

จากที่ได้กล่าวข้อดีของระบบของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดยเฉพาะเรื่องของการถ่ายเทมวลในบทที่ 2 ดังนั้นในบทนี้จะอธิบายกลไกการถ่ายเทมวล (mass transport mechanism) แบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว ต่อจากนั้นจะอธิบายการถ่ายเทมวลแบบควบคู่และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยจะเน้นกรณีการถ่ายเทมวลแบบสวนทาง

3.1 กลไกการถ่ายเทมวล

กลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลว แบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน

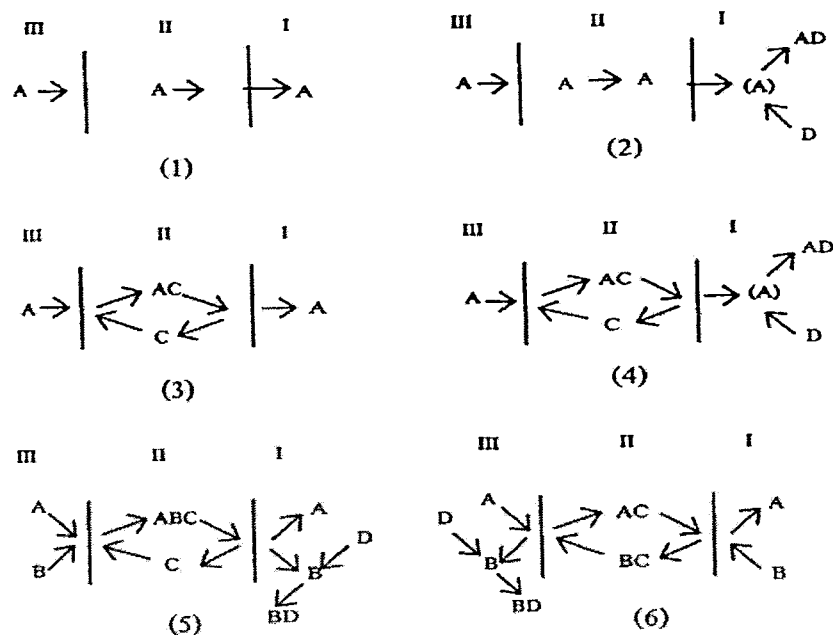
1. การแพร่ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนไปยังผิวของเยื่อแผ่นเหลว
2. การเกิดปฏิกิริยาของไอออนโลหะกับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว
3. การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลวผ่านเข้าสู่ภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
4. การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของสารประกอบเชิงซ้อนกลายเป็นไอออนโลหะและสารสกัดที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นเหลวและสารละลายนำกลับ
5. การแพร่ของไอออนโลหะจากผิวของเยื่อแผ่นเหลวไปยังสารละลายนำกลับ

ถ้ากำหนดให้การแพร่ผ่านสู่ภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนที่กำหนดการถ่ายเทมวล (rate determining step) แล้ว กลไกการถ่ายเทมวลแบบแพร่ซึมที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ดังนี้

3.1.1 การแพร่ซึมอย่างง่าย (Simple permeation)

การถ่ายเทมวลขององค์ประกอบที่ต้องการแยกจากวัฏภาคสารละลายป้อนไปสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับจะอาศัยการแพร่ซึมของสารละลาย ทั้งนี้ต้องพิจารณาความสามารถในการละลายขององค์ประกอบที่ต้องการแยก ในกรณีนี้หากสมมติให้ (A) เป็นองค์ประกอบที่ต้องการแยกและสามารถละลายได้ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว การแพร่ซึมของมวลสารจะเริ่มขึ้นเมื่อองค์ประกอบ (A) ซึ่งละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนถ่ายเทไปยังผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อน

กับวิทยาการเชื่อมต่อแผ่นเหลว และจะแพร่ซึมผ่านชั้นวิทยาการเชื่อมต่อแผ่นเหลวไปสู่ด้านที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างวิทยาการเชื่อมต่อแผ่นเหลวกับวิทยาการสารละลายนำกลับ โดยมีผลต่างความเข้มข้นขององค์ประกอบ (A) เป็นแรงขับเคลื่อน (driving force) จากนั้นองค์ประกอบ (A) จึงแพร่ไปสู่สารละลายนำกลับ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (1)



รูปที่ 3.1 กลไกการถ่ายเทมวลแบบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมต่อแผ่นเหลว

I หมายถึง วิทยาการสารละลายนำกลับ

II หมายถึง วิทยาการเชื่อมต่อแผ่นเหลว

III หมายถึง วิทยาการสารละลายป้อน

หากพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในเชิงวิศวกรรมเคมี เราจะพบว่า

- กลไกชนิดที่ 1 ไม่ได้รับความสนใจ เพราะขาดประสิทธิภาพ
- กลไกชนิดที่ 2 เหมาะสำหรับใช้แยกไฮโดรคาร์บอนออกจากน้ำเสีย
- กลไกชนิดที่ 3 และ 4 มีใช้ในกรณีเฉพาะ
- กลไกชนิดที่ 5 และ 6 ได้รับความสนใจอย่างมาก เช่น ใช้ในระบบการนำไอออนโลหะจากน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่และกระบวนการสกัดโลหะด้วย



3.1.2 การแพร่ซึมอย่างง่ายและเกิดปฏิกิริยาเคมี

(Simple permeation with chemical reaction)

การแพร่ซึมแบบนี้คล้ายคลึงกับแบบแรก องค์ประกอบ (A) ที่ละลายในวัสดุภาวสารละลายป้อนจะแพร่ซึมผ่านวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวไปอีกด้านที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวกับวัสดุภาวสารละลายนำกลับ โดยมีผลต่างความเข้มข้นขององค์ประกอบ (A) เป็นแรงขับเคลื่อน และที่ผิวสัมผัสนี้ องค์ประกอบ (A) จะละลายในวัสดุภาวสารละลายนำกลับ จุดนี้แตกต่างไปจากการแพร่ซึมอย่างง่าย เพราะองค์ประกอบ (A) จะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ (D) ซึ่งละลายอยู่ในวัสดุภาวสารละลายนำกลับ เกิดเป็นสารประกอบ (AD) ที่ไม่สามารถละลายได้ในวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลว ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (2) ดังนั้นการทำให้องค์ประกอบ (A) อยู่ในรูปสารประกอบ (AD) ในวัสดุภาวสารละลายนำกลับและไม่สามารถละลายได้ในวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลว ส่งผลให้ “ผลต่างของความเข้มข้น” ขององค์ประกอบ (A) ที่เป็นแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลมีค่าสูงอยู่ตลอดเวลา กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้ประยุกต์ใช้ในการแยกฟีนอลออกจากน้ำทิ้ง แต่การประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังเป็นเรื่องยาก เนื่องจากต้องใช้เวลาอันยาวนานเพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นสุดท้ายตามที่ต้องการและมีปัญหาการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

3.1.3 การแพร่ซึมอย่างง่ายที่มีสารสัค

(Simple carrier transport)

สารสัคที่ละลายในวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวจะช่วยให้การสัคดีขึ้น และอัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้น สารสัคนี้จะละลายได้เฉพาะในวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวและสามารถทำปฏิกิริยาแบบผันกลับ (reverse reaction) ได้ กลไกการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 3.1 (3) คือ องค์ประกอบ (A) ซึ่งละลายอยู่ในวัสดุภาวสารละลายป้อนจะแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาวสารละลายป้อนกับวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลว ที่ผิวสัมผัสนี้ สารสัค (C) ซึ่งละลายอยู่ในวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ (A) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (AC) ผลต่างของความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน (AC) จะเป็นแรงขับเคลื่อนให้สารประกอบเชิงซ้อน (AC) เกิดการแพร่ซึมผ่านวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวจากด้านผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาวสารละลายป้อนกับวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวไปด้านผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวกับวัสดุภาวสารละลายนำกลับ และที่ผิวสัมผัสด้านนี้เอง สารประกอบเชิงซ้อน (AC) จะแตกตัวทำให้องค์ประกอบ (A) หลุดไปสู่วัสดุภาวสารละลายนำกลับ ส่วนสารสัค (C) จะแพร่ซึมย้อนกลับไปยังผิวสัมผัสแรกคือผิวสัมผัสระหว่างวัสดุภาวสารละลายป้อนกับวัสดุภาวเยื่อแผ่นเหลวเพื่อทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ (A) อีก

เนื่องจากสารสกัด (C) ช่วยให้องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ละลายได้ดีขึ้นในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล ดังนั้นการถ่ายเทมวลจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นขององค์ประกอบ (A) เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารสกัด (C) ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวด้วย ข้อจำกัดของกลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้ คือ กระบวนการถ่ายเทมวลจะหยุดเมื่อความเข้มข้นขององค์ประกอบ (A) ทั้งสองฝั่งของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้การแยกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบให้มีหลายขั้นตอน

3.1.4 การแพร่ซึมอย่างง่ายที่มีสารสกัดและปฏิกิริยาเคมี

(Simple carrier transport with chemical reaction)

กลไกการถ่ายเทมวลแบบนี้แสดงในรูปที่ 3.1 (4) องค์ประกอบที่ต้องการแยก (A) ซึ่งละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนแพร่ไปที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และที่ผิวสัมผัสนี้สารสกัด (C) ที่ละลายอยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบ (A) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (AC) จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อน (AC) จะแพร่ซึมผ่านชั้นวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวโดยอาศัยผลจากความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อน (AC) เป็นแรงขับเคลื่อนไปยังผิวสัมผัสอีกด้านคือระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ และที่ผิวสัมผัสด้านนี้สารประกอบเชิงซ้อน (AC) จะแตกตัวทำให้องค์ประกอบ (A) หลุดไปสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับซึ่งมีองค์ประกอบ (D) ละลายอยู่และจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบ (AD) ซึ่งไม่ละลายในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ดังนั้นจึงสามารถลดความเข้มข้นขององค์ประกอบ (A) ในฝั่งวัฏภาคสารละลายป้อนได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับกลไกการถ่ายเทมวลแบบการแพร่ซึมอย่างง่าย

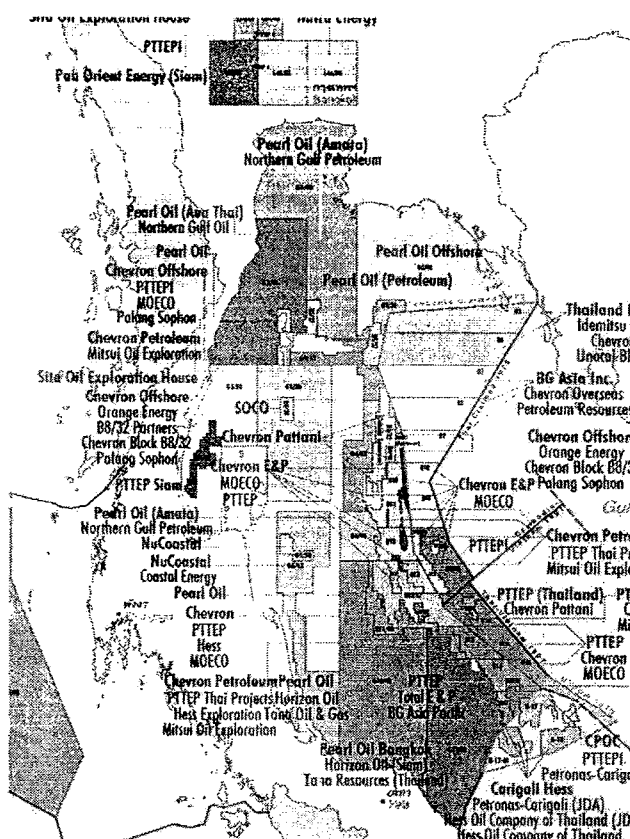
3.2 การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การอธิบายในหัวข้อนี้จะอธิบายในรูปแบบของกรณีศึกษาของการแยกสารหนูและปรอทจากน้ำทิ้งที่ติดขึ้นมากับการขุดเจาะน้ำมันดิบ/ก๊าซธรรมชาติ บริเวณแหล่งปิโตรเลียมจากอ่าวไทย เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ

