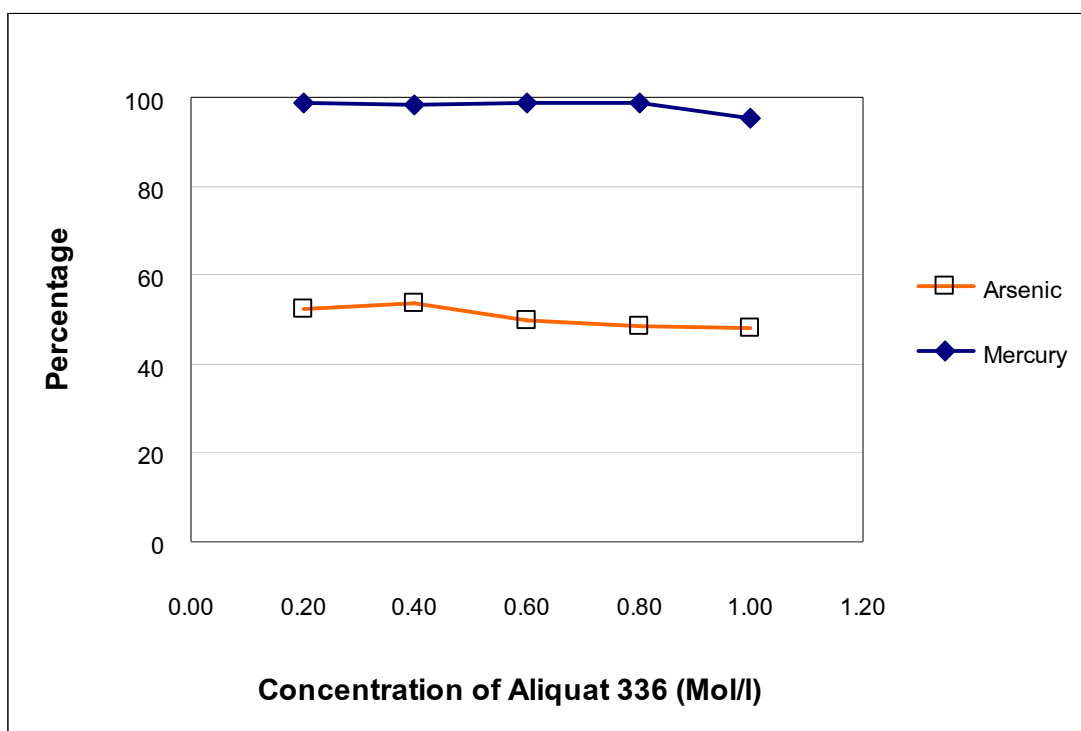
ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบของสารหนูและสารปรอทในสารป้อน

องค์ประกอบ	ปริมาณ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
สารหนู (Arsenic)	~ 3.584
สารปรอท (Mercury)	~0.245

จากตารางที่ 4.1 พบว่าในน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นสารป้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยไอออนของสารหนูเฉลี่ยประมาณ 3.584 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 3,584 ส่วนในพันล้านส่วน ประกอบไปด้วยไอออนของสารปรอทเฉลี่ยประมาณ 0.245 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเท่ากับ 245 ส่วนในพันล้านส่วน นอกจากนี้ยังตรวจพบไอออนของเหล็ก แมกนีเซียม แคลเซียม และโซเดียมเฉลี่ยประมาณ 0.169, 2.400, 15.167 และ 1,821.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับอีกด้วย

4.2 ผลการศึกษาชนิดสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดไอออนสารหนูและสารปรอท

สารสกัดจำนวน 6 ชนิดคือ สารสกัดชนิด Aliquat 336 สารสกัดชนิด Trioctylamine (TOA) สารสกัดชนิด Cyanex 923 สารสกัดชนิด Cyanex 921 สารสกัดชนิด Cyanex 471 และ สารสกัดชนิด Bromo-PADAP ถูกนำมาศึกษาโดยนำสารสกัดแต่ละชนิดเตรียมเป็นสารละลายเยื่อแผ่นเหลว ด้วยการผสมสารสกัดแต่ละชนิดกับตัวทำละลายเคโรซีน ที่ความเข้มข้นที่ทำการศึกษา และนำไปเคลือบฝังในรูปพุนจุลภาคของเส้นใยกลวง จากนั้นทำการศึกษาการสกัดสารหนูและสารปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ ซึ่งได้ผลการศึกษาตามลำดับดังนี้

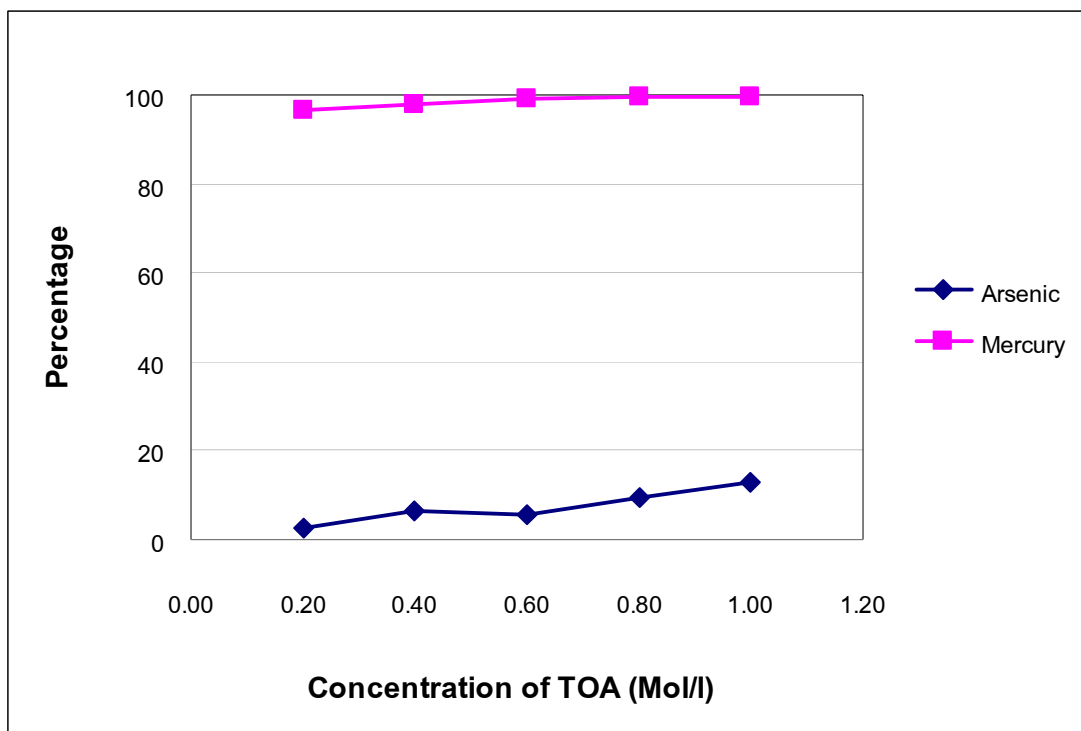


รูปที่ 4.1 ผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Aliquat 336

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการสกัดไอออนสารหนูและสารปรอทออกจากน้ำทิ้ง ที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัดชนิด Aliquat 336 ในตัวทำละลายเคโรซีนเป็นเยื่อแผ่นเหลว ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าสามารถสกัดสารปรอทได้เท่ากับร้อยละ 98.76, 98.34, 98.76 และ ร้อยละ 98.76 และสามารถสกัดสารหนูได้เท่ากับร้อยละ 52.51, 53.52, 50.00, 48.66 และ ร้อยละ 47.99 ตามลำดับ

โดยจากผลการศึกษาที่ได้ดังกล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าสารสกัดชนิด Aliquat 336 สามารถสกัดแยกสารปรอทได้ดีและได้มากกว่าถึงร้อยละ 95 ในทุกความเข้มข้นของสารสกัด

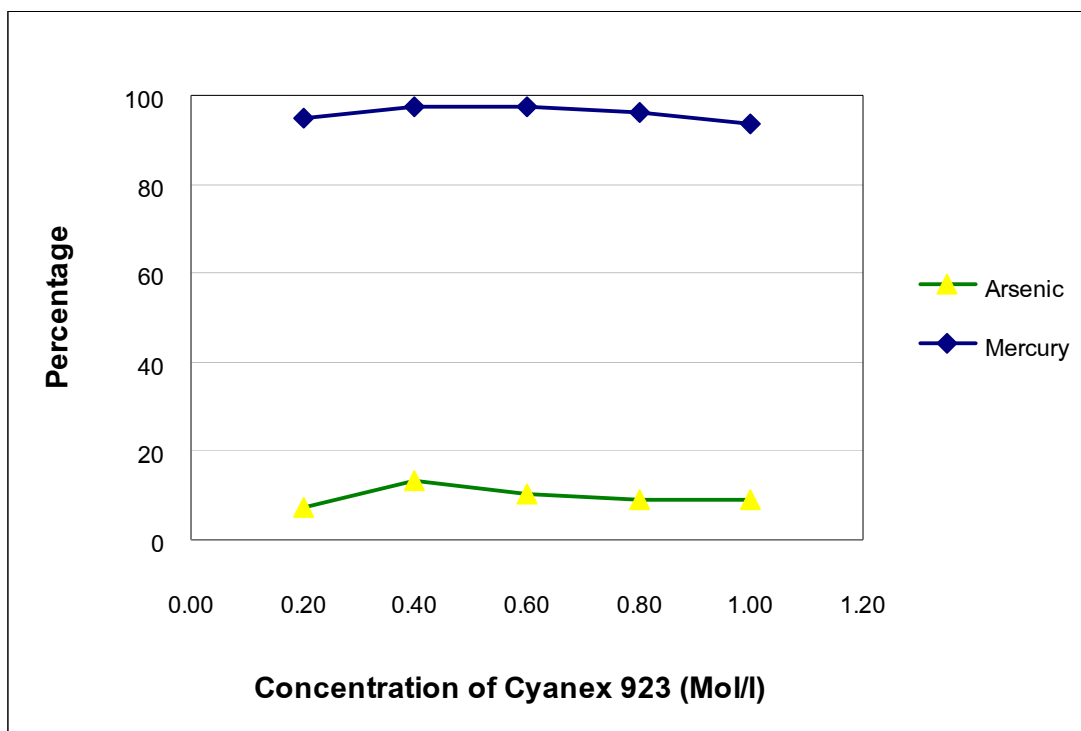
แต่สำหรับการสกัดสารหนูพบว่าสามารถสกัดได้ในช่วงร้อยละ 48 ถึงร้อยละ 53 และเมื่อใช้สารสกัดชนิด TOA ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด TOA