โดยทั่วไปในแหล่งปิโตรเลียมจะมีสารหนูและปรอทปะปนอยู่ในปริมาณน้อยมาก แต่ในบริเวณอ่าวไทยกลับมีปริมาณสารหนูและปรอทในระดับความเข้มข้นที่สูงกว่าแหล่งอื่นๆ ของโลก จึงเกิดความสนใจที่จะศึกษา และจากสมมติฐานต่างๆ ชี้ให้เห็นว่าแหล่งกำเนิดของสารหนูและปรอทมักพบในแหล่งปิโตรเลียม ซึ่งส่วนใหญ่จะพบปรอทในรูปของธาตุปรอท ($\text{Hg}(0)$) ส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ (HgCl_2) และสารอินทรีย์ (CH_3HgCH_3 และ $\text{C}_2\text{H}_5\text{HgC}_2\text{H}_5$) สำหรับสารหนูจะอยู่ในรูปของ As(III) และ As(V) โดย As(III) จะอยู่ในรูป H_3AsO_3 แต่ As(V)

จะอยู่ในรูปของ $H_2AsO_4^-$ หรือ $HASeO_4^{2-}$ นอกจากนี้สารหนูและปรอทถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่มีพิษร้ายแรง เนื่องจากสารประกอบของสารหนูเป็นสารก่อมะเร็งโดยพิษของสารหนูนั้นมีทั้งแบบจับพันธะและแบบรื้อรัง ส่วนปรอทหากได้รับในระยะสั้นจะส่งผลให้ไตถูกทำลาย และถ้าได้รับพิษในระยะยาวจะทำให้ระบบ ถูกทำลายด้วยเช่นกัน

ในปัจจุบันการผลิตปิโตรเลียมจากอ่าวไทยได้ถูกพัฒนาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งานทางด้านพลังงานภายในประเทศที่เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการร่วมมือกันระหว่างบริษัทขุดเจาะน้ำมันในระดับโลกกับบริษัทการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย โดยได้มีการแบ่งสัมปทานกันดังรูปที่ 3.2 จากรูปเป็นการแบ่งสัมปทานในปี 2009 โดยผลผลิตที่ได้ต่อวันจากหลุมขุดเจาะบริเวณอ่าวไทยนี้สูงถึง 680.000 บาร์เรลต่อวัน ส่งผลให้เกิดน้ำทิ้งจากกระบวนการขุดเจาะเป็นปริมาณมาก นอกจากนี้แนวโน้มของปริมาณน้ำทิ้งจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการพัฒนากระบวนการขุดเจาะนั่นเอง



รูปที่ 3.2 แผนที่สัมปทานการขุดเจาะน้ำมันในอ่าวไทย (DMF, 2010)

เพื่อจัดการกับน้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะปิโตรเลียมที่เกิดขึ้นในปริมาณมากต่อวัน บริษัทขุดเจาะน้ำมันจึงได้ทำการฉีดน้ำทิ้งกลับลงไปยังหลุมเก่าที่ไม่มีปิโตรเลียมหลงเหลืออยู่แล้ว อย่างไรก็ตามการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่ทะเลก็ยังเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ หากการฉีดน้ำกลับไปยังหลุมเก่าเกิด

ข้อบกพร่องขึ้น หรือโครงสร้างของหลุมเก่าไม่สามารถรองรับน้ำทิ้งในปริมาณมากได้ จากปัญหาเหล่านี้ได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ใต้ท้องทะเล นอกจากนี้ทางกระทรวงอุตสาหกรรม และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้กำหนดให้ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะต้องมีค่าปนเปื้อนของสารหนูและปรอทที่ไม่เกิน 250 และ 5 ppb ตามลำดับ

สำหรับวิธีการต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งนั้น พบว่ามีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ การตกตะกอน, อิเล็กโทรไลซิส, รีเวิร์สออสโมซิส, การดูดซับด้วยคาร์บอน, การกรอง, การสกัดด้วยตัวทำละลาย และการแลกเปลี่ยนไอออน ถึงกระนั้นวิธีการเหล่านี้ยังไม่สามารถกำจัดโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตามการตกตะกอนก็ยังเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดซึ่งกระบวนการนี้จะมีการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกเกิดการตกตะกอน แล้วจึงกรองเอาตะกอนออกไป ส่วนการดูดซับก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นอกเหนือจากวิธีการตกตะกอน แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการแยก เนื่องจากวิธีนี้สามารถแยกปรอทออกได้เพียงชนิดเดียว ไม่สามารถแยกสารหนูออกมาได้ในกรณีที่มีทั้งสารหนูและปรอทปนเปื้อนมาด้วยกัน

บริษัทเซฟรอนเป็นบริษัทน้ำมันชั้นนำที่ได้สัมปทานในอ่าวไทย และทำหน้าที่ควบคุมตลอดจนบำบัดน้ำทิ้งให้ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด แต่อย่างไรก็ตามปริมาณไอออนสารหนูและปรอทที่วัดค่าได้ยังเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ ส่วนการใช้สารเคมีในการบำบัด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์และเฟอริกออกไซด์นั้น พบว่ายังมีปัญหาต่อการกัดกร่อนท่อโลหะที่อยู่ในหลุมขุดเจาะ ซึ่งวิธีแก้ไขจะต้องใช้วัสดุที่ทนการกัดกร่อนได้ดีโดยการใช้โลหะผสมที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ราคาที่ใช้ดำเนินการจะค่อนข้างสูงมาก

เพื่อจัดการกับปัญหาต่างๆ เหล่านี้ ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจึงได้รับความสนใจที่จะศึกษาเพื่อนำไปใช้แยกไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด และเพื่อทดแทนวิธีแยกแบบเดิมที่ไม่สามารถแยกไอออนโลหะในระดับความเข้มข้นต่ำๆ ได้ แต่ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงสามารถแยกไอออนสารหนูและปรอทที่ความเข้มข้นต่ำกว่าระดับ ppm ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าจะใช้สารสกัดเพียงชนิดเดียวหรือการใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ก็ตาม

3.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ในเรื่องราวของเยื่อแผ่นเหลวได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 2 แต่ในหัวข้อนี้จะเน้นเฉพาะเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

สารสกัดอินทรีย์ได้ถูกนำมาใช้เป็นเยื่อแผ่นเหลว โดยจะถูกฝังลงไปในรูพรุนของเส้นใยกลวงที่ผลิตจากวัสดุชนิดไม่ชอบน้ำ เพื่อทำหน้าที่สกัดองค์ประกอบที่ต้องการให้แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวออกไป และในขณะเดียวกันยังได้ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้องค์ประกอบอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ

แพร่ผ่านออกไปอีกด้วย ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีกว่าวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย เพราะองค์ประกอบที่ต้องการสกัดจะสามารถกระจายตัวได้ดี จึงสามารถถ่ายเทมวลได้สูง นอกจากนี้ระบบเยื่อแผ่นเหลวยังสามารถปรับอัตราการไหลได้โดยปราศจากปัญหาเรื่องการอุดตัน การล้น และการเกิดช่องว่าง

สำหรับระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งอยู่ในบทที่ 2 โดยระบบประกอบด้วยวัฏภาคสารละลายป้อน วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และวัฏภาคสารละลายนำกลับ ซึ่งวัฏภาคสารละลายป้อนจะมีองค์ประกอบที่ต้องการสกัดและองค์ประกอบอื่นๆ ละลายอยู่ ส่วนวัฏภาคสารละลายนำกลับจะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับองค์ประกอบที่ต้องการสกัดจากวัฏภาคสารละลายป้อนที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวออกมา จึงทำให้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางโดดเด่นในเรื่องของการสกัด การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลว และการนำกลับ เนื่องจากสามารถทำการสกัดและนำกลับได้ในขั้นตอนเดียวกัน

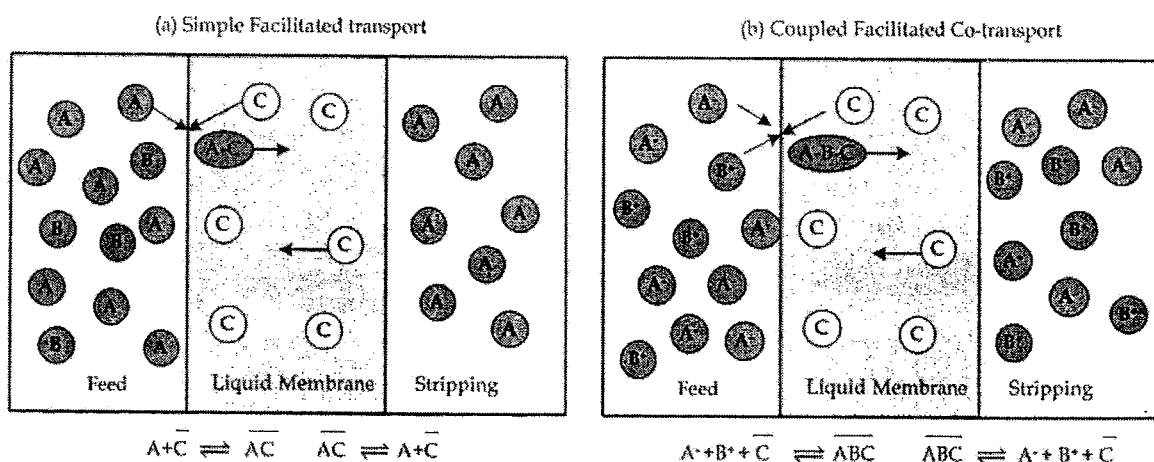
เยื่อแผ่นเหลวที่ใช้งานอยู่ทั่วไปนั้นพบว่ามีหลายรูปแบบด้วยกัน ได้แก่ แบบปั่นกววนแบบอิมัลชัน และแบบที่พุงด้วยตัวรองรับ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป อย่างเช่น เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววนสามารถเตรียมและดำเนินการได้ง่าย แต่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย ส่วนเยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชันจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก แต่มีความเสถียรของเยื่อแผ่นน้อย สำหรับเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก มีอัตราการถ่ายเทมวลและมีความเสถียรค่อนข้างสูง จึงทำให้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับได้รับความสนใจจากภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับยังมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับระบบที่มีลักษณะการไหลแบบต่อเนื่อง และได้รับความนิยมจากทั่วโลกในการนำไปสกัดไอออนโลหะต่างๆ ออกจากน้ำทิ้ง เช่น นิกเกิล ยูเรเนียม โคโรเนียม และทองแดง เป็นต้น

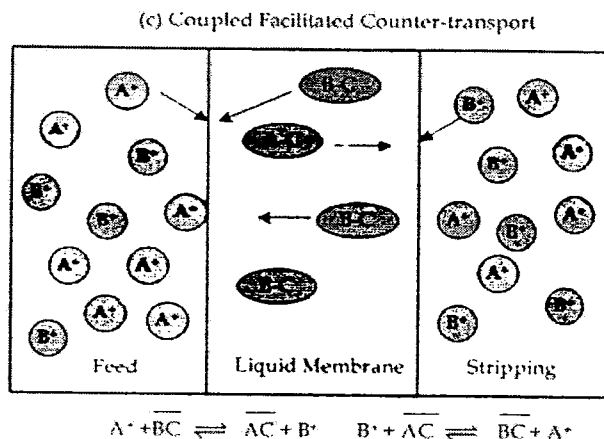
3.2.2 การแพร่ซึมผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง

ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางได้ถูกสร้างให้วัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับแยกออกจากกันด้วยการกั้นของสารสกัดที่อยู่ในรูพรุนของเส้นใยกลาง โดยองค์ประกอบที่ต้องการสกัดจะทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว จากนั้นสารประกอบเชิงซ้อนจะแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปทำปฏิกิริยาซ้อนกลับกับสารละลายนำกลับที่บริเวณผิวสัมผัสอีกฝั่งของเยื่อแผ่นเหลว ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการสกัดถูกปล่อยเข้าสู่วัฏภาคสารละลายนำกลับตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสกัดและนำกลับองค์ประกอบที่ต้องการได้ในขั้นตอนเดียว และอัตราการถ่ายเทมวลได้ถูกขับเคลื่อนจากผลต่างความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการสกัดที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ ซึ่งปรากฏการณ์ของการแพร่ผ่านนี้สามารถแบ่งออกเป็นการ

ถ่ายเทมวลแบบง่าย (simple facilitated transport) หรือการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (coupled facilitated transport) โดยการถ่ายเทแบบง่ายจะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีองค์ประกอบอื่นๆ ที่ไม่ต้องการละลายอยู่ หรือเหมาะกับการสกัดองค์ประกอบที่เป็นกลาง ในขณะที่การสกัดไอออนมักจะเป็นการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ จากแรงขับเคลื่อนที่ขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของไอออนร่วม (co-ion) ที่อยู่ในสารละลายป้อน

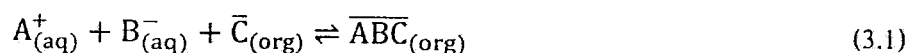
สำหรับการถ่ายเทมวลของแต่ละรูปแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดย (A) คือ องค์ประกอบที่ต้องการสกัด (B) คือ ไอออนร่วม (C) คือ สารสกัดอินทรีย์ และ $\overline{AC}$ หรือ $\overline{BC}$ หรือ $\overline{ABC}$ คือ สารประกอบเชิงซ้อน ส่วนในงานของเรานี้ องค์ประกอบที่ต้องการสกัดคือ ไอออนสารหนู และปรอท จากรูปที่ 3.3 โดยกลไกการถ่ายเทมวลแบบง่ายแสดงได้ดังรูปที่ 3.3(a) ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน ($\overline{AC}$) เกิดจากการทำปฏิกิริยาขององค์ประกอบ (A) กับ (C) จากนั้น ($\overline{AC}$) จะทำปฏิกิริยาย้อนกลับที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายนำกลับ แล้วองค์ประกอบ (A) จะถูกปล่อยเข้าไปในวัฏภาคสารละลายนำกลับ ส่วนการถ่ายเทมวลแบบควบคู่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบถ่ายเทไปในทิศทางเดียวกัน (รูปที่ 3.3(b)) และแบบถ่ายเทในทิศทางสวนกัน (รูปที่ 3.3(c)) ในส่วนของการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ในทิศทางเดียวกันนั้น สารสกัดจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่ต้องการสกัด (A) และไอออนร่วม (B) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($\overline{ABC}$) แล้วแพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวไปยังบริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายนำกลับ เพื่อทำการนำกลับองค์ประกอบที่ต้องการสกัดและไอออนร่วม ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นการถ่ายเทมวลไปในทิศทางเดียวกันขององค์ประกอบที่ต้องการสกัดกับไอออนร่วมที่แพร่ผ่านจากวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับนั่นเอง ซึ่งมักจะเป็นการสกัดของสารสกัดชนิดกลางและสารสกัดชนิดเบส โดยปฏิกิริยาการสกัดขององค์ประกอบที่ต้องการกับสารสกัดชนิดกลางแสดงได้ดังสมการที่ (3.1) และปฏิกิริยาการสกัดขององค์ประกอบที่ต้องการกับสารสกัดชนิดเบสแสดงได้ดังสมการที่ (3.2) ตามลำดับ



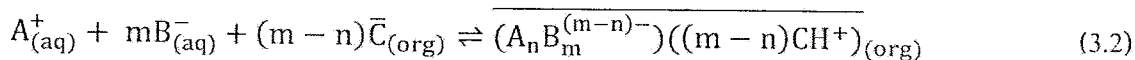


รูปที่ 3.3 รูปแบบการถ่ายเทมวลในระบบเยื่อแผ่นเหลว (Bringas et al., 2009)

การถ่ายเทมวลแบบควบคุมในทิศทางเดียวกัน: ในกรณีใช้สารสกัดชนิดกลาง

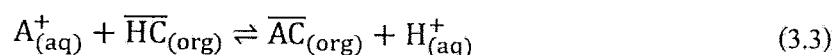


การถ่ายเทมวลแบบควบคุมในทิศทางเดียวกัน: ในกรณีใช้สารสกัดชนิดเบส



ในส่วนของการถ่ายเทมวลแบบควบคุมในทิศทางสวนกันจะเป็นกลไกที่ตรงข้ามกับการถ่ายเทมวลแบบไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งไอออนร่วม (B) จะถูกถ่ายเทจากวัฏภาคสารละลายนำกลับไปยังวัฏภาคสารละลายป้อน จึงสวนทางกับองค์ประกอบที่ต้องการสกัด (A) โดยกลไกจะเริ่มจากการทำปฏิกิริยาขององค์ประกอบ (A) กับสารสกัดที่อยู่ในรูปของสารประกอบ ($\overline{BC}$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($\overline{AC}$) จากนั้นจึงถ่ายเทไปยังบริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายนำกลับ ซึ่งองค์ประกอบ (A) จะถูกปล่อยเข้าไปในสารละลายนำกลับ ในขณะที่ไอออนร่วม (B) จะถ่ายเทสวนกลับจากสารละลายนำกลับมาพร้อมกับสารสกัด โดยการถ่ายเทมวลแบบสวนทางนี้มักจะเป็นการสกัดของการใช้สารสกัดชนิดกรด และปฏิกิริยาการสกัดแสดงได้ดังสมการที่ (3.3)

การถ่ายเทมวลแบบควบคุมในทิศทางสวนกัน: ในกรณีใช้สารสกัดชนิดกรด



โดยที่ H^+ คือ ไฮโดรเนียมไอออน

แรงขับเคลื่อนในการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวของการถ่ายเทมวลแบบควบคู่เกิดจากผลต่างความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการสกัดหรือผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน สำหรับงานวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยแยกมวลเป็นการศึกษาการถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งที่ระดับความเข้มข้นต่ำๆ ด้วยกลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่และมีผลต่างความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการสกัดเป็นแรงขับเคลื่อน

นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งอธิบายถึงลักษณะการทำงานของระบบเยื่อแผ่นเหลวสามารถแสดงได้ในเทอมของค่าเปอร์เซ็นต์การสกัด ค่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับ และค่าอัตราการกระจายหรือสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution ratio or Distribution coefficient, D) โดยเปอร์เซ็นต์การสกัดจะเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณขององค์ประกอบที่ต้องการถูกสกัดออกไป ซึ่งในงานนี้จะพิจารณาปริมาณของไอออนสารหนูและปรอทที่ถูกสกัดออกจากน้ำทิ้ง ส่วนเปอร์เซ็นต์การนำกลับจะแสดงให้เห็นถึงปริมาณขององค์ประกอบที่ถูกสกัดแล้วถ่ายเทผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปอยู่ในวัฏภาคน้ำละลายนำกลับ และค่าอัตราการกระจายจะบอกถึงปริมาณขององค์ประกอบที่ต้องการสกัดที่ถูกถ่ายเทไปยังวัฏภาคต่อไป ซึ่งคำนวณได้จากค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการสกัดที่อยู่ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวหารด้วยค่าความเข้มข้นของมันที่อยู่ในวัฏภาคน้ำละลายป้อน และเพื่อความเข้าใจพารามิเตอร์ทั้งสามสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.4)-(3.6)

$$\% \text{ การสกัด (Extraction)} = \frac{(C_{fo}-C_f)}{C_f} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\% \text{ การนำกลับ(Stripping)} = \frac{C_s}{C_{fo}} \times 100 \quad (3.5)$$

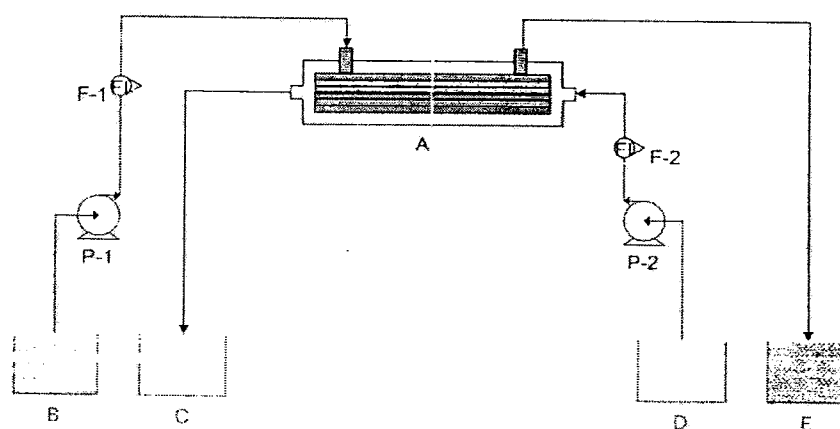
$$\text{อัตราการกระจาย (Distribution rate)} = \frac{C_m}{C_{aq}} \quad (3.6)$$

3.2.3 การเตรียมและการดำเนินการของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงประกอบด้วยเกียร์ปั๊มจำนวน 2 เครื่อง, เครื่องควบคุมอัตราการไหลจำนวน 2 เครื่อง, โรตารีเมเตอร์จำนวน 2 เครื่อง และเครื่องวัดความดันจำนวน 4 เครื่อง ส่วนมอดูลเส้นใยกลวงเป็นของ Celgard® โดยเส้นใยกลวงผลิตจากวัสดุพอลิโพรไพลีนและมีรูพรุนขนาดไมโคร แล้วถูกมัดรวมกันอยู่ในท่อมอดูล ส่วนคุณสมบัติต่างๆ ของมอดูลเส้นใยกลวงได้แสดงไว้แล้วในบทที่ 2 ตารางที่ 2.1

ส่วนการจัดการระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยสารสกัดจะถูกป้อนให้ไหลวนในด้านท่อและเปลือกของมอดูลเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 20 นาที

เพื่อให้แน่ใจว่าสารสกัดได้แพร่ซึมเข้าไปอยู่ในรูพรุนของเส้นใยกลวง จากนั้นจึงป้อนสารละลายป้อนหรือน้ำทิ้งและสารละลายนำกลับเข้าไปในฝั่งท่อและฝั่งเปลือกของมอดูลในทิศทางที่สวนกันตามลำดับและเก็บตัวอย่างเป็นปริมาตรละ 10 มิลลิลิตรจากสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ หลังจากทำการสกัดแต่ละรอบเสร็จ (ประมาณ 40 นาทีต่อรอบ) แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนสารหนูและปรอทด้วยเครื่อง inductively coupled plasma spectroscopy (ICP)



รูปที่ 3.4 ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงที่ดำเนินระบบแบบไหลสวนทาง โดย A คือ เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง, B คือ ถังใส่สารละลายป้อนขาเข้า, C คือ ถังใส่สารละลายนำกลับขาออก, D คือ ถังใส่สารละลายนำกลับขาเข้า และ E คือ ถังใส่สารละลายป้อนขาออก

3.3 กลไกการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

การถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเป็นผลรวมของการถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูและปรอทจากวัฏภาคสารละลายป้อน ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ไปยังวัฏภาคสารละลายนำกลับ ซึ่งแรงขับเคลื่อนสามารถเกิดจากผลต่างความเข้มข้นของ ไอออนสารหนูและปรอทหรือผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออน

ในทางวิศวกรรมนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient, k) ถูกนำมาพิจารณาเพื่อหาปริมาณของมวลที่ถูกถ่ายเทไปในระหว่างวัฏภาค โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจะเป็นค่าคงที่ ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทมวล พื้นที่ในการถ่ายเทมวล และผลต่างความเข้มข้นของมวลที่ถูกถ่ายเท สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูหรือปรอทที่แพร่ผ่านเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (permeability coefficient, P)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานในการถ่ายเทมวล (mass transfer resistance) ที่เป็นส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลดังแสดงในสมการที่ (3.7a)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_f} + \frac{r_i}{r_{lm}} \cdot \frac{1}{Dk_m} + \frac{r_i}{r_o} \cdot \frac{1}{k_s} \quad (3.7a)$$

$$\text{เมื่อ} \quad r_{lm} = \frac{r_o - r_i}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (3.7b)$$

$$\text{และ} \quad k_m = \frac{\varepsilon D_m}{\tau r_i \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (3.8)$$