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Trioctylamine หรือ TOA ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าสามารถสกัดสารปรอทได้เท่ากับร้อยละ 96.68, 97.93, 99.17, 99.59 และร้อยละ 99.59 และสามารถสกัดสารหนูได้เท่ากับร้อยละ 2.48, 6.45, 5.78, 9.24 และร้อยละ 12.98 ตามลำดับ

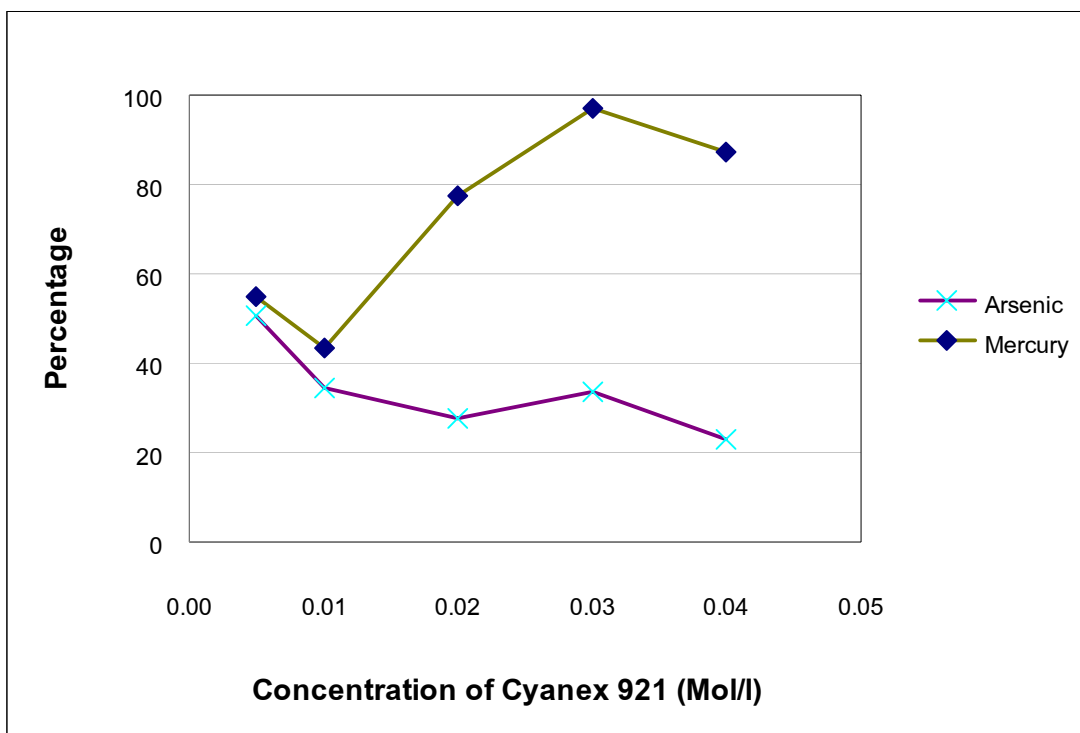
จากผลการศึกษาที่ได้ดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าสารสกัดชนิด TOA สามารถสกัดแยกสารปรอทได้ดีเช่นเดียวกับสารสกัดชนิด Aliquat 336 ซึ่งได้มากกว่าร้อยละ 96 ในทุกความเข้มข้นของสารสกัด แต่สำหรับการสกัดสารหนูพบว่าสามารถสกัดได้ต่ำ ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 2 ถึงร้อยละ 13 และเมื่อใช้สารสกัดชนิด Cyanex 923 ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Cyanex 923

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Cyanex 923 ที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 โมลต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าสามารถสกัดสารปรอทได้เท่ากับร้อยละ 95.02, 97.51, 97.51, 96.27 และร้อยละ 93.78 และสามารถสกัดสารหนูได้เท่ากับร้อยละ 7.23, 13.23, 10.30, 8.85 และร้อยละ 8.85 ตามลำดับ

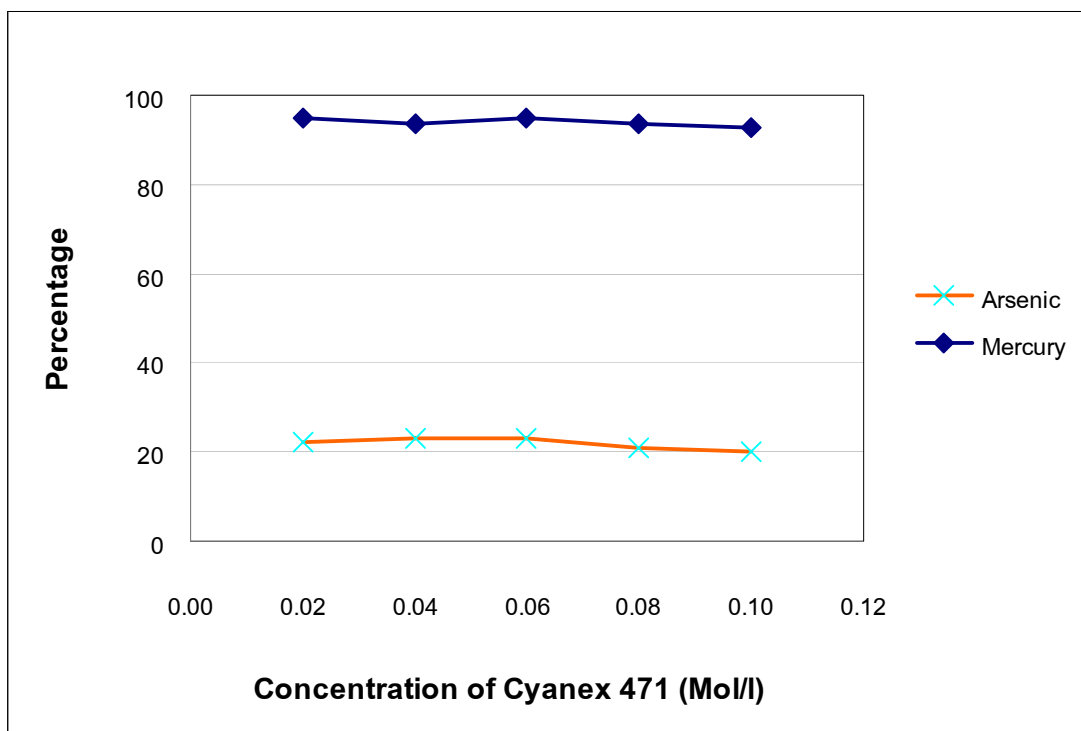
จากผลการศึกษาที่ได้ดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าสารสกัดชนิด Cyanex 923 สามารถสกัดแยกสารปรอทได้ดีเช่นเดียวกับสารสกัดชนิด Aliquat 336 และสารสกัดชนิด TOA ซึ่งสกัดได้มากกว่าร้อยละ 93 ในทุกความเข้มข้นของสารสกัด แต่สำหรับการสกัดสารหนูพบว่ายังสกัดได้ต่ำกว่าร้อยละ 13 และเมื่อใช้สารสกัดชนิด Cyanex 921 ได้ผลดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Cyanex 921

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Cyanex 921 ที่ความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 โมลต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าสามารถสกัดสารปรอทได้เท่ากับร้อยละ 54.77, 43.57, 77.59, 97.10 และร้อยละ 87.14 และสามารถสกัดสารหนูได้เท่ากับร้อยละ 50.78, 34.37, 27.64, 33.47 และร้อยละ 22.78 ตามลำดับ

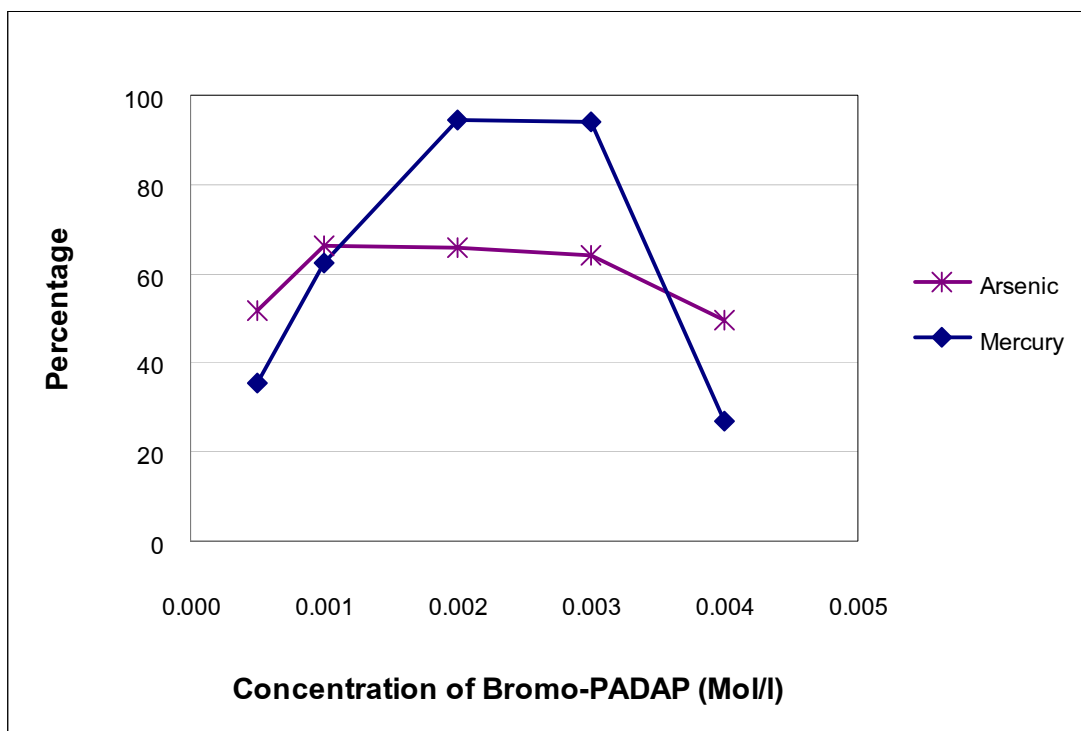
จากผลการศึกษาที่ได้ดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าสารสกัดชนิด Cyanex 921 สามารถสกัดแยกสารปรอทได้ดีเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มสูงขึ้น และสามารถสกัดสารปรอทได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.03 โมลต่อลิตร ซึ่งสามารถสกัดได้มากถึงร้อยละ 97.10 แต่สำหรับการสกัดสารหนูพบว่าสามารถสกัดได้ดีที่ความเข้มข้นของสารสกัดต่ำๆ โดยสามารถสกัดสารหนูได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้น 0.005 โมลต่อลิตร ซึ่งสามารถสกัดสารหนูได้มากถึงร้อยละ 50.78 และเมื่อใช้สารสกัดชนิด Cyanex 471 ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Cyanex 471

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Cyanex 471 ที่ความเข้มข้น 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.10 โมลต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าสามารถสกัดสารปรอทได้เท่ากับร้อยละ 95.02, 93.78, 95.02, 93.78 และร้อยละ 92.53 และสามารถสกัดสารหนูได้เท่ากับร้อยละ 22.03, 23.20, 23.23, 20.99 และร้อยละ 19.99 ตามลำดับ