โดยค่าความต้านทานในการถ่ายเทมวลของทั้งสามเทอมในสมการที่ (3.7) นั้นเป็นไปตามกลไกการถ่ายเทมวลทั้งสามวิธีกาของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งค่าความต้านทานแรกเป็นค่าความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ผ่านของไอออนสารหนูและปรอทไปยังบริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งวัสดุละลายป้อน ส่วนค่าความต้านทานที่สองเป็นค่าความต้านทานที่เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนของสารหนูหรือปรอทแพร่ผ่านวิธีกาเยื่อแผ่นเหลว และค่าความต้านทานที่สามเป็นค่าความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ผ่านบริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายนำกลับ แต่ค่าความต้านทานที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายนำกลับนี้จะไม่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัสดุละลายนำกลับ (k_s) มีค่ามากกว่าในวัสดุละลายป้อน (k_f) ซึ่งขึ้นกับสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ชั้นฟิล์มที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายป้อนหนากว่าชั้นฟิล์มที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายนำกลับ เนื่องจากไอออนของสารหนูหรือปรอท และไอออนรวมจะรวมตัวกันอย่างหนาแน่นที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายป้อน ในขณะที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายนำกลับจะมีไอออนของสารนำกลับและไอออนของสารหนูหรือปรอทรวมตัวกันอย่างเบาๆ ดังนั้นค่าความหนาของชั้นฟิล์มที่บริเวณผิวสัมผัสของทั้งสองวิธีกาจึงมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลดังแสดงในสมการที่ (3.10) และจากสมการจึงสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัสดุละลายป้อนจะมีค่าน้อยกว่าในวัสดุละลายนำกลับ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน

$$k_f = \frac{E}{l_{if}} \quad (3.9)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ

$$k_s = \frac{D}{l_{is}} \quad (3.10)$$

ผลต่างความเข้มข้นของไอออนสารหนูหรือปรอทในสารละลายป้อน (C_f) กับบริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายป้อน (C_f^*) มีค่าสูงกว่าผลต่างที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายนำกลับ (C_s^*) กับในเยื่อแผ่นเหลว (C_s) และเมื่อค่าฟลักซ์ของทั้งสองวัฏภาคเท่ากันดังแสดงในสมการที่ (3.11) จึงทำให้ค่า " k_f " มีค่าน้อยกว่าค่า " k_s "

$$J = k_f(C_f - C_f^*) = k_s(C_s^* - C_s) \quad (3.11)$$

- มีเพียงไฮโดรเนียมไอออนเท่านั้นที่ถูกใช้ในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ และสามารถสัมผัสกับเยื่อแผ่นเหลวได้โดยตรง จึงเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าความต้านทานในเทอมที่สามของสมการที่ (3.7) ไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจึงหาได้จากสมการที่ (3.12)

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_f} + \frac{r_i}{r_{lm}} \cdot \frac{1}{Dk_m} \quad (3.12)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านสามารถหาได้จากสมการของ Danesi ดังแสดงในสมการที่ (3.13)

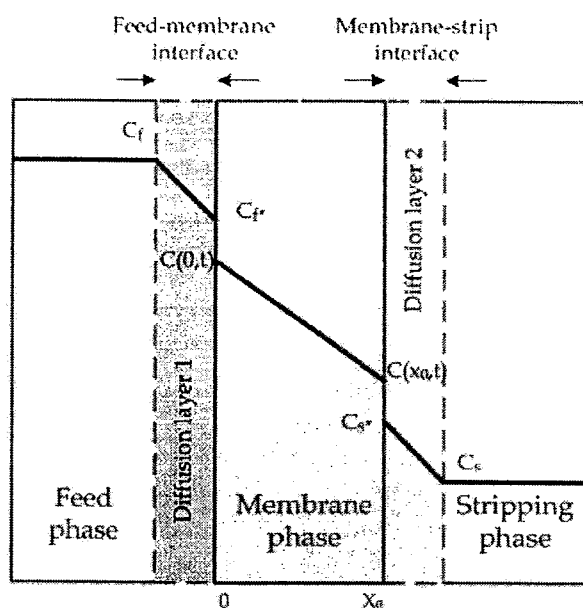
$$-V_f \ln \left(\frac{C_f}{C_{fo}} \right) = AP \frac{\beta}{\beta+1} t \quad (3.13)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \beta = \frac{Q_f}{PL\epsilon\pi N r_i} \quad (3.14)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านคำนวณได้จากค่าความชันของเส้นกราฟที่พล็อตระหว่างค่า $-V_f \ln \left(\frac{C_f}{C_{fo}} \right)$ กับ t

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้อธิบายกลไกการถ่ายเทมวลผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเพื่อให้เข้าใจระบบมากขึ้นและเพื่อทำนายพฤติกรรมของระบบภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันไป และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ยอมรับว่าถูกต้องแล้วจะนำไปใช้ในการพัฒนาระบบสำหรับประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้พัฒนามาจากนักวิจัยหลายคน ได้แก่ แบบจำลองการแพร่ผ่าน (diffusion model) แบบจำลองการไหลในท่อ (plug flow model) และแบบจำลองด้วยการพล็อตกราฟ (graphical model) ซึ่งในกลุ่มงานวิจัยของเราได้สนใจศึกษาแบบจำลองการแพร่ผ่านที่ได้นำเสนอไว้ในงานของ Huang ด้วยกฎของฟิค (Fick's Law) ตามสมมติฐานด้านล่างนี้

1. ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลเทียม (Pseudo steady state) จึงทำให้ค่าอุณหภูมิและค่าคุณสมบัติทางกายภาพคงที่
2. ไม่มีการแพร่ซึมของเยื่อแผ่นเหลวไปยังวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายน้ำกลับ
3. ปริมาณของเยื่อแผ่นเหลวไม่ถูกนำมาพิจารณาเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับ
4. อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับเกิดขึ้นเร็วมากจนสามารถมองข้ามความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาได้



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการถ่ายเทมวลด้วยแบบจำลองการแพร่ผ่านของ Huang

การถ่ายเทมวลในแต่ละชั้นตอนสามารถอธิบายได้ด้วยการแพร่ผ่านจากกฎของฟิค ซึ่งแสดงได้ดังนี้

1. องค์ประกอบที่ต้องการสกัดแพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

$$J_f = k_f(C_f - C_f^*) \quad (3.15)$$

2. องค์ประกอบที่ต้องการสกัดทำปฏิกิริยากับสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

$$J_{r1} = k_1 C_f^* - k_{-1} C_{(0,t)} \quad (3.16)$$

3. สารประกอบเชิงซ้อนแพร่ผ่านวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวไปยังบริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งวัฏภาคสารละลายนำกลับ

$$J_{m1} = -D_e \frac{\partial C_{(0,t)}}{\partial x} \quad (3.17)$$

$$J_{m2} = -D_e \frac{\partial C_{(x_0,t)}}{\partial x} \quad (3.18)$$

สารประกอบเชิงซ้อนเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งวัฏภาคสารละลายนำกลับ ซึ่งจะทำให้องค์ประกอบที่ต้องการสกัดถูกปลดปล่อยเพื่อที่จะแพร่ผ่านไป

1. ในวัฏภาคสารละลายนำกลับ ในขณะที่เดียวกันสารสกัดแพร่ย้อนกลับมายังวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

$$J_{r2} = k_{-2} C_{(x_0,t)} - k_2 C_s^* \quad (3.19)$$

2. องค์ประกอบที่ต้องการสกัดแพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายนำกลับ และถูกนำกลับไปอยู่ในวัฏภาคสารละลายนำกลับ

$$J_s = k_s(C_s^* - C_s) \quad (3.20)$$

เมื่อ k_f และ k_s หาค่าจากสมการที่ (3.7)

D_e คือ ค่า effective diffusivity ที่หาได้จากความสัมพันธ์ของ Wilke-Chang ดังแสดงในสมการที่ (3.21)

$$D_e = \frac{D\varepsilon'}{\tau'} \quad (3.21)$$

$$D = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\varphi M_w)^{0.5} T}{\mu V_A^{0.6}} \quad (3.22)$$

จากสมมติฐานที่สถานะสมดุลเทียม ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการสกัดในวัฏภาคสารละลายป้อน วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และวัฏภาคสารละลายนำกลับสามารถแสดงได้จากสมการสมดุลมวลดังนี้

$$V_f C_{f0} + V_s C_{s0} = V_f C_f + V_s C_s + V_m C_m \quad (3.23)$$

$$C_m = C_f K_{ex} = C_s k_s \quad (3.24)$$

โดย v_m จะไม่ถูกนำมาพิจารณาตามสมมติฐานที่ว่าปริมาตรของเยื่อแผ่นเหลวมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรของสารละลายป้อนและปริมาณของสารละลายนำกลับ ซึ่งผลการคำนวณที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์ดังที่กล่าวไปแล้วนั้น พบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการสกัดไอออนต่างๆ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในกลุ่มงานวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยแยกมวลสารเป็นอย่างดี

3.4 การประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ในการนำกลับไอออนสารหนูและปรอท

สารละลายนำกลับและสารสกัดหลายชนิดถือเป็นหัวใจสำคัญที่นำมาใช้สกัดไอออนสารหนูและปรอท โดย Iberhan และคณะทำการสกัด As(III) และ As(V) โดยใช้สารสกัด Cyanex 925, Cyanex 301 และสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่เป็นการผสมของสารสกัดทั้งสองในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า Cyanex 301 สามารถสกัด As(III) ได้สูงกว่า As(V) ส่วนสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์จะทำการสกัด As(V) ได้ดี และการใช้ Cyanex 925 เพียงชนิดเดียวพบว่าสามารถสกัด As(V) ได้น้อยกว่า As(III) เล็กน้อย

Frabega และ Mansur ได้ศึกษาการสกัด Hg(II) จากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ละลายในน้ำมันก๊าด ผลที่ได้คือไอออนปรอทถูกสกัดออกเกือบทั้งหมดภายในเวลา 5 นาทีที่ค่าความเป็นกรด-เบสมากกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งใช้ Thiouria เป็นสารละลายนำกลับ และได้ค่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์ ต่อมา Chakrabarty และคณะ ศึกษา

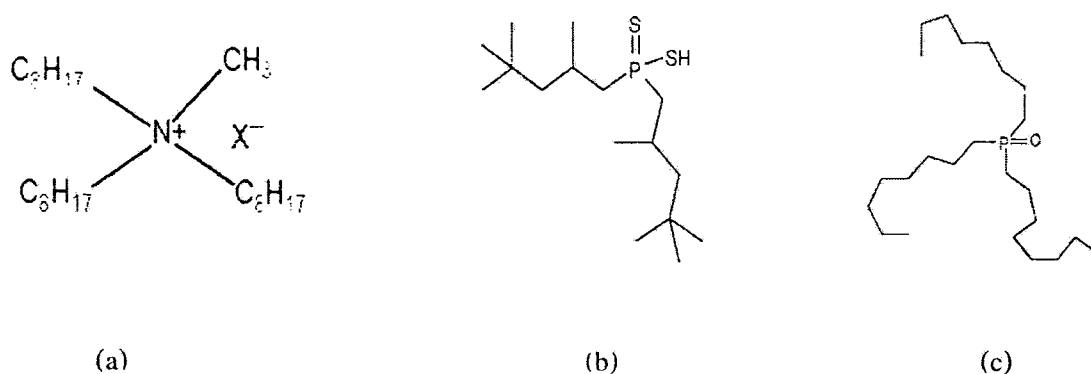
การสกัดไอออนปรอทโดยใช้สารสกัด TOA พบว่าไอออนปรอทถูกสกัดออกจากสารละลายป้อนที่ปราศจากไอออนชนิดอื่นๆ ได้ดีกว่าสารละลายป้อนที่มีลิกลโนซัลโฟเนทละลายอยู่

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากลุ่มวิจัยของ Pancharoen ได้ประสบความสำเร็จในการแยกไอออนสารหนูและปรอทจากการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงโดย Sangtumrong และคณะ ได้ทำการสกัดไอออนสารหนูและปรอทออกมาพร้อมๆ กันจากสารละลายคลอไรด์ โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และใช้ TOA ที่ละลายในโทลูอินเป็นสารสกัด ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้เป็นสารละลายนำกลับ ต่อมา Prapasawat และคณะ ทำการสกัด AS(III) และ AS(V) จากสารละลายซัลเฟตด้วยสารสกัด Cyanex 923 ที่ละลายในโทลูอิน และใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ ในปีเดียวกัน Uedee และคณะ ได้ศึกษาการสกัดแยกไอออนปรอทโดยใช้สารสกัด TOA ละลายในน้ำมันก๊าด และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ พบว่าได้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดและค่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับเท่ากับ 100 และ 97 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งล่าสุด Pancharoen และคณะ ศึกษาการแยกไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งในหลุมขุดเจาะปิโตรเลียมที่บริเวณอ่าวไทยโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และใช้สารสกัด Aliquat 336 ละลายในน้ำมันก๊าด พบว่าสามารถสกัดไอออนสารหนูออกจากน้ำทิ้งที่ไม่มีไอออนปรอทปนเปื้อนอยู่ได้ 91 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยข้างต้น สามารถแบ่งชนิดของไอออนที่ถูกสกัดได้เป็น 3 หัวข้อย่อยได้ดังนี้

- 1) การสกัดไอออนสารหนู
- 2) การสกัดไอออนปรอท
- 3) การสกัดไอออนสารหนูและปรอทพร้อมกัน

3.4.1 การเลือกผ่านไอออนสารหนู

สารสกัดอินทรีย์ได้ถูกค้นคว้าจากนักวิจัยจำนวนมากเพื่อนำมาใช้ในการสกัดไอออนสารหนูออกจากน้ำสังเคราะห์ ซึ่งสารสกัดที่ใช้ ได้แก่ Cyanex 301, Cyanex 923 และ Cyanex 925 และสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ของ Cyanex 301 กับ Cyanex 925 นอกจากนี้ยังใช้สารสกัดชนิดอื่นๆ อีก ได้แก่ สารสกัด TBP, Hydrophobic glycol และ Hydroxamic acid เพื่อสกัด As(III) และ As(V) ออกจากสารละลายกรดซัลฟิวริกโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง พบว่า Cyanex 301 สามารถสกัด As(III) ได้ดีกว่า As(V) ส่วน Cyanex 925 และ Cyanex 923 จะเหมาะสมกับการสกัดทั้ง As(V) และ As(III)



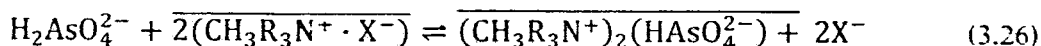
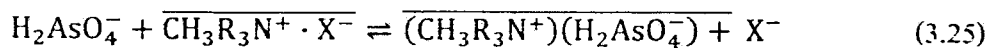
รูปที่ 3.6 โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดอินทรีย์ โดย (a) คือ Aliquat 336, (b) คือ Cyanex 301 และ (c) คือ Cyanex 923 (Mohapatra และ Manchanda, 2008)

ไอออนสารหนูที่พบในน้ำทิ้งส่วนมากอยู่ในรูปของ As(III) และ As(V) โดยทั่วไป As(III) จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน (H_3AsO_3 และ H_2AsO_3^-) ส่วน As(V) จะพบอยู่ในรูปของ H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} และ AsO_4^{3-} แต่สำหรับน้ำทิ้งในหลุมขุดเจาะปิโตรเลียมที่บริเวณอ่าวไทยนั้น As(III) จะอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ คือ H_3AsO_3 และสารหนู As(V) จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุลบ H_2AsO_4^- และ HAsO_4^{2-} สำหรับน้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะปิโตรเลียมบริเวณอ่าวไทยส่วนใหญ่จะพบสารหนูอยู่ในรูปของ As(V) ที่มีความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 6-6.5 สำหรับผลการศึกษาที่ใช้สารสกัดต่างชนิดกัน 3 ชนิดแสดงได้ดังต่อไปนี้

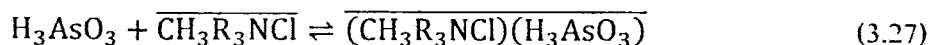
3.4.1.1 การสกัดไอออนสารหนูโดยใช้ Aliquat 336

Aliquat 336 เป็นสารสกัดที่สามารถทำปฏิกิริยาได้กับไอออนสารหนูที่มีประจุลบ (H_2AsO_4^- และ HAsO_4^{2-}) และไอออนสารหนูที่ไม่มีประจุ (H_3AsO_3) โดยการถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูจะถูกขับเคลื่อนด้วยผลต่างความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ OH^- ที่ถ่ายเทในทิศทางสวนกันกับไอออนสารหนู และเพื่อให้ชัดเจนมากขึ้น จึงได้แสดงกลไกการถ่ายเทมวลในรูปที่ 3.7 ด้วยส่วนการสกัด H_2AsO_4^- ด้วยสารสกัด Aliquat 336 สามารถแสดงปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับได้ดังสมการที่ (3.25)-(3.30) จากปฏิกิริยาการสกัดสามารถอธิบายได้ว่าไอออนสารหนูจะเข้าไปแทนที่ X^- ในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และในปฏิกิริยาการนำกลับไอออนสารหนูจะเข้าไปแทนที่ OH^- ในวัฏภาคสารละลายนำกลับ

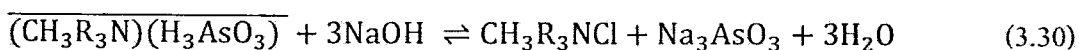
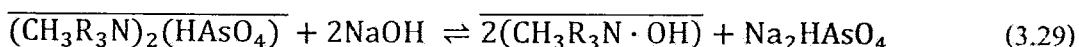
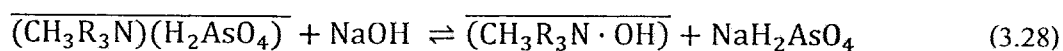
ปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูที่มีประจุลบด้วย Aliquat 336



ปฏิกิริยาการสกัดไอออนสารหนูที่ไม่มีประจุด้วย Aliquat 336



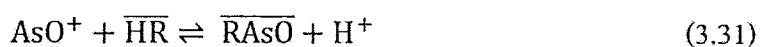
ปฏิกิริยาการนำกลับสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนสารหนูกับ Aliquat 336



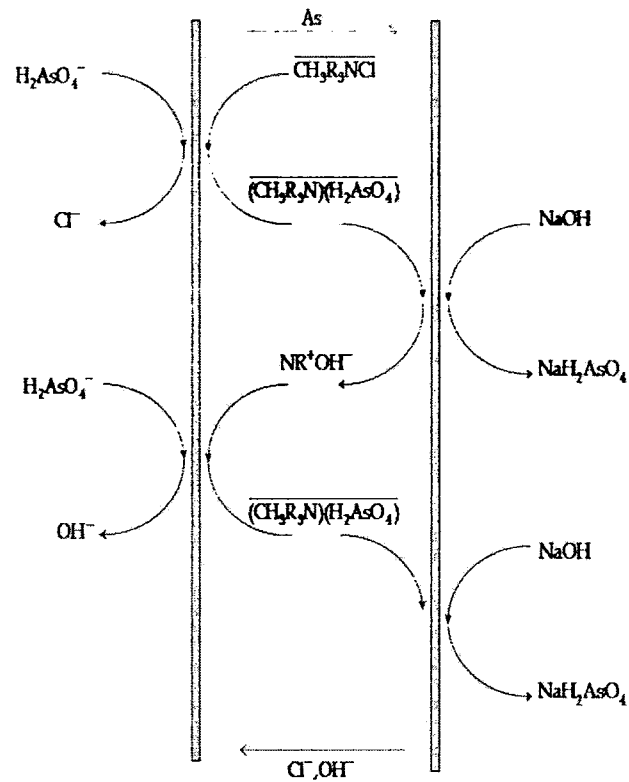
สำหรับการทดลองสกัดไอออนสารหนูโดยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้น จะใช้สารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์เป็นสารละลายนำกลับ ซึ่งการสกัดไอออนสารหนูด้วยวิธีนี้นับว่าประสบผลสำเร็จ เพราะสามารถสกัดแล้วเหลือไอออนสารหนูในน้ำทิ้งต่ำกว่าค่ามาตรฐานกำหนด (น้อยกว่า 250 ppb) โดยได้เปอร์เซ็นต์การสกัดเท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์การนำกลับเท่ากับ 72 เปอร์เซ็นต์ หลังจากดำเนินระบบไป 3 รอบ

3.4.1.2 การสกัดไอออนสารหนูโดยใช้ Cyanex 301

Cyanex 301 เป็นสารสกัดชนิดกรดอีกหนึ่งชนิดที่ถูกนำไปใช้ในการสกัดไอออนสารหนูที่มีประจุบวก เช่น AsO^+ ซึ่งเกิดจากการละลายตัวของ H_3AsO_3 โดยกลไกการถ่ายเทมวลของ AsO^+ ที่ถูกสกัดด้วย Cyanex 301 แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 และมีผลต่างความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนเป็นแรงขับเคลื่อน จากกลไกการถ่ายเทมวลจะเห็นว่าไฮโดรเนียมไอออนเคลื่อนที่ในทิศทางสวนกันกับไอออนสารหนู สำหรับปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

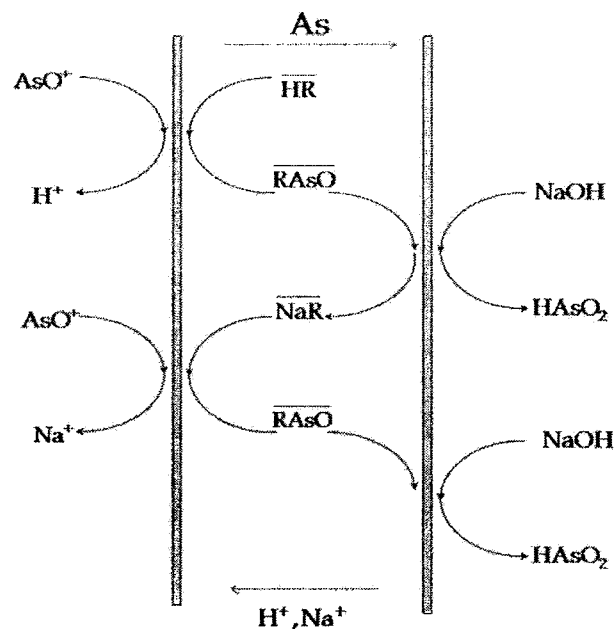


และจากผลการสกัดไอออนสารหนูด้วย Cyanex 301 ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงนั้นพบว่าได้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดสูง แต่กลับได้ค่าเปอร์เซ็นต์การนำกลับต่ำ



รูปที่ 3.7 การถ่ายเทมวลแบบคู่ควบของ H_2AsO_4^- โดยใช้ Aliquat 336

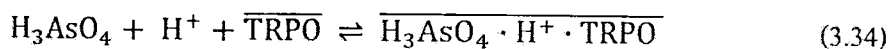
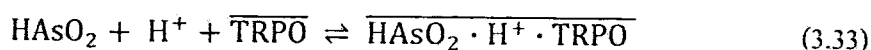
โดยสาเหตุที่ทำให้การนำกลับเกิดขึ้นได้น้อยนั้น เนื่องจากไอออนสารหนูสร้างพันธะที่แข็งแรงมากกับสารสกัด Cyanex 301 จึงทำให้การสลายพันธะเมื่อเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับทางฝั่งสารละลายนำกลับเป็นไปได้ยาก ดังนั้นการเลือกใช้สารสกัด Cyanex 301 จึงไม่ได้รับความนิยมดังเหตุผลข้างต้น



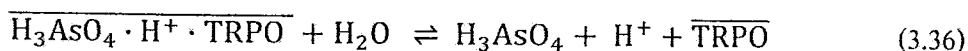
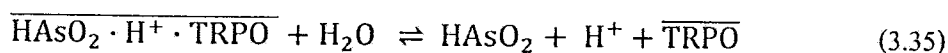
รูปที่ 3.8 การถ่ายเทมวลแบบคู่ควบของ AsO^+ โดยใช้ Cyanex 301