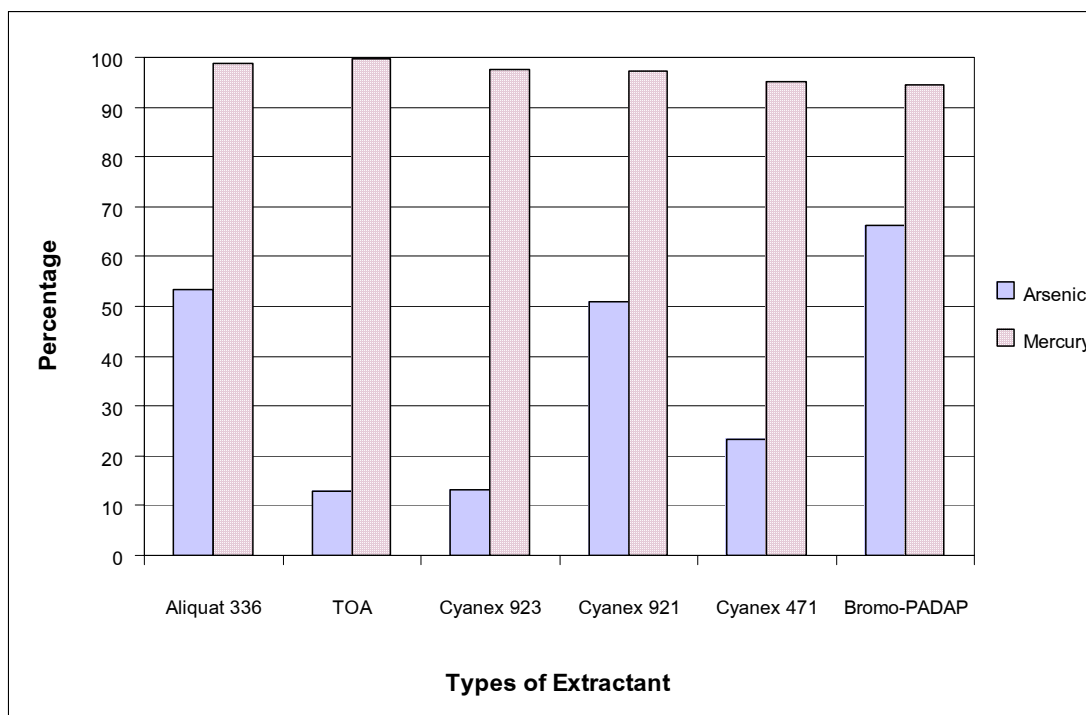
จากผลการศึกษาที่ได้ดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าสารสกัดชนิด Cyanex 471 สามารถสกัดแยกสารปรอทได้ดีเช่นเดียวกับสารสกัดชนิด Aliquat 336, สารสกัดชนิด TOA และสารสกัดชนิด Cyanex 923 ซึ่งสามารถสกัดสารปรอทได้มากกว่าร้อยละ 92 ในทุกความเข้มข้นของสารสกัด แต่สำหรับการสกัดสารหนูพบว่ายังสกัดได้ต่ำและอยู่ในช่วงร้อยละ 19 ถึงร้อยละ 23 และเมื่อใช้สารสกัดชนิด Bromo-PADAP ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Bromo-PADAP

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดชนิด Bromo-PADAP ที่ความเข้มข้น 0.0005, 0.001, 0.002, 0.003 และ 0.004 โมลต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าสามารถสกัดสารปรอทได้เท่ากับร้อยละ 35.27, 62.24, 94.61, 94.19 และร้อยละ 26.97 และสามารถสกัดสารหนูได้เท่ากับร้อยละ 51.81, 66.11, 65.69, 63.96 และร้อยละ 49.55 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาที่ได้ดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าสารสกัดชนิด Bromo-PADAP สามารถสกัดแยกสารปรอทได้ดีเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดเพิ่มสูงขึ้น และสามารถสกัดสารปรอทได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.002 และ 0.003 โมลต่อลิตร ซึ่งสามารถสกัดได้มากถึงร้อยละ 94 แต่สำหรับการสกัดสารหนูพบว่าสามารถสกัดได้อยู่ในช่วงร้อยละ 49 ถึงร้อยละ 66 และเมื่อนำผลเฉพาะในส่วนที่ดีที่สุดของแต่ละสารสกัดนำมาเปรียบเทียบผลการสกัดแยกสารหนูและสารปรอทสามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.7



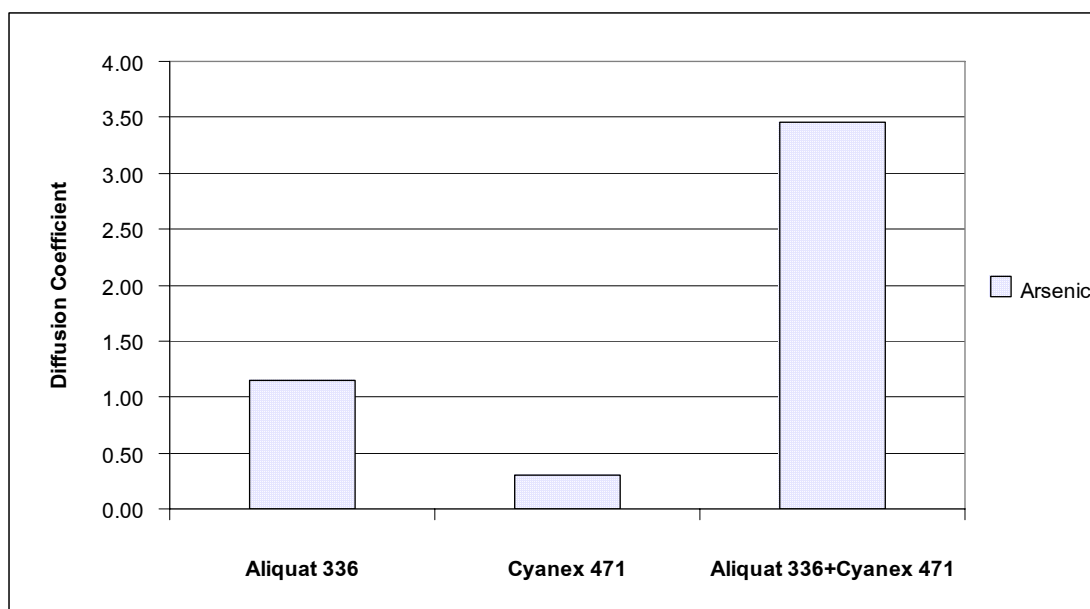
รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดทั้ง 6 ชนิด

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการเปรียบเทียบการสกัดสารหนูและสารปรอทด้วยสารสกัดทั้ง 6 ชนิด ซึ่งพบว่าสารสกัดทุกชนิดที่ทำการศึกษามีความสามารถสารปรอทได้ดี แต่พบว่าสารสกัดชนิด Bromo-PADAP สามารถสกัดสารหนูได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นสารสกัดชนิด Aliquat 336 และสารสกัดชนิด Cyanex 921 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่าไอออนของสารปรอทมีความเสถียรในเลขออกซิเดชัน ไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะของสารละลาย และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Uedee et al., 2008) ดังนั้นสารสกัดทุกชนิดจึงสามารถสกัดสารปรอทได้ดี แต่สำหรับสารหนูไม่เสถียรในเลขออกซิเดชัน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาคูสมบัติของสารสกัดประกอบกับผลการศึกษา ซึ่งพบว่าสารสกัดชนิดที่เป็นเบส (Aliquat 336 และ Bromo-PADAP) สามารถสกัดไอออนสารหนูได้ดีกว่าสารสกัดชนิดกลาง (Cyanex 471 กับ Cyanex 923) เนื่องจากสารสกัดชนิดกลางจะทำปฏิกิริยากับไอออนสารหนูได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด (Pancharoen et al., 2009) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Wisniewski, 1997; Perez et al., 2007; Prapasawat et al., 2008) ทั้งนี้สารสกัดที่เป็นกลางจะเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบที่ไม่มีไอออน (Porter, 1990) เท่านั้น ในขณะที่สารสกัดที่เป็นเบสนั้นสามารถสกัดไอออนสารหนูที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่แตกตัว (H_3AsO_3) และสารประกอบที่ไม่แตกตัว (H_2AsO_4^-) ได้ (Luo et al., 2004) ซึ่งสารหนูในน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในการทดลองนี้อยู่ในรูปของ H_2AsO_4^- , H_3AsO_3 และ H_3AsO_4 ดังนั้น Aliquat 336 และ Bromo-PADAP ซึ่งเป็นสารสกัดที่มีคุณสมบัติที่เป็นเบสจึงสามารถสกัดสารหนูได้ดีกว่า Cyanex 471 ที่เป็นสารสกัดชนิดกลาง

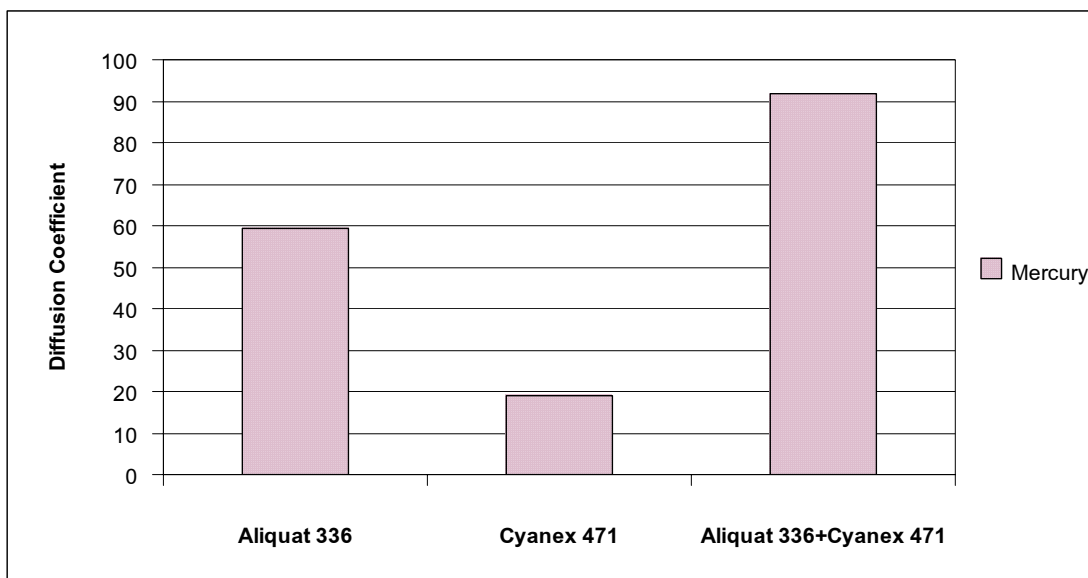
4.3 ผลการศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์