3.4.1.3 การสกัดไอออนสารหนูโดยใช้สารสกัด Cyanex 923 ที่เป็นสารสกัดชนิดกลาง

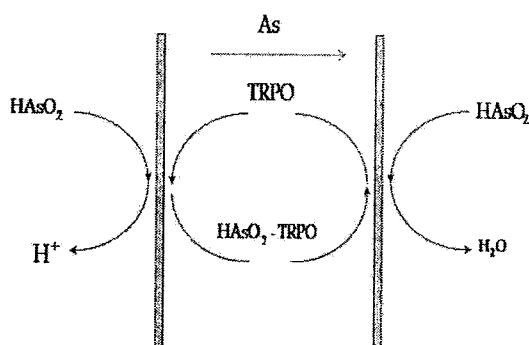
สารสกัด Cyanex 923 หรือ trialkylphosphine oxides (TRPO) เป็นสารสกัดชนิดกลางและมีความสามารถในการสกัดไอออนสารหนูที่ไม่มีประจุออกจากน้ำทิ้ง โดย As(III) จะอยู่ในรูปของ HAsO_2 และ As(V) จะอยู่ในรูปของ H_3AsO_4 ซึ่งปฏิกิริยาการสกัด As(III) และ As(V) แสดงได้ดังสมการที่ (3.33) และ (3.34) ตามลำดับ



และใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ โดยปฏิกิริยาการนำกลับของ As(III) และ As(V) แสดงได้ดังสมการที่ (3.35) และ (3.36) ตามลำดับ



จากสมการที่ (3.33) และ (3.34) สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการถ่ายเทมวลดังรูปที่ 3.9 สำหรับงานวิจัยที่เป็นกรณีศึกษาได้ใช้สารสกัด Cyanex 923 ที่ละลายในน้ำมันก๊าดความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สกัดไอออนสารหนูและใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับ โดยจากผลการทดลองพบว่าสามารถสกัด As(III) และ As(V) ได้เปอร์เซ็นต์การสกัดเท่ากับ 38 และ 45 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับซึ่งจะเห็นว่าได้เปอร์เซ็นต์การสกัดน้อย เนื่องจากในสารละลายป้อนมีไอออนสารหนูที่ไม่มีประจุน้อย จึงทำให้สารสกัด Cyanex 923 ที่มีคุณสมบัติในการสกัดไอออนโลหะที่ไม่มีประจุเท่านั้น ทำการสกัดไอออนสารหนูที่ไม่มีประจุออกมาได้น้อยนั่นเอง



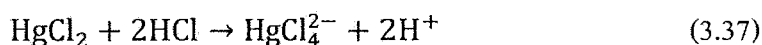
รูปที่ 3.9 กลไกการสกัด As(III) โดยใช้ Cyanex 923

จากผลการศึกษาสารสกัดทั้งสามชนิดต่อการสกัดไอออนสารหนูออกจากน้ำทิ้งในหลุมขุดเจาะที่บริเวณอ่าวไทยนั้น พบว่า Aliquat 336 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับสูงที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะว่าสารสกัดชนิดนี้สามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งไอออนสารหนูที่มีประจุลบ (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-}) และที่ไม่มีประจุ (H_3AsO_3)

3.4.2 การเลือกผ่านไอออนปรอท

ไอออนปรอทที่อยู่ในน้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของธาตุปรอท $\text{Hg}(0)$ ส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ (HgCl_2) สำหรับการสกัดไอออนปรอทในเบื้องต้นนั้นได้ใช้วิธีบำบัดทางเคมีโดยการเติมสารออกซิเด้นซ์ลงไปเพื่อให้ไอออนปรอทตกตะกอนและรวมกันเป็นคาบของแข็ง ซึ่งวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพในกรณีที่ปรอทมีความเข้มข้นสูงๆ โดยไอออนปรอทที่ได้จะเปลี่ยนจากรูปของ HgCl_2 เป็น $\text{Hg}(\text{II})$ ดังนั้นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดในเบื้องต้นแล้วยังคงมี $\text{Hg}(\text{II})$ หลงเหลืออยู่ในปริมาณน้อย จึงนำไปสกัดต่อโดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ซึ่งในกรณีศึกษาที่ Uedee และคณะ ได้ทำการสกัดและนำกลับ $\text{Hg}(\text{II})$ ออกจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วและมีความเข้มข้นของ $\text{Hg}(\text{II})$ ละลายอยู่อย่างเจือจางได้มีประสิทธิภาพ โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง นอกจากนี้ Sangtumrong และคณะ ศึกษาการสกัด $\text{Hg}(\text{II})$ ออกจากสารละลายคลอไรด์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงและใช้ TOA เป็นสารสกัด ต่อมา Pancharoen และคณะก็ประสบความสำเร็จในการสกัดไอออนปรอทจากระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงด้วยเช่นกัน และผลการทดลองที่ได้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า

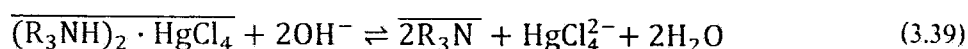
TOA เป็นสารสกัดชนิดเบส ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลแสดงไว้แล้วในรูปที่ 3.6 โดยจากการศึกษาพบว่าสารสกัด TOA ที่ละลายในทูลอีนสามารถสกัดไอออนปรอทได้ดีมาก แต่อย่างไรก็ตามหากในสารละลายป้อนมีไอออนปรอทที่ไม่มีประจุ (HgCl_2) ละลายอยู่ จำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนดังกล่าวให้อยู่ในรูปที่มีประจุลบก่อนด้วยการเติมกรดไฮโดรคลอริก เพื่อให้สามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดเบสได้ดี โดยปฏิกิริยาของไอออนปรอทกับกรดไฮโดรคลอริกแสดงได้ดังสมการที่ (3.37)



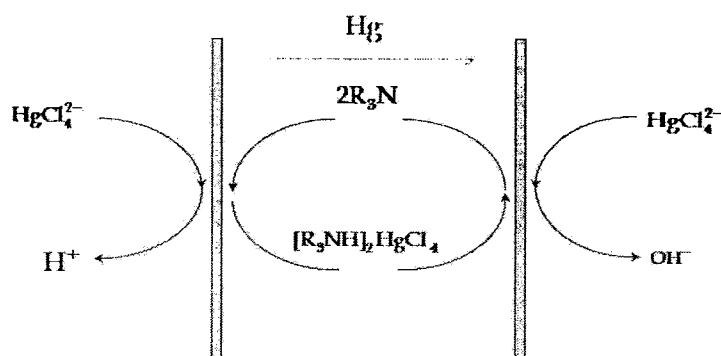
จากนั้น HgCl_4^{2-} จึงทำปฏิกิริยากับสารสกัด TOA (R_3N) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนดังสมการที่ (3.38)



แล้วสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนปรอทจะแพร่ผ่านวัสดุเยื่อแผ่นเหลวไปทางฝั่งวัสดุสารละลายนำกลับด้วยแรงขับเคลื่อนของผลต่างความเข้มข้น และเข้าทำปฏิกิริยากับ NaOH ที่เป็นสารละลายนำกลับ ทำให้ HgCl_4^{2-} ถูกปล่อยเข้าไปอยู่ในสารละลายนำกลับดังสมการที่ (3.39)



ส่วนสารสกัด TOA ก็จะแพร่กลับไปยังบริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายป้อน เพื่อกลับไปทำปฏิกิริยากับ HgCl_4^{2-} อีกครั้ง และกลไกการถ่ายเทมวลของ Hg(II) ที่อยู่ในน้ำทิ้งผ่านวัสดุเยื่อแผ่นเหลวแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การถ่ายเทมวลแบบควบคู่ไปในทิศทางเดียวกันของ HgCl_4^{2-} โดยใช้ TOA

โดยจากผลการทดลองในงานวิจัยของ Pancharoen และคณะที่สกัดไอออนปรอทภายใต้ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อนเท่ากับ 2.5, ความเข้มข้นของ TOA เท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 0.5 โมลาร์ และอัตราการไหลของสารละลายป้อนกับสารละลายนำกลับเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าสามารถสกัดไอออนปรอทได้ปริมาณมากซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับเท่ากับ 99.8 และ 62 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ภายในเวลา 300 นาที และได้รอบการทำงานของระบบเท่ากับ 6 รอบ

3.4.3 การเลือกผ่านไอออนสารหนูและปรอทพร้อมกัน

น้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะปิโตรเลียมนั้นจะมี As(V) อยู่ในรูปของ H_2AsO_4^- และ Hg(II) อยู่ในรูปของ HgCl_2 ดังนั้นความพยายามที่จะสกัดไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งดังกล่าวจึงเป็น

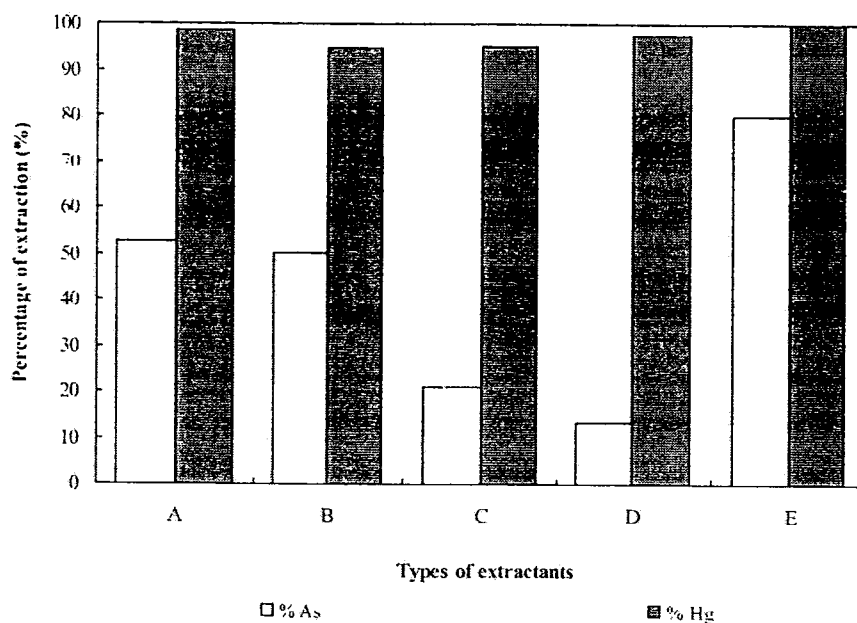
สิ่งสำคัญ และเพื่อให้ประสิทธิภาพการสกัดไอออนเพิ่มสูงขึ้น จึงเลือกใช้การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ (รายละเอียดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์อธิบายไว้ในบทที่ 4) ที่เป็นการนำเอาสารสกัดสองชนิดมาผสมกัน ซึ่งความสามารถในการเสริมฤทธิ์จะแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์การเสริมฤทธิ์ (synergistic coefficient, R) ที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย

$$R = \frac{D_{\max}}{D_1 + D_2} \quad (3.40)$$

เมื่อ D_m คือค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสูงสุดของไอออนที่ถูกสกัดด้วยระบบการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ และ $D_1 + D_2$ คือผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนที่ถูกสกัดด้วยสารสกัดแต่ละชนิด ซึ่งหากค่าสัมประสิทธิ์การเสริมฤทธิ์มีค่ามากย่อมเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ได้ดี โดยจากรูปที่ 3.11 เป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนสารหนูและปรอทในน้ำทิ้งจากหลุมขุดเจาะปิโตรเลียมในกรณีที่ใช้สารสกัดต่างชนิดกัน และจากผลการทดลองสามารถแสดงประสิทธิภาพของสารสกัดแต่ละชนิดได้โดยเรียงจากเปอร์เซ็นต์การสกัดมากไปหาน้อยดังนี้

As: Aliquat 336+Cyanex 471 > Aliquat 336 > Bromo-PADAP > Cyanex 471 > Cyanex 923,
Hg: Aliquat 336+Cyanex 471 > Aliquat 336 > Cyanex 923 > Bromo-PADAP $\approx$ Cyanex 471