จากการศึกษาที่ผ่านมาสำหรับสารปรอทแล้วพบว่าสารสกัดทุกชนิดที่ทำการศึกษามีความสามารถสกัดสารปรอทได้ดี แต่สำหรับสารหนูนั้นมีสารสกัดเพียงบางชนิดที่สามารถสกัดสารหนูได้ดี แต่ก็ยังไม่มากเพียงพอและจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการผสมสารสกัดสองชนิด อาจมีผลการเสริมฤทธิ์กันของสารสกัดทั้งสอง ซึ่งจะทำให้สามารถสกัดได้เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการสกัดแบบเสริมฤทธิ์กันของสารสกัด โดยนำสารสกัดสองชนิดที่ความเข้มข้นที่สกัดทั้งสารหนูและสารปรอทได้ดีที่สุดผสมกัน ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่ไม่เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์กัน แต่เมื่อใช้สารสกัดชนิด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร ผสมกับสารสกัด Cyanex 471 ที่ความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร พบว่ามีผลการสกัดแบบเสริมฤทธิ์กัน โดยผลการเสริมฤทธิ์กันนี้จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Diffusion coefficient, D) เปรียบเทียบกัน ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของสารหนูเมื่อพิจารณาผลการเสริมฤทธิ์ของสารสกัด

จากรูปที่ 4.8 พบว่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารหนูเมื่อใช้สารสกัดชนิด Aliquat 336 และสารสกัดชนิด Cyanex 471 เพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 1.15 และ 0.30 ตามลำดับ แต่เมื่อผสมสารสกัดทั้งสองเข้าด้วยกันแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 3.46 แสดงว่าการผสมสารสกัดทั้งสองเข้าด้วยกัน ส่งผลให้เกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction)

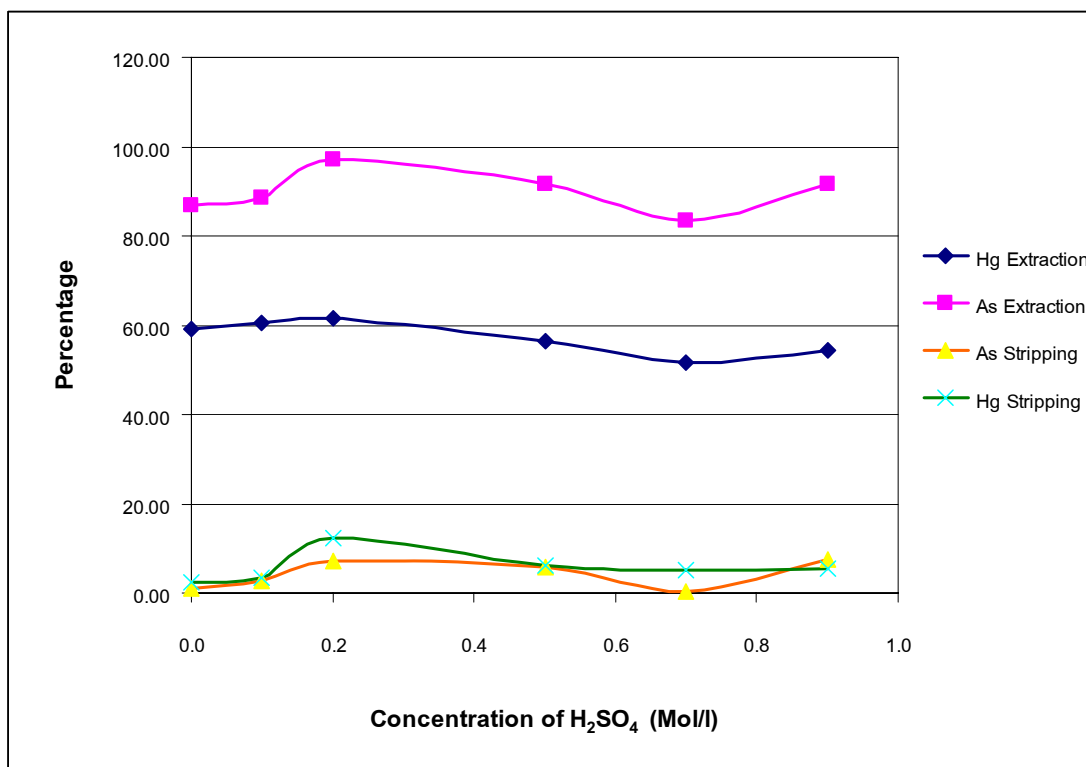


รูปที่ 4.9 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของสารปรอทเมื่อพิจารณาผลการเสริมฤทธิ์ของสารสกัด

สำหรับผลการสกัดสารปรอทนั้น พบว่าเกิดการเสริมฤทธิ์กันของสารสกัดทั้งสอง เช่นเดียวกับการสกัดสารหนู โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารปรอทเมื่อใช้สารสกัดชนิด Aliquat 336 และสารสกัดชนิด Cyanex 471 เพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 59.25 และ 19.08 ตามลำดับ แต่เมื่อผสมสารสกัดทั้งสองเข้าด้วยกันแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายจะเพิ่มขึ้นเป็น 91.69 ซึ่งเพิ่มสูงอย่างมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าการผสมสารสกัดทั้งสองเกิดการเสริมฤทธิ์ซึ่งกันและกันทั้งการสกัดสารหนูและสารปรอท

4.4 ผลของกรดกำมะถันในสารป้อนต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท

รูปที่ 4.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดกำมะถันในสารป้อนกับร้อยละการสกัดและร้อยละการนำกลับ เมื่อใช้สารสกัดผสมที่มี Aliquat 336 เข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร และ Cyanex 471 เข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับ พบว่าเมื่อเติมกรดกำมะถันในสารป้อนแล้วร้อยละการสกัดสารหนูและสารปรอทจะสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากกรดกำมะถันทำให้สารหนูและสารปรอทเกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่อยู่ในรูปสารประกอบที่มีประจุลบ ส่งผลให้ Aliquat 336 สามารถจับไอออนของสารประกอบดังกล่าวได้มากขึ้น โดย Aliquat 336 นั้นสามารถจับไอออนที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีประจุลบได้ดีกว่าในรูปของประจุบวก (Pancharoen *et al.*, 2009) เมื่อกรดกำมะถันในสารป้อนมีความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร จะให้ร้อยละการสกัดสารหนูและสารปรอทสูงสุดโดยให้ร้อยละการสกัดไอออนสารหนูและปรอทเป็น 62 และ 97 ตามลำดับ



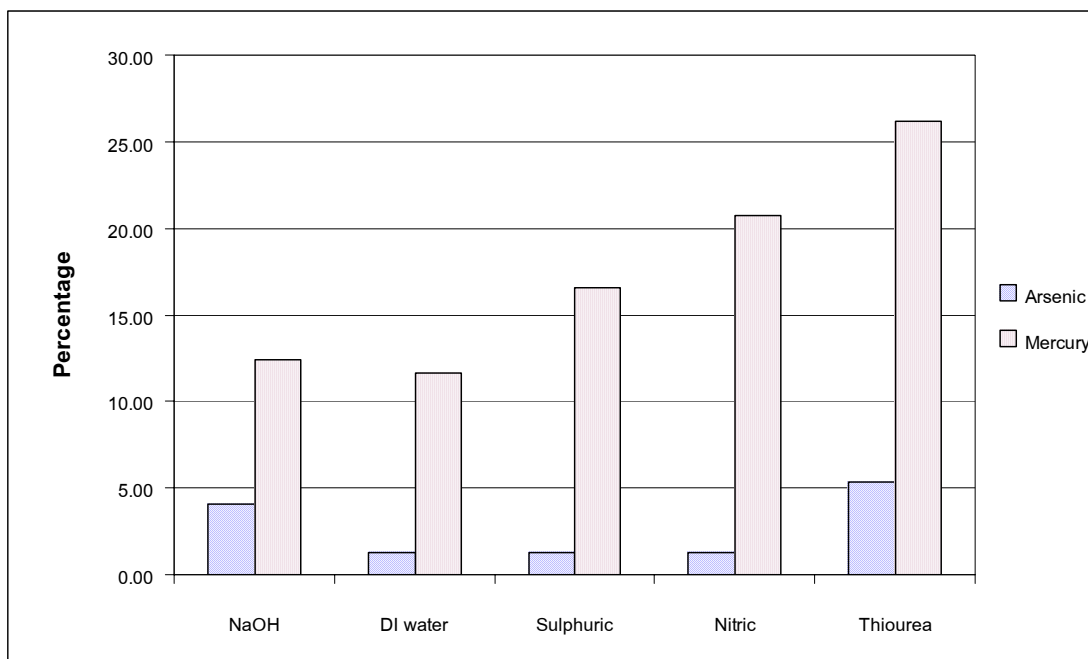
รูปที่ 4.10 ผลของกรดซัลฟิวริกในสารป้อนต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท

นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีของ เฮนรีหลุย เลอชาเตอริเยร์ ได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดในสารป้อนจะเป็นการรบกวนสมดุล ทำให้สมดุลเลื่อนไปข้างหน้าส่งผลให้ความสามารถในการสกัดสารหนูและสารปรอทมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ปริมาณไอออนของสารหนูและสารปรอททางด้านผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ซึ่งในที่นี้คือฝั่งของเยื่อแผ่นเหลว จนเมื่อความเข้มข้นของกรดก่มีค่าเป็น 0.2 โมลต่อลิตร จะมีค่าร้อยละการสกัดสารหนูและสารปรอทสูงสุด และเมื่อความเข้มข้นของกรดก่มีค่าในสารป้อนมากกว่า 0.2 โมลต่อลิตร ค่าร้อยละการสกัดสารหนูและสารปรอทจะลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากสารสกัดผสมประกอบด้วย Aliquat 336 กับ Cyanex 471 โดย Aliquat 336 เป็นสารสกัดชนิดเบส ซึ่งสามารถสกัดไอออนโลหะได้ดีในสภาวะที่มีความเป็นกรดไม่สูงมากนัก (Pancharoen *et al.*, 2010) ดังนั้นเมื่อสารป้อนมีค่าความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ร้อยละการสกัดสารหนูและสารปรอทลดต่ำลงนั่นเอง

4.5 ผลของชนิดสารละลายนำกลับต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท

สารละลายนำ 5 ชนิดคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำปราศจากไอออน สารละลายกรดกำมะถัน สารละลายกรดไนตริก และสารละลายโซไอยูเรีย ถูกนำมาใช้เป็นสารละลายสตริป เพื่อศึกษาการนำกลับสารหนูและสารปรอท โดยทำการศึกษาในกระบวนการสกัดที่ใช้สารสกัดผสมระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat 336 เข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร และสารสกัด

ชนิด Cyanex 471 เข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร สารป้อนมีความเข้มข้นของกรดกำมะถันเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร โดยผลจากการศึกษาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

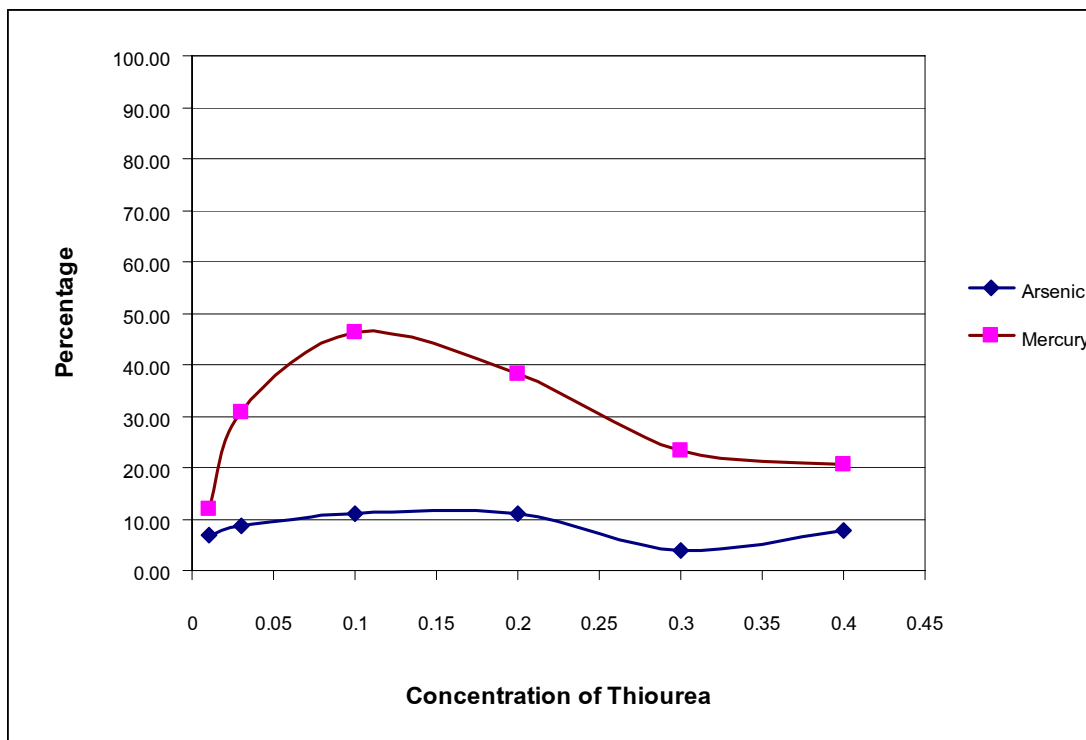


รูปที่ 4.11 ผลของชนิดสารละลายสตริปต่อการนำกลับแยกสารหนูและสารปรอท

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลของชนิดสารละลายสตริปต่อการนำกลับสารหนูและสารปรอท ซึ่งพบว่าสารละลาย thiourea สามารถนำกลับไอออนสารหนูและปรอทได้ดีกว่าสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายกรดไนตริก สารละลายกรดกำมะถัน และน้ำปราศจากไอออน (DI water) ตามลำดับ เนื่องจากสารสกัดที่ใช้ประกอบด้วย Cyanex 471 และ Aliquat 336 โดย Aliquat 336 นั้นเป็นสารสกัดชนิด quaternary ammonium (Fábrega and Mansur, 2007) จึงทำให้สารสกัดสามารถสร้างพันธะกับสารหนูและสารปรอทได้อย่างแข็งแรง ดังนั้นสารละลายที่จะนำกลับไอออนสารหนูและสารปรอทออกจากสารสกัดได้ ต้องมีความเป็นขั้วสูงจึงจะสามารถนำกลับไอออนสารหนูและสารปรอทออกจากสารสกัดได้ โดย thiourea นั้นมีความเป็นขั้วสูง ดังนั้นจึงสามารถนำกลับไอออนสารหนูและสารปรอทได้ดีที่สุดนั่นเอง

4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายนำกลับต่อการสกัดสารหนูและสารปรอท

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ Thiourea กับร้อยละการนำกลับสารหนูและสารปรอท เมื่อกระบวนการสกัดใช้กรดกำมะถันในสารป้อน เข้มข้นเท่ากับ 0.2 โมลต่อลิตร สารสกัดเป็นสารสกัดผสมระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat 336 เข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร และสารสกัดชนิด Cyanex 471 เข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร



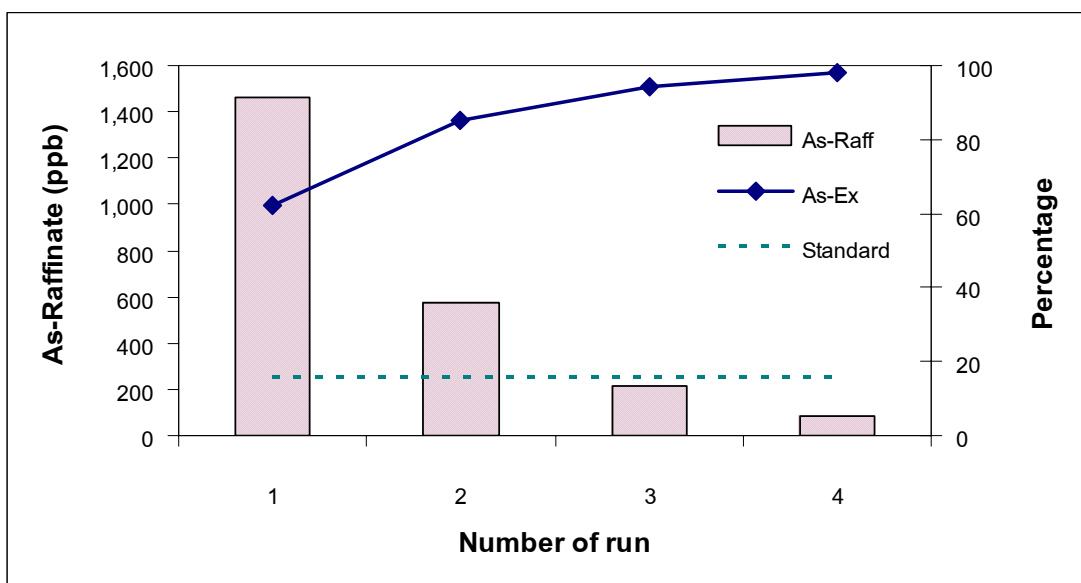
รูปที่ 4.12 ผลของความเข้มข้นของสารละลายน้ำกลั้ว thiourea กับร้อยละการนำกลับ

ซึ่งพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไฮโอยูเรียเพิ่มสูงขึ้น ร้อยละการนำกลับสารหนูและสารปรอทจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยผลที่ได้ดังกล่าวสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีของ เฮนรีหลุย เลอชาเตอริเยร์ ได้ว่าเมื่อสารละลายน้ำกลั้วมีความเข้มข้นมากขึ้น จะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้ามากขึ้น ส่งผลให้อิออนของสารหนูและสารปรอทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน แล้วเคลื่อนที่ไปฝั่งสารละลายน้ำกลั้วได้มากขึ้น จึงทำให้สามารถนำกลับไอออนของสารหนูและสารปรอทได้เพิ่มขึ้น จนเมื่อสารละลายไฮโอยูเรียมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร จะให้ค่าร้อยละการนำกลับไอออนสารปรอทสูงสุดถึงร้อยละ 46 จากนั้นร้อยละการนำกลับจะลดลงเมื่อสารละลายไฮโอยูเรียมีความเข้มข้นเพิ่มสูงเกินกว่า 0.1 โมลต่อลิตร ส่วนร้อยละการนำกลับไอออนสารหนูที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโอยูเรียเท่ากับ 0.1 และ 0.2 โมลต่อลิตร จะมีค่าสูงเช่นกันซึ่งเท่ากับร้อยละ 11.02 และร้อยละ 11.10 ตามลำดับ และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไฮโอยูเรียมีค่าสูงกว่า 0.2 โมลต่อลิตรแล้ว ค่าร้อยละการนำกลับสารหนูจะลดต่ำลง

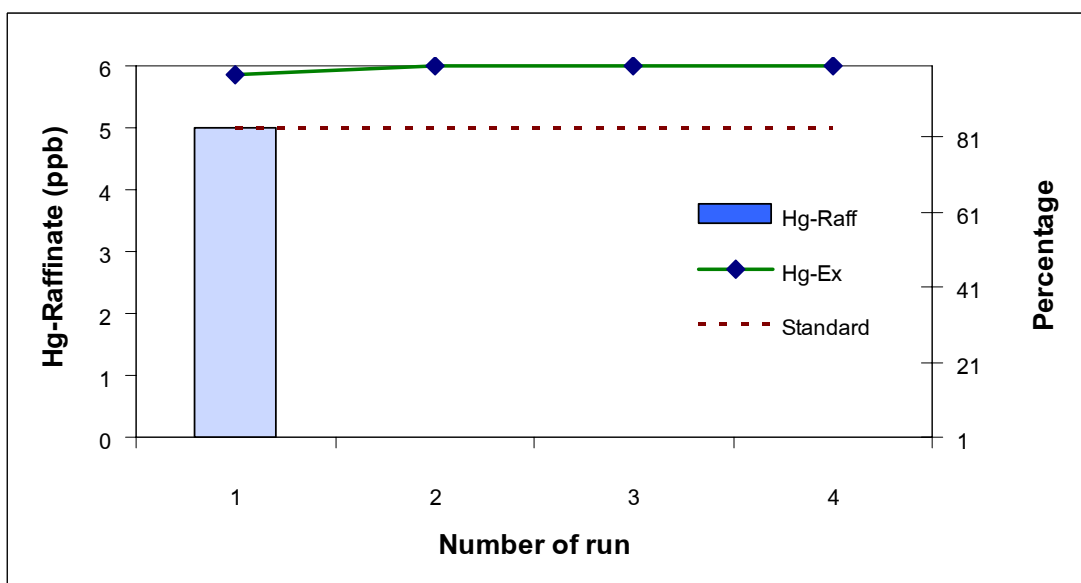
4.7 ผลของจำนวนรอบในการป้อนผ่านมอดูลเส้นใยกลวง

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดไอออนสารหนูและสารปรอท ด้วยการเพิ่มจำนวนรอบในการไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวงของสารป้อนและสารละลายน้ำกลั้ว ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 โดยกราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์