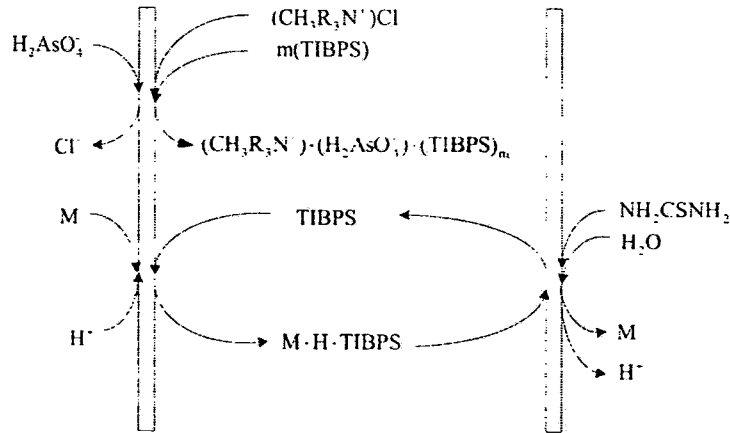
ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าการใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่เป็นการผสมของสารสกัด Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.22 โมลาร์ กับสารสกัด Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์นั้น ได้ให้ผลการสกัดสูงสุด และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเสริมฤทธิ์ได้เท่ากับ 2.8 (มีค่ามากกว่า 1) จึงสรุปได้ว่าการสกัดไอออนสารหนูและปรอทโดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ผสมกับ Cyanex 471 จะเกิดการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ สำหรับสารละลายนำกลับที่ใช้ในงานวิจัยสกัดไอออนสารหนูและปรอทนั้น ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์, น้ำที่ปราศจากไอออน (DI water), กรดไนตริก, กรดซัลฟิวริก และไฮโอยูเรีย



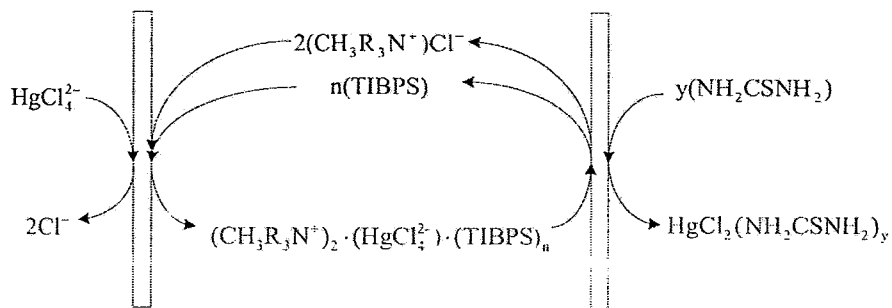
รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารสกัดกับเปอร์เซ็นต์การสกัดไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้ง (A) คือ Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.22 โมลาร์, (B) คือ Bromo-PADAP ความเข้มข้น 0.22 โมลาร์, (C) คือ Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์, (D) คือ Cyanex 923 ความเข้มข้น 0.51 โมลาร์ และ (E) คือ Aliquat 336 ความเข้มข้น 0.22 โมลาร์ ที่ผสมกับ Cyanex 471 ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์

โดยไซโอยูเรียมีประสิทธิภาพในการนำกลับไอออนปรอทที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับสารสกัด Aliquat 336 ได้ดี และไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการตกตะกอน ส่วนการนำกลับไอออนสารหนูด้วยน้ำนั้นพบว่ามีการศึกษาในงานวิจัยของ Prapasawat และคณะ สำหรับการใช้ไซเคียมไฮดรอกไซด์ในการนำกลับไอออนปรอทนั้น มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับการตกตะกอน การอุดตัน และมีประสิทธิภาพในการนำกลับน้อย

สำหรับกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูและปรอทที่ใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ของ Aliquat 336 กับ Cyanex 471 และใช้ไซเคียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับนั้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ



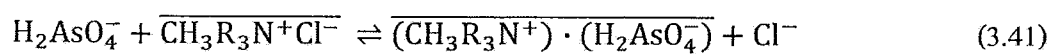
รูปที่ 3.12 กลไกการสกัดและการนำกลับของ H_2AsO_4^- โดยใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ของ Aliquat 336 กับ Cyanex 471 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ



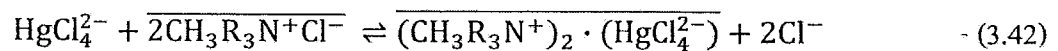
รูปที่ 3.13 กลไกการสกัดและการนำกลับของ HgCl_2 โดยใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ของ Aliquat 336 กับ Cyanex 471 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายนำกลับ

โดยปฏิกิริยาการสกัดของไอออนสารหนูและปรอทด้วยสารสกัด Aliquat 336 จะเป็นไปตามสมการที่ (3.41)-(3.42)

As(V):

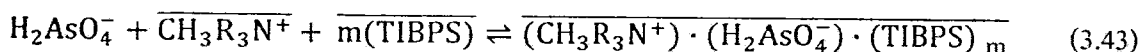


Hg(II):

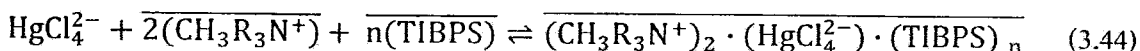


ส่วนปฏิกิริยาการสกัดของไอออนสารหนูและปรอทด้วยสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ของ Aliquat 336 กับ Cyanex 471 (TIBPS) จะเป็นไปตามสมการที่ (3.43)-(3.44)

As(V):



Hg(II):



เมื่อ m และ n คือ สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยา (stoichiometric coefficient) การสกัดไอออนสารหนูและปรอทตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จากสมการสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนทั้งสองและการสกัดไอออนสารหนูที่ไม่มีประจุด้วยสารสกัด Cyanex 471 (TIBPS) แสดงได้ดังสมการที่ (3.45)

As(III และ V):



เมื่อ M แทน As(III) ที่อยู่ในรูปของ H_3AsO_3 และแทน As(V) ที่อยู่ในรูปของ H_3AsO_4

3.4.3.1 สัมประสิทธิ์การกระจายและค่าคงที่สมดุลการสกัด

จากการพิจารณาการถ่ายเทมวล สามารถหาค่าคงที่สมดุลการสกัด (extraction equilibrium constant, K_{ex}) ของไอออนสารหนูและปรอทแสดงได้ดังสมการที่ (3.46) และ (3.47) ตามลำดับ

$$K_{\text{ex,As}} = \frac{[(\overline{\text{CH}_3\text{R}_3\text{N}^+}) \cdot (\overline{\text{H}_2\text{AsO}_4^-}) \cdot (\overline{\text{TIBPS}})_m]}{[\text{H}_2\text{AsO}_4^-][\overline{\text{CH}_3\text{R}_3\text{N}^+}][\overline{\text{TIBPS}}]^m} \quad (3.46)$$

$$K_{\text{ex,Hg}} = \frac{[(\overline{\text{CH}_3\text{R}_3\text{N}^+})_2 \cdot (\overline{\text{HgCl}_4^{2-}}) \cdot (\overline{\text{TIBPS}})_n]}{[\text{HgCl}_4^{2-}][\overline{\text{CH}_3\text{R}_3\text{N}^+}]^2 [\overline{\text{TIBPS}}]^n} \quad (3.47)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนสารหนูและปรอทที่ใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ของ Aliquat 336 กับ Cyanex 471 แสดงได้ดังสมการที่ (3.48) และ (3.49) ตามลำดับ

$$D_{As} = \frac{[(CH_3R_3N^+) \cdot (H_2AsO_4^-) \cdot (TIBPS)_m]}{[H_2AsO_4^-]} = K_{ex,As} [\overline{CH_3R_3N^+}] [\overline{TIBPS}]^m \quad (3.48)$$

$$D_{Hg} = \frac{[(CH_3R_3N^+)_2 \cdot (HgCl_4^{2-}) \cdot (TIBPS)_n]}{[HgCl_4^{2-}]} = K_{ex,Hg} [\overline{CH_3R_3N^+}]^2 [\overline{TIBPS}]^n \quad (3.49)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนสารหนูและปรอทด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแสดงได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งประมาณค่าได้จากสมการที่ (3.48) และ (3.49) ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การกระจายย่อมแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสกัดที่เพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายในตารางที่ 3.1 จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของ Cyanex 471 ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนสารหนูและปรอทจะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าความเข้มข้นของ Cyanex 471 มีค่าเท่ากับ 0.06 โมลาร์ และ 0.07 โมลาร์ ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนสารหนูและปรอทโดยใช้สารสกัดแบบ

เสริมฤทธิ์ของ Aliquat 336 กับ Cyanex 471 (ความเข้มข้นของ Aliquat 336 เท่ากับ 0.22 โมลาร์ และสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์)

ความเข้มข้นของ Cyanex 471 (โมลาร์)	สัมประสิทธิ์การกระจาย	
	ไอออนสารหนู	ไอออนปรอท
0.02	0.63	-
0.04	1.13	4.52
0.05	1.32	5.57
0.06	1.47	6.59
0.07	-	8.72

จากสมการที่ (3.48) และ (3.49) สามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนสารหนูและปรอทได้ใหม่ดังสมการที่ (3.50) และ (3.51)

$$\log D_{As} = \log (K_{ex,As} \cdot [\overline{CH_3R_3N^+}]) + m \log [\overline{TIBPS}] \quad (3.50)$$

$$\log D_{Hg} = \log (K_{ex,Hg} \cdot [\overline{CH_3R_3N^+}]^2) + n \log [\overline{TIBPS}] \quad (3.51)$$

โดยเลขสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยา (m และ n) ในสมการที่ (3.50) และ (3.51) สามารถหาค่าได้จากการพล็อตกราฟระหว่างค่า $\log D_{As}$ และ $\log D_{Hg}$ เทียบกับ $\log [\overline{TIBPS}]$ แล้วอ่านค่าได้จากความชันของกราฟเส้นตรง จึงได้ค่า m เท่ากับ 0.7917 (ประมาณ 4/5) และได้ค่า n เท่ากับ 1 จากนั้นนำค่า m และ n แทนลงในสมการที่ (4.43) และ (4.44) ส่วนค่าคงที่สมดุลการสกัดของไอออน

ทั้งสองคำนวณได้จากสมการที่ (4.46) และ (4.47) โดยได้ค่าเท่ากับ 1,622 ลิตรต่อโมล³ และ 62.7 ลิตรต่อโมล^{9/5} ตามลำดับ ซึ่งจากค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่าการสกัดไอออนปรอทจะเกิดขึ้นได้ดีกว่าไอออนสารหนูและสอดคล้องกับผลการศึกษา

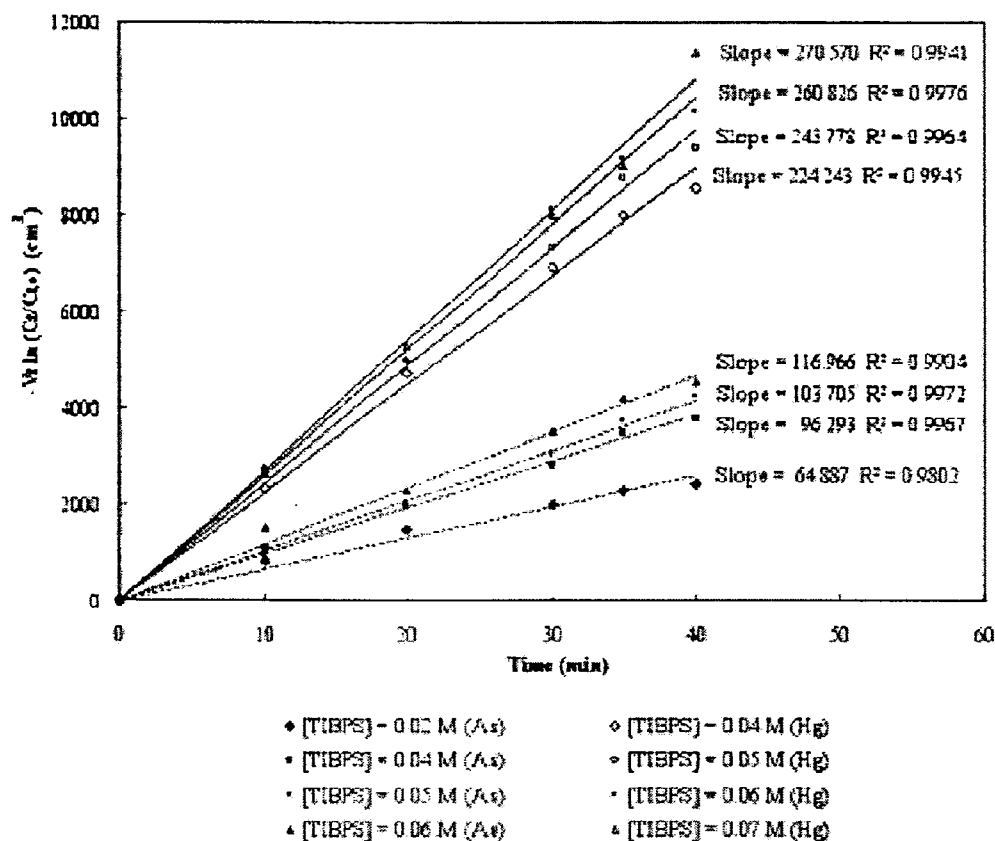
3.4.3.2 สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient, P) ของไอออนสารหนูและปรอทที่ใช้สารสกัด Cyanex 471 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.13) และ (3.14) ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของ Cyanex 471 เท่ากับ 0.02-0.07 โมลาร์ แล้วคำนวณค่าจากเทอม $(AP \beta / (\beta + 1))$ ที่ได้จากความชันของเส้นกราฟ ซึ่งพล็อตระหว่างเทอม $-V_f \ln(C_f / C_{f,0})$ กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.14 และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนสารหนูและปรอทแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 โดยจากตารางแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนปรอทจะสูงกว่าค่าของไอออนสารหนู หรือกล่าวอีกอย่างว่าไอออนปรอทถูกสกัดได้ดีกว่านั่นเอง