ระหว่างจำนวนรอบในการปฏิบัติการกับปริมาณที่เหลืออยู่เป็น ppb (แกนแนวตั้งซ้ายมือ) ส่วนกราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการปฏิบัติการกับร้อยละของการสกัด



รูปที่ 4.13 ผลของจำนวนรอบในการไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวงต่อการสกัดสารหนู



รูปที่ 4.14 ผลของจำนวนรอบในการไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวงต่อการสกัดสารปรอท

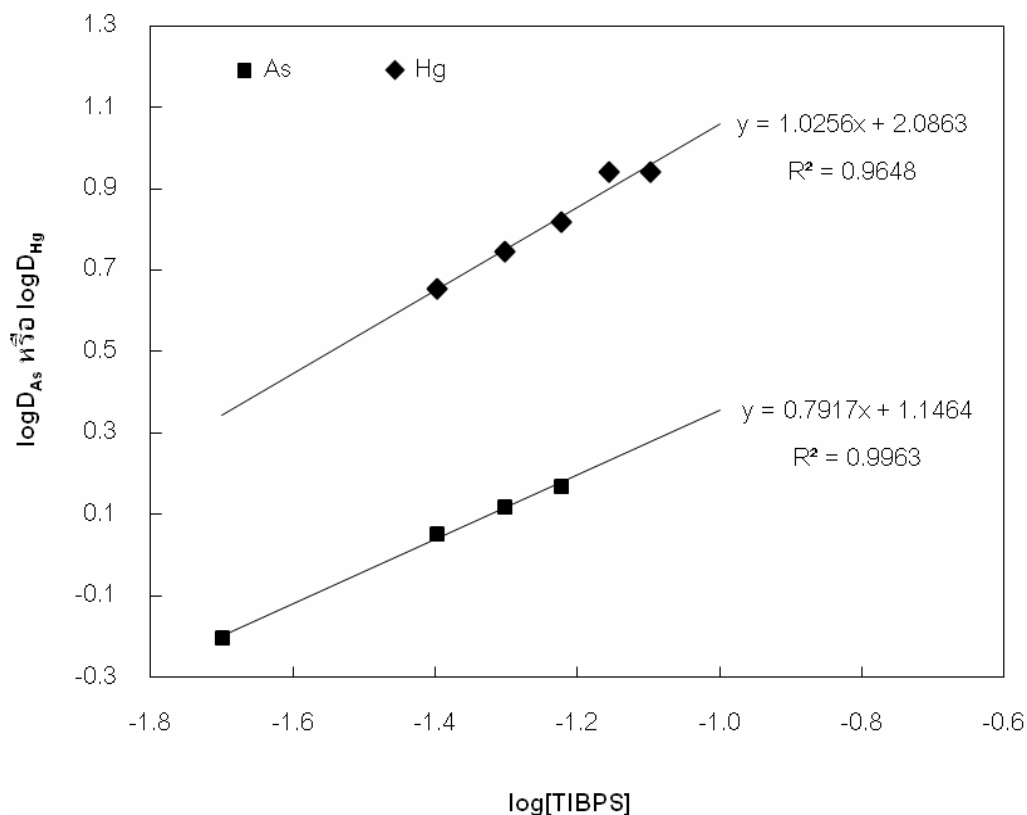
จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เมื่อได้ดำเนินการป้อนสารให้ไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวงครบหนึ่งรอบของการปฏิบัติการแล้ว ถึงแม้ว่าจะสามารถสกัดแยกสารหนูและสารปรอทได้มากถึงร้อยละ 62 และร้อยละ 97 ตามลำดับก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาจากปริมาณองค์ประกอบสารหนูและสารปรอทที่คงเหลือ (Raffinate) แล้วพบว่าสารหนูยังมีปริมาณมากถึง 1,464 ส่วนในพันล้านส่วนและมีสารปรอทมากถึง 5 ส่วนในพันล้านส่วนซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่ามาตรฐานที่

กฎหมายกำหนดนั้นคือกำหนดให้สารหนูต้องไม่เกิน 250 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) และสารปรอทต้องไม่เกิน 5 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb)

ดังนั้นเมื่อดำเนินเพิ่มจำนวนรอบในการปฏิบัติการแล้วพบว่า สามารถกำจัดทั้งสารหนูและสารปรอทได้เพิ่มมากขึ้น โดยสารปรอทสามารถกำจัดหมดไปได้ในรอบปฏิบัติการที่สอง แต่สำหรับสารหนูนั้นต้องเพิ่มรอบในการปฏิบัติการมากกว่าสามรอบของการปฏิบัติการ จึงจะสามารถกำจัดสารหนูให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กฎหมายกำหนดได้ (พิจารณาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่แสดงด้วยเส้นประ)

4.8 ค่าคงที่สมดุล

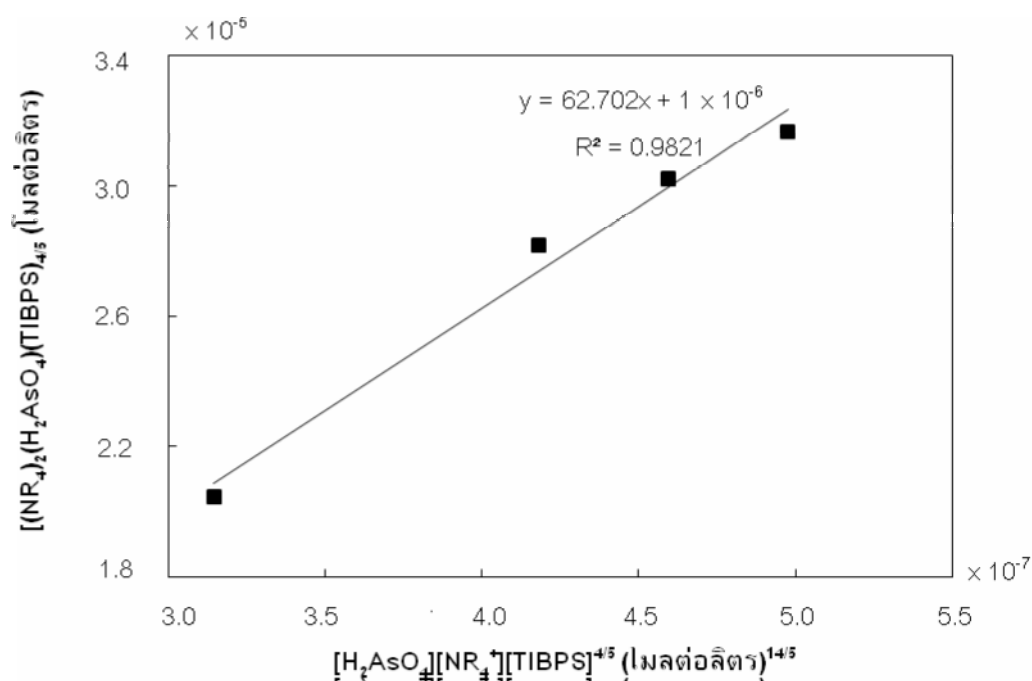
จากสมการที่ (2.35) และ (2.36) สามารถคำนวณค่า m ได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\log D_{As}$ กับ $\log[TIBPS]$ เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับและไม่มีการเติมกรดกำมะถันในสารป้อน ส่วนค่า n สามารถหาได้จากวิธีการเดียวกันนั้นคือคำนวณจากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\log D_{Hg}$ กับ $\log[TIBPS]$ ผลการคำนวณได้ค่าของ m ประมาณ 0.8 (4/5) และ n ประมาณ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ดังนั้นสมการของการสักระบบเสริมฤทธิ์สำหรับไอออนสารหนูและสารปรอทในสมการที่ (2.13) และ (2.14) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.4) และ (4.5)



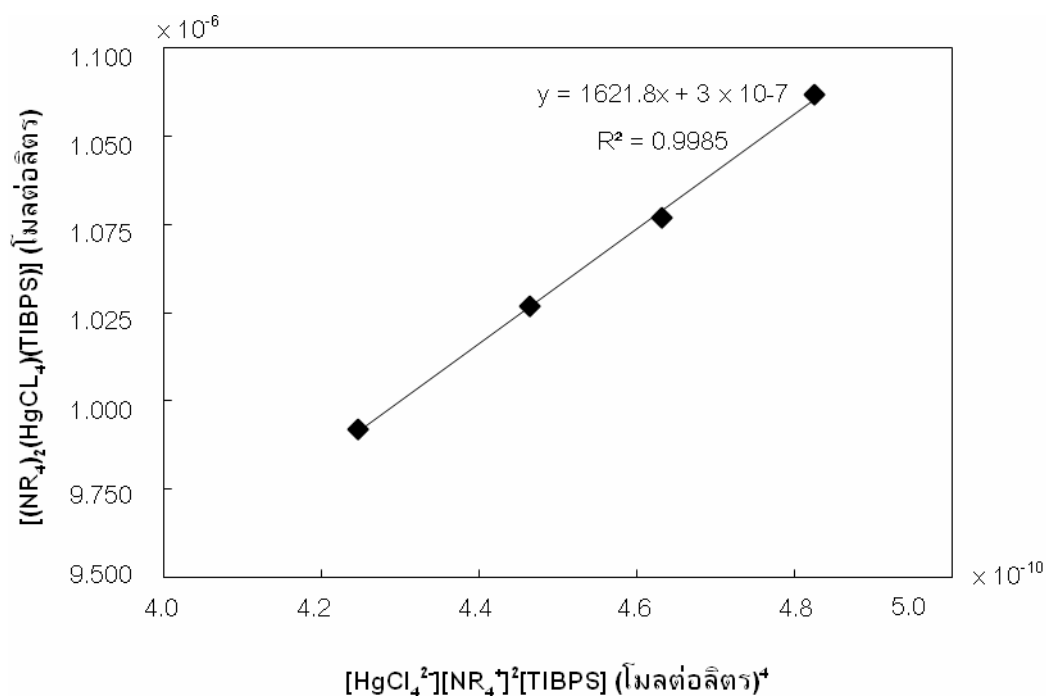
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log D_{As}$ และ $\log D_{Hg}$ กับ $\log[TIBPS]$



ค่าคงที่สมดุล (Equilibrium constant) ของการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการสกัดไอออนสารหนูหาได้จากข้อมูลการทดลองและจากสมการที่ (2.30) โดยคำนวณจากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $[(\text{NR}_4)(\text{H}_2\text{AsO}_4)(\text{TIBPS})_{4/5}]$ กับ $[\text{H}_2\text{AsO}_4^-][\text{NR}_4^+][\text{TIBPS}]^{4/5}$ ที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับและไม่มี การเติมกรดกำมะถันในสารป้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ส่วนค่าคงที่สมดุลการเกิดปฏิกิริยา สำหรับการสกัดไอออนปรอทได้จากข้อมูลการทดลองและจากสมการที่ (2.31) โดยคำนวณจากความชันของกราฟระหว่าง $[(\text{NR}_4)_2(\text{HgCl}_4)(\text{TIBPS})]$ และ $[\text{HgCl}_4^{2-}][\text{NR}_4^+]^2[\text{TIBPS}]$ ที่สภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายนำกลับและไม่มี การเติมกรดกำมะถันในสารป้อน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $[(\text{NR}_4)(\text{H}_2\text{AsO}_4)(\text{TIBPS})_{4/5}]$ กับ $[\text{H}_2\text{AsO}_4^-][\text{NR}_4^+][\text{TIBPS}]^{4/5}$



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $[(NR_4)_2(HgCl_4)(TIBPS)]$ กับ $[HgCl_4^{2-}][NR_4^+]^2[TIBPS]$

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $[(NR_4)_2(HgCl_4)(TIBPS)]$ กับ $[HgCl_4^{2-}][NR_4^+]^2[TIBPS]$ ที่ได้จากข้อมูลผลการทดลอง โดยผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาสร้างกราฟ ซึ่งจะได้ค่าคงที่สมดุลการเกิดปฏิกิริยาของการสกัดไอออนสารหนู โดยมีค่าเท่ากับ 62.70 (ลิตรต่อโมล)^{9/5} และมีค่าคงที่สมดุลการเกิดปฏิกิริยาของการสกัดไอออนสารปรอทเท่ากับ 1,621.80 (ลิตรต่อโมล)³

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการสกัดและนำกลับไอออนสารหนูและสารปรอท ออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดดังนี้คือ ชนิดและความเข้มข้นของทั้งสารสกัดและสารนำกลับที่เหมาะสม ความเข้มข้นของกรดกำมะถันในสารป้อน รวมทั้งการสกัดแบบเสริมฤทธิ์กันของสารสกัด 2 ชนิดที่มีผลต่อการสกัดไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ โดยผลการศึกษาได้แสดงไว้แล้วในบทที่ผ่านมาและสามารถสรุปผลการศึกษาได้เป็นลำดับดังนี้

1. สารสกัดทั้งหกชนิดที่ทำการศึกษาคือ Aliquat 336, Bromo-PADAP, TOA, Cyanex 923, Cyanex 921, และ Cyanex 471 สามารถสกัดไอออนสารปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติได้ดีกว่าไอออนสารหนู

2. ประสิทธิภาพในการสกัดสารหนูและสารปรอทจะพิจารณาจากค่าร้อยละการสกัดและค่าร้อยละการนำกลับ โดยสารสกัดที่มีประสิทธิภาพในการสกัดไอออนสารหนูได้ดีเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้คือ Aliquat 336-Cyanex 471 > Bromo-PADAP > Aliquat 336 > Cyanex 921 > Cyanex 471 > Cyanex 923 > TOA และสำหรับสารสกัดที่มีประสิทธิภาพในการสกัดไอออนสารปรอทได้ดีเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้คือ TOA > Aliquat 336-Cyanex 471 > Aliquat 336 > Cyanex 923 > Cyanex 921 > Cyanex 471 > Bromo-PADAP ตามลำดับ

3. การสกัดไอออนสารหนูและสารปรอทโดยใช้สารสกัดสองชนิดผสมกันระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat 336 และสารสกัดชนิด Cyanex 471 นั้นจะเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic extraction) โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (Synergy coefficient, S.C.) เป็น 2.8 ซึ่งมากกว่า 1 จึงเป็นการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ สำหรับสารสกัดผสมคู่อื่นๆ ไม่มีคุณสมบัติการเสริมฤทธิ์การสกัดซึ่งกันและกัน

4. ความเข้มข้นของสารสกัดผสมที่เหมาะสมในการสกัดแยกไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงคือ สารสกัดผสมระหว่างสารสกัดชนิด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.40 โมลต่อลิตร กับสารสกัดชนิด Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร

5. เมื่อเติมกรดกำมะถันในสารป้อนเริ่มต้น จะทำให้ค่าร้อยละการสกัดไอออนสารหนูและสารปรอทสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากกรดกำมะถันจะทำให้สารหนูและสารปรอทเกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่อยู่ในรูปสารประกอบที่มีประจุลบ ส่งผลให้สารสกัดชนิด Aliquat 336 สามารถสกัดไอออนได้มากขึ้น โดยความเข้มข้นของกรดกำมะถันในสารป้อนที่เหมาะสมคือ 0.2 โมลต่อลิตร ทั้งนี้ร้อยละการสกัดไอออนสารหนูและสารปรอทลดลง เมื่อกรดกำมะถันมีความเข้มข้นมากกว่า 0.2 โมลต่อลิตร

6. สารละลายนำกลับชนิดไทโอยูเรีย (Thiourea) สามารถนำกลับไอออนสารหนูและสารปรอทได้ดีกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ > น้ำปราศจากไอออน (DI water) > กรดกำมะถัน และกรดไนตริก โดยสามารถนำกลับไอออนสารหนูและสารปรอทได้สูงสุดเมื่อใช้สารละลายไทโอยูเรียเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร

7. จำนวนรอบในการไหลผ่านมอดูลเส้นใยกลวงของน้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับการสกัดไอออนสารหนูและปรอทคือจำนวน 3 รอบ ซึ่งสามารถกำจัดไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่กฎหมายกำหนด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ควรได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง ในเรื่องการพัฒนาเพื่อนำมาออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรม ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมการสำรวจและขุดเจาะปิโตรเลียม

2. ควรได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่องในเรื่องของอายุการใช้งานของเยื่อแผ่นเหลว และการบำรุงรักษาระหว่างการใช้งาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมต่อไป

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กรมพลังงานทดแทน, มาตรการประหยัดพลังงาน, เอกสารเผยแพร่, กระทรวงพลังงาน, 2548.
- กรมควบคุมมลพิษ, เอกสารชุดสารเคมีเฉพาะเรื่อง (Monograph), สารหนู (Arsenic). พิมพ์ครั้งที่ 2, ฝ่ายศูนย์ข้อมูลอันตรายและอนุสัญญา, กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2541.
- กิตติพงษ์ เชื้อวัฒนชัย, การบำบัดน้ำทิ้งจากหลุมก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการกรอง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- ประกร รามกุล, การแยกไอออนผสมของแลนทานัมและนีโอดีเมียมโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, กระทรวงสาธารณสุข, ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ, สารหนูได้รับแล้วตายผ่อนส่ง, กระทรวงสาธารณสุข, 2545.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน, 2539.
- กิตติพงษ์ เชื้อวัฒนชัย. การบำบัดน้ำทิ้งจากหลุมก๊าซธรรมชาติโดยกระบวนการกรอง, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- มารยาท วีรวิกรม, พรอทในก๊าซธรรมชาติ. วารสารสิ่งแวดล้อม, 2(11) 2541.
- รัตนา จิระรัตนานนท์. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541
- วรเดช พูนคำ, การกำจัดสารหนูออกจากน้ำทิ้งที่ได้จากหลุมก๊าซธรรมชาติโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- ศิริธร นาคชำนาญ, ชลาทิพย์ ไชยหนักแน่น, ชนวีร์ ใจสิทธิ์, อูรา ปานเจริญ และ วีรวัฒน์ บัตทวี-คงคา. การสกัดแยกสารหนูออกจากสารละลายด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้สารสกัด Cyanex 923 ในน้ำมันก๊าดเป็นเยื่อแผ่นเหลว, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 ประจำปี 2550.
- สวัสดีภพ สมบูรณ์ปัญญา. การเพิ่มการนำกลับแบบคัดเลือกพรอทจากน้ำที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- สุทธิเจตต์ จันทรศิริ, สารพรอทในแหล่งน้ำ[online]. สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2544. แหล่งที่มา: [Error! Hyperlink reference not valid.](#), August 5
- อูรา ปานเจริญ. กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. 1,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ

ภาษาอังกฤษ

- C. Fontàs, M. Hidalgo, V. Salvadó, E. Anticó, Selective recovery and preconcentration of mercury with a benzoylthiourea-solid supported liquid membrane system, *Anal. Chim. Acta.* 547 (2005) 255.
- C. Porter, *Handbook of industrial membrane technology* New Jersey: Noyes Publications, 1990.
- D.L. Gallup, J. B. Strong, Removal of mercury and arsenic from produced water, Chevron Corporation, (2007) 1.
- E. Pajuelo, I.D. Rodríguez-Llorente, M. Dary, A.J. Palomares, Toxic effects of arsenic on sinorhizobium-medicago sativa symbiotic interaction, *Environ. Pollut.* 154 (2008) 203.
- F. Luo, D. Li, P. Wei, Synergistic extraction of zinc(II) and cadmium(II) with mixtures of primary amine N1923 and neutral organophosphorous derivatives, *Hydrometallurgy* 73 (2004) 31.
- F.D.M. Fábrega, M.B. Mansur, Liquid-liquid extraction of mercury (II) from hydrochloric acid solutions by Aliquat 336, *Hydrometallurgy* 87 (2007) 83.
- G. Corvini, J. Stiltner, Keith Clark, Mercury removal from natural gas and liquid streams, UOP LLC, (2007) 1.
- G. Schultz, Separation techniques with supported liquid membrane, *Desalination* 68 (1988) 191.
- H. Deligöz and E. Erdem, Comparative studies on the solvent extraction of transition metal cations by calixarene, phenol and ester derivatives, *J. Hazard. Mat.* 154 (2008) 29.
- J. Stas, Liquid-liquid extraction of sulfuric acid using tri-n-dodecylamine/kerosene, *Periodica Polytechnica: Chemical Engineering, Chem. Eng.* 52 (2008) 23.
- K. Chakrabarty, P. Saha, A.K. Ghoshal, Simultaneous separation of mercury and lignosulfonate from aqueous solution using supported liquid membrane, *J. Membr. Sci.* 346 (2010) 37.
- L. Iberhan, M. Wisniewski, Extraction of arsenic(III) and arsenic(V) with Cyanex 925, Cyanex 301 and their mixtures, *Hydrometallurgy* 63 (2002) 23.
- L. Iberhan, M. Wisniewski, Removal of arsenic(III) and arsenic(V) from sulfuric acid solution by liquid-liquid extraction, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 78 (2003) 659.