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนสารหนูและปรอทโดยใช้สารสกัดแบบ

เสริมฤทธิ์ของ Aliquat 336 กับ Cyanex 471 (ความเข้มข้นของ Aliquat 336 เท่ากับ 0.22 โมลาร์ และสารละลายนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์)

ความเข้มข้นของ Cyanex 471 (โมลาร์)	$P \times 10^3$ (เซนติเมตรต่อวินาที)	
	ไอออนสารหนู	ไอออนปรอท
0.02	5.47	-
0.04	8.90	33.98
0.05	9.81	40.94
0.06	11.54	48.37
0.07	-	53.14



รูปที่ 3.14 การพล็อตกราฟของเทอม $-V_f \ln(C_f/C_{f,0})$ ของไอออนสารหนูและปรอทที่อยู่ในสารละลายป้อนเทียบกับเวลา ภายใต้สภาวะสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่มีค่าความเข้มข้นของ Cyanex 471 แตกต่างกัน และค่าความเข้มข้นของ Aliquat 336 เท่ากับ 0.22 โมลาร์

3.4.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

สมการที่ (3.52) และ (3.53) ถูกพิจารณาภายใต้สมมติฐานที่ปราศจากค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลในวัฏภาคสารละลายนำกลับ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูและปรอท

$$\frac{1}{P_{As}} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \cdot \frac{1}{K_{ex,As} k_m [\text{CH}_3\text{R}_3\text{N}^+] [\text{TIBPS}]^{4/5}} \quad (3.52)$$

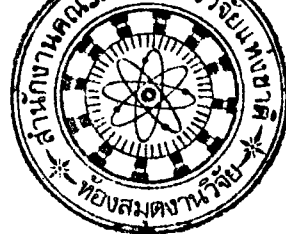
$$\frac{1}{P_{Hg}} = \frac{1}{k_i} + \frac{r_i}{r_{lm}} \cdot \frac{1}{K_{ex,Hg} k_m [\text{CH}_3\text{R}_3\text{N}^+]^2 [\text{TIBPS}]} \quad (3.53)$$

เมื่อ P_{As} และ P_{H_2} คือค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของไอออนสารหนูและปรอทตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวและวัฏภาคสารละลาย น้ำกลับ (k_m และ k_i) สามารถหาค่าได้จากกราฟลอธกราฟของเทอม $1/P_{As}$ เทียบกับเทอม $1/[\text{CH}_3\text{R}_3\text{N}^+][\text{TIBPS}]^{4/5}$ แล้วคำนวณจากค่าความชันของเส้นกราฟซึ่งจะเป็นค่าของเทอม $(r_i/r_m)(1/K_{As}k_m)$ และค่าจุดตัดเส้นกราฟที่จะเป็นค่าของเทอม $1/k_i$ ในทำนองเดียวกันการหาค่า k_m และ k_i ของไอออนปรอทสามารถทำได้เช่นเดียวกับในกรณีของไอออนสารหนู และจากผลการคำนวณที่ได้พบว่าค่าของ k_m จะมีค่ามากกว่าค่าของ k_i จึงสรุปได้ว่าการถ่ายเทมวลในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนควบคุมระบบการสกัดนี้

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

A	พื้นที่ของเยื่อแผ่น (ตารางเซนติเมตร)
C	ความเข้มข้นในวัฏภาคเยื่อแผ่น (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
C_{aq}	ความเข้มข้นในวัฏภาคสารละลาย (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
C_f	ความเข้มข้นในวัฏภาคสารละลายป้อน (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
$C_{f,0}$	ความเข้มข้นเริ่มต้นในวัฏภาคสารละลายป้อน (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
C_f^*	ความเข้มข้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับเยื่อแผ่นเหลว (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
C_m	ความเข้มข้นในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
C_{fs}	ความเข้มข้นในวัฏภาคสารละลายน้ำกลับ (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
$C_{s,0}$	ความเข้มข้นเริ่มต้นในวัฏภาคสารละลายน้ำกลับ (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
C_s^*	ความเข้มข้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับสารละลายน้ำกลับ (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
D	สัมประสิทธิ์การกระจาย
D_e	effective diffusivity (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
D_o	สัมประสิทธิ์การกระจายในวัฏภาคสารละลายป้อน (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
HFSLM	เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
J	ฟลักซ์ (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
J_f	ฟลักซ์จากการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มในวัฏภาคสารละลายป้อน (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
J_{m1}	ฟลักซ์จากการแพร่ผ่านบริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งวัฏภาคสารละลายป้อน (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

J_{m2}	ฟลักซ์จากการแพร่ผ่านบริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
J_{r1}	ฟลักซ์จากปฏิกิริยาการสกัด (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
J_{r2}	ฟลักซ์จากปฏิกิริยาการนำกลับ (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
J_s	ฟลักซ์จากการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
K_e	ค่าคงที่สมดุลของการสกัด
K_s	ค่าคงที่สมดุลของการนำกลับ
K_f	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแบบไร้หน่วยในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน
K_s	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแบบไร้หน่วยในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ
k_1	ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาไปข้างหน้าในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน (เซนติเมตรต่อโมลาร์ต่อวินาที)
k_{-1}	ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาย้อนกลับในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน (เซนติเมตรต่อโมลาร์ต่อวินาที)
k_2	ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาไปข้างหน้าในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ (เซนติเมตรต่อโมลาร์ต่อวินาที)
k_{-2}	ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาย้อนกลับในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ (เซนติเมตรต่อโมลาร์ต่อวินาที)
k_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน (เซนติเมตรต่อวินาที)
k_s	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ (เซนติเมตรต่อวินาที)
L	ความยาวของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
l_{if} และ l_{is}	ความหนาของชั้นฟิล์มในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและสารละลายนำกลับ (เซนติเมตร)
M_{if}	มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)
N	จำนวนของเส้นใยกลวงที่อยู่ในมอดูล
m, n	สัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยา
P	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
Q_f	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)
R	สัมประสิทธิ์การเสริมฤทธิ์
r_i	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
r_o	รัศมีภายนอกของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
r_{lm}	รัศมี log-mean ของเส้นใยกลวง



T	อุณหภูมิสุทธิ (องศาเซลเซียส)
V_A	ปริมาณ โมลาร์ขององค์ประกอบที่ต้องการสกัดที่อุณหภูมิจุดเดือดของมัน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
V_f	ปริมาตรสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$V_{f,0}$	ปริมาตรเริ่มต้นของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
V_m	ปริมาตรเยื่อแผ่นเหลว (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$V_{s,0}$	ปริมาตรเริ่มต้นของสารละลายนำกลับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
V_s	ปริมาตรสารละลายนำกลับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
X_0	ความหนาของวักภาคเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตร)
ϵ	ความพรุนของเส้นใยกลวง (เปอร์เซ็นต์)
ϕ	association factor ของตัวทำละลาย
μ	ความหนืด (cp)

ตัวห้อย

aq	สารละลาย
f	วักภาคสารละลายป้อน
m	วักภาคเยื่อแผ่นเหลว
org	สารอินทรีย์
s	วักภาคสารละลายนำกลับ

บทสรุป

กลไกการถ่ายเทมวลขององค์ประกอบที่ต้องการแยกผ่านเยื่อแผ่นเหลวจะเป็นการแพร่ซึมหรือการแพร่ซึมที่มีปฏิกิริยาเคมีและสารสกัดเข้ามาเกี่ยวข้อง สำหรับกลไกการถ่ายเทมวลในเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจะมีทั้งการถ่ายเทมวลแบบง่ายที่เหมาะสมกับการสกัดองค์ประกอบที่เป็นกลาง และการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ที่เหมาะสมกับการสกัดไอออนซึ่งได้ยกตัวอย่างการสกัดไอออนสารหนูและปรอทที่มีความเข้มข้นต่ำๆ จากน้ำทิ้งในหลุมขุดเจาะปิโตรเลียม ทั้งในกรณีที่ใช้สารสกัดชนิดเดียวหรือสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ โดยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงสามารถสกัดและนำกลับไอออนทั้งสองได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของการสกัดไอออนสารหนูยังคงด้อยกว่าประสิทธิภาพของการสกัดไอออนปรอทซึ่งการสกัดไอออนสารหนูจะต้องดำเนินการสกัดมากกว่าหนึ่งรอบ ส่วนสารสกัด Aliquat 336 จัดเป็นสารสกัดที่ดีที่สุด เนื่องจากสารสกัดชนิดนี้สามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งไอออนสารหนูที่อยู่ในรูปมีประจุ

และไม่มีประจุ สำหรับการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่เป็นการผสมของสารสกัด Cyanex 471 กับสารสกัด Aliquat 336 นั้นสามารถสกัดไอออนสารหนูและปรอทออกจากน้ำทิ้งได้ในเวลาเดียวกัน และสารละลายนำกลับที่ดีที่สุดคือไรโอซูเรีย โดยจำนวนรอบที่ใช้ในการดำเนินระบบเพื่อให้การสกัดไอออนสารหนูและปรอทเกิดได้สูงสุดนั้นเท่ากับ 3 และ 1 รอบตามลำดับเมื่อเสร็จสิ้นจากการสกัด จะเหลือค่าความเข้มข้นของไอออนทั้งสองในน้ำทิ้งน้อยกว่าค่ามาตรฐานกำหนด สำหรับกลไกการถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูและปรอทจะเริ่มจากวัฏภาคสารละลายป้อนไปยังวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว ซึ่งถูกอธิบายจากกฎของฟิค พร้อมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการถ่ายเทมวลของไอออนสารหนูและปรอท ได้แก่ ค่าคงที่สมดุลของการสกัด (K_d), สัมประสิทธิ์การกระจาย (D), สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P), สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคสารละลายป้อน (k_p) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว (k_m) โดยจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการถ่ายเทมวลในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเป็นขั้นตอนควบคุมระบบการสกัดนี้

คำถามท้ายบท

- 1) กลไกการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นเหลวแบ่งเป็นกี่ขั้นตอนอะไรบ้าง
- 2) กลไกการถ่ายเทมวลแบบแพร่ซึมมีกี่ประเภทอะไรบ้าง
- 3) กลไกการถ่ายเทมวลแบบควบคู่คืออะไร
- 4) จงอธิบายหลักการทำงานของการทำงานการแพร่ซึมที่มีการถ่ายเทมวลแบบสวนทาง (counter transport permeation)
- 5) จงอธิบายหลักการทำงานของการทำงานการถ่ายเทมวลแบบควบคู่ (couple mass transport permeation)
- 6) การสกัดไอออนสารหนูและปรอทในเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงเป็นปรากฏการณ์ของการแพร่ผ่านแบบใดเพราะเหตุใด
- 7) ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงประกอบด้วยอะไรบ้าง
- 8) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลถูกนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์ใดและสัมพันธ์กับปัจจัยใดบ้าง
- 9) เหตุใดค่าความต้านทานที่บริเวณผิวสัมผัสทางฝั่งสารละลายนำกลับจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา
- 10) ค่าสัมประสิทธิ์การเสริมฤทธิ์คืออะไร และสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ใด หากค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นมีความหมายอย่างไร