- M. A. Congost, D. Salvatierra, G. Marquès, J. L. Bourdelande, J. Font, M. Valiente, A novel phosphine sulphide functionalized polymer for the selective separation of Pd(II) and Au(III) from base metals, *React. Funct. Polym.* 28 (1996) 191.
- M. B. Mansur, S. D. F. Rocha, F. S. Magalhães, J. D. S. Benedetto, Selective extraction of zinc(II) over iron(II) from spent hydrochloric acid pickling effluents by liquid-liquid extraction, *J. Hazard. Mat.* 150 (2008) 669.
- M. E. M. Perez, J. A. Reyes-Aguilera, T. I. Saucedo, M. P. Gonzalez, R. Navarro, M. Avila-Rodriguez, Study of As(V) transfer through a supported liquid membrane impregnated with trioctylphosphine oxide (Cyanex 921), *J. Membr. Sci.* 302 (2007) 119.
- M. Leermakers, W. Baeyens, M. De Gieter, B. Smedts, C. Meert, H.C. De Bisschop, R. Morabito, P. Quevauviller, Toxic arsenic compounds in environmental samples: speciation and validation, *TrAC Trends Anal. Chem.* 25 (2006) 1.
- M. Wisniewski, Extraction of arsenic from sulphuric acid solutions by Cyanex 923, *Hydrometallurgy* 46 (1997) 235.
- P. Ramakul, U. Pancharoen, Synergistic extraction and separation of mixture of lanthanum and neodymium by hollow fiber supported liquid membrane, *Korean J. Chem. Eng.* 20 (2003) 724.
- Q. Li, Q. Liu and X. Wei, Separation study of mercury through an emulsion liquid membrane, *Talanta* 43 (1996) 1837.
- R.S. Juang, R.T. Wu, Extraction of acetate from simulated waste solutions in chloromycetin production, *Sep. Purif. Technol.* 17 (1999) 225.
- S. G. Salgado, M. A. Q. Nieto, M. M. B. Simón, Assessment of total arsenic and arsenic species stability in alga samples and their aqueous extracts, *Talanta* 75 (2008) 897.
- S. Sangtumrong, P. Ramakul, C. Satayaprasert, U. Pancharoen, A.W. Lothongkum, Purely separation of mixture of mercury and arsenic via hollow fiber supported liquid membrane, *J. Ind. Eng. Chem.* 13 (2007) 751.
- T. Prapasawat, P. Ramakul, C. Satayaprasert, U. Pancharoen, A.W. Lothongkum, Separation of As(III) and As(V) by hollow fiber supported liquid membrane based on the mass transfer theory, *Korean J. Chem. Eng.* 25 (2008) 158.
- U. Pancharoen, S. Somboonpanya, S. Chaturabul, A.W. Lothongkum, Selective removal of mercury as HgCl_4^{2-} from natural gas well produced water by TOA via HFSLM, *J. Alloy Compd.* 489 (2010) 72.

U. Pancharoen, W. Poonkum, A.W. Lothongkum, Treatment of arsenic ions from produced water through hollow fiber supported liquid membrane, J. Alloy Compd. 482 (2009) 328.

X.J. Yang, A.G. Fane and C. Pin, Separation of zirconium and hafnium using hollow fibers part I. supported liquid membranes, Chem. Eng. J. 88 (2002) 37.

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณ

1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{[Metal\ ions\ in\ Feed]_{in} - [Metal\ ions\ in\ Raffinate]_{out}}{[Metal\ ions\ in\ Feed]_{in}} \times 100$$

จากข้อมูลความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารป้อนขาเข้า = 0.210 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารป้อนขาออก = 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ร้อยละการสกัด} = \frac{0.210 - 0.005}{0.210} \times 100$$

$$= 97.62$$

2 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการนำกลับ

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{[Metal\ ions\ in\ Stripping]_{out}}{[Metal\ ions\ in\ Feed]_{in}} \times 100$$

จากข้อมูลความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายนำกลับขาออก = 0.097 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารป้อนขาเข้า = 0.210 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ร้อยละการนำกลับ} = \frac{0.097}{0.210} \times 100$$

$$= 46.19$$

3 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่สมดุลของไอออนปรอท (Equilibrium Constant, $K_{ex,Hg}$)

จากปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทดังสมการที่ (A) และข้อมูลผลการทดลองที่สภาวะสารสกัดมี Aliquat 336 เข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร และ Cyanex 471 เข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร สามารถคำนวณค่าคงที่สมดุลของปรอทได้ดังนี้



$$K_{ex,Hg} = \frac{[(\text{NR}_4)_2 \cdot (\text{HgCl}_4) \cdot (\text{TIBPS})]}{[\text{HgCl}_4^{2-}][\text{NR}_4^+]^2[\text{TIBPS}]} \quad (\text{B})$$

วิธีการคำนวณค่าความเข้มข้นของสารแต่ละตัว

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของสารปรอทในสารป้อนเข้า} &= 1.21 \times 10^{-6} \text{ mol/l} \quad (0.243 \text{ mg/l}) \\ \text{ความเข้มข้นของสารปรอทในสารป้อนออก} &= 1.50 \times 10^{-7} \text{ mol/l} \quad (0.037 \text{ mg/l}) \\ \text{ความเข้มข้นของไอออนปรอทที่ใช้ไปในปฏิกิริยา} &= (\text{ขาเข้า} - \text{ขาออก}) \\ &= 1.21 \times 10^{-6} - 1.50 \times 10^{-7} \text{ mol/l} \\ &= 1.06 \times 10^{-6} \text{ mol/l} \end{aligned}$$

ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนที่ใช้ไปในปฏิกิริยาหรือความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน $(\text{NR}_4)_2 \cdot \text{HgCl}_4 \cdot \text{TIBPS}$ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอทมีค่าเท่ากับ 1.06×10^{-6} โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เวลาเริ่มต้นมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} [\text{HgCl}_4^{2-}] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนเข้า} \\ &= 0.243 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ &= 1.21 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\text{NR}_4^+] &= \text{ความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336} \\ &= 0.20 \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$[\text{TIBPS}] = \text{ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 471}$$

$$= 0.06 \text{ โมลต่อลิตร}$$

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่สมดุลมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} [\text{HgCl}_4^{2-}] &= \text{ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อนขาออก} \\ &= 0.030 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ &= 1.50 \times 10^{-7} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

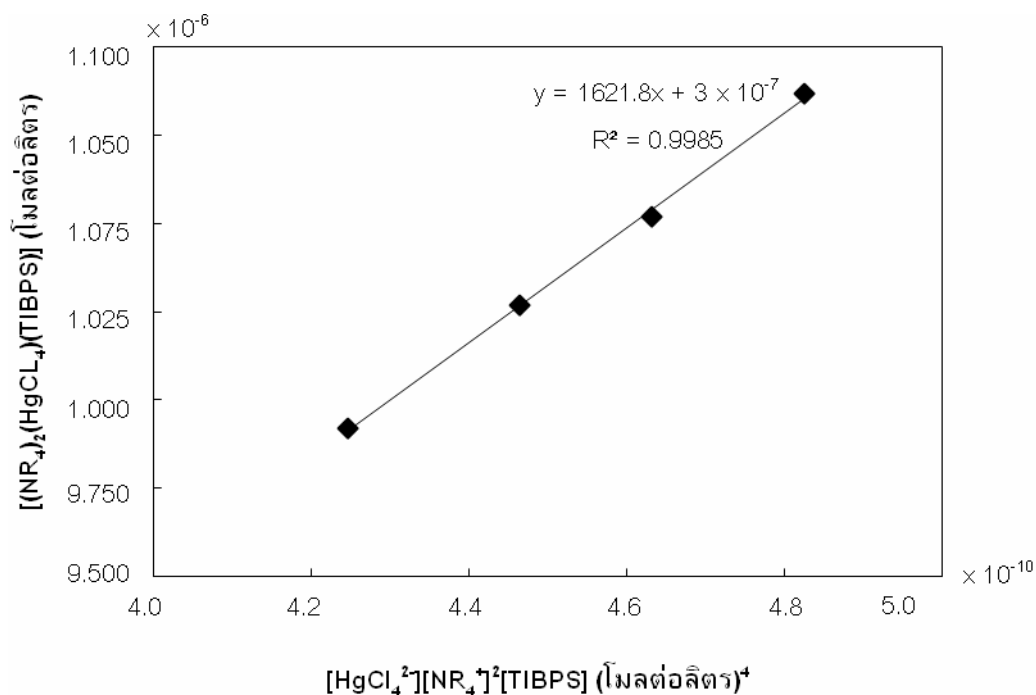
$$\begin{aligned} [\text{NR}_4^+] &= 0.20 - 2 \times 1.06 \times 10^{-6} \text{ (โมลต่อลิตร)} \\ &= 0.2199 \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\text{TIBPS}] &= 0.20 - 1.06 \times 10^{-6} \text{ (โมลต่อลิตร)} \\ &= 0.01999 \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } [\text{HgCl}_4^{2-}][\text{NR}_4^+]^2[\text{TIBPS}] &= (1.50 \times 10^{-6}) \times (0.2199)^2 \times (0.01999) \\ &= 1.44 \times 10^{-4} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\text{และ } [(\text{NR}_4)_2\text{HgCl}_4\text{TIBPS}] = 1.06 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร}$$

เมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $[\text{HgCl}_4^{2-}][\text{NR}_4^+]^2[\text{TIBPS}]$ กับ $[(\text{NR}_4)_2\text{HgCl}_4\text{TIBPS}]$ ที่สภาวะสมดุลที่ได้แสดงดังรูปที่ A



รูปที่ A ความสัมพันธ์ $[\text{HgCl}_4^{2-}][\text{NR}_4^+]^2[\text{TIBPS}]$ กับ $[(\text{NR}_4)_2\text{HgCl}_4\text{TIBPS}]$ ที่สภาวะสมดุล

จากรูปที่ A หาค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดไอออนปรอท ($K_{ex,Hg}$) ได้จากความสัมพันธ์ของกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.62×10^3 (ลิตรต่อโมล)³

4 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

จากข้อมูลที่สภาวะความเข้มข้นของสารสกัด Aliquat 336 เท่ากับ 0.20 โมลต่อลิตร สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนปรอทได้จากสมการ

$$D_{Hg} = \frac{[\text{ไอออนโลหะในสารละลายอินทรีย์ที่สภาวะสมดุล}]}{[\text{ไอออนโลหะในสารละลายป้อนที่สภาวะสมดุล}]} \quad (C)$$

$$\begin{aligned} \text{ไอออนโลหะในสารละลายป้อนที่สภาวะสมดุล} &= \text{ไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาออก} \\ &= 0.003 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ &= 1.496 \times 10^{-8} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาเข้า} &= 0.241 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \\ &= 1.201 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ไอออนโลหะในสารละลายอินทรีย์ที่สภาวะสมดุล} &= \text{ไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาเข้า} - \\ &\quad \text{ไอออนโลหะในสารละลายป้อนขาออก} \\ &= 1.201 \times 10^{-6} - 1.496 \times 10^{-8} \text{ (โมลต่อลิตร)} \\ &= 1.186 \times 10^{-6} \text{ โมลต่อลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นจากสมการ (C) จะได้

$$\begin{aligned} D_{Hg} &= \frac{1.186 \times 10^{-6}}{1.496 \times 10^{-8}} \\ &= 79.3 \end{aligned}$$