

การแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SEPARATION OF MERCURY FROM CONDENSATE VIA HOLLOW FIBER MEMBRANE
TECHNOLOGY



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

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแยกโปรตีนออกจากคอนเดนเสทด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวง
โดย	น.ส.วรัญญา พูลแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พร พลเพชร)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ พัฒนาศรี)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ธนพร วรณโชติ)	

วรัญญา พูลแก้ว : การแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใย
 กลวง. (SEPARATION OF MERCURY FROM CONDENSATE VIA HOLLOW FIBER
 MEMBRANE TECHNOLOGY) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.อุรา ปานเจริญ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิธีการใหม่ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท โดยใช้ระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ ตามหลักการและพื้นฐานของการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยสารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียเป็นสารสกัดที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และ 1.5 โมลต่อลิตร ตามลำดับ รูปแบบการไหลในลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน อัตราการไหลที่ 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ที่ อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน ผลการศึกษาพบว่าประสบความสำเร็จในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท ร้อยละการกำจัดปรอทสูงถึง 98.40 ซึ่งความเข้มข้นหลังกำจัดปรอทมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด สำหรับป้อนเข้าสู่อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและโรงกลั่น คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีมาตรฐาน ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของกิบส์มาตรฐานได้ 119.80 กิโลจูลต่อโมล 0.37 กิโลจูลต่อโมล และ -1.15 กิโลจูลต่อโมลตามลำดับ บ่งชี้ว่าปฏิกิริยาการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทเป็น ปฏิกิริยาคูดความร้อน ผันกลับไม่ได้ และสามารถเกิดขึ้นเองที่ 323.15 เคลวิน ปรอทในรูปฟิโนลเมอร์คิวรีคลอไรด์พบมากที่สุดในคอนเดนเสทจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสเปกโตรสโคปี การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อันได้แก่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่ และลักษณะปฏิกิริยาเพื่ออธิบายลักษณะการถ่ายเทมวลในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ ผลการคำนวณพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะปฏิกิริยาสอดคล้องกับผลการทดลอง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเมมเบรน และด้านเปลือก คือ 7.45×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที และ 2.09×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาทีตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าการถ่ายโอนมวลในเมมเบรนเป็นขั้นตอนควบคุม

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370254021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: Condensate, mercury, Hollow fiber membrane technology

Waranya Poolkaew : SEPARATION OF MERCURY FROM CONDENSATE VIA
HOLLOW FIBER MEMBRANE TECHNOLOGY. Advisor: Prof. URA PANCHAROEN

This work presents a new solution for the removal of mercury from petroleum condensate via hollow fiber membrane contactor which follows the principles and practices of solvent extraction. Results demonstrate that mercury can be successfully removed from petroleum condensate feed by the synergistic extractant of HCl and thiourea (0.5 mol/L HCl and 1.5 mol/L thiourea). Under equal circulating flow rates of 1.67 cm³/s of feed and the synergistic extractant at 323.15 K, the percentage of mercury removal reached 98.40%, which meets the acceptable limit of mercury for feed into the petrochemical and refinery plants. The values of standard enthalpy change (119.80 kJ/mol), standard entropy change (0.37 kJ/mol) and standard Gibbs free energy change (-1.15 kJ/mol) indicate that the reaction is endothermic, irreversible and spontaneous at 323.15 K, respectively. The spectroscopy techniques affirmed that phenylmercury chloride was the common compound in the petroleum condensate. To describe the mass transport of the system, two mass transport mathematical models corresponding to reaction flux and diffusion flux are considered. The reaction flux model is seen to fit in well with the experimental results. The mass transfer coefficients in the membrane phase and shell side are 7.45×10^{-6} cm/s and 2.09×10^{-5} cm/s, respectively indicating that the mass transfer in the membrane phase is the controlling step.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลายๆท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูงสำหรับการให้คำปรึกษา ความเชื่อเหลือต่องานวิจัย และแนวทางการดำเนินงานวิจัยได้อย่างถูกต้อง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ศาสตราจารย์ ดร. พิมพ์พร พลเพชร (ประธานกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ พัฒนศรี (กรรมการการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์) และ ดร. ธนพร วรรณโชติ (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการแก้ไขตลอดโครงการวิจัย

ขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยแยมวลสาร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์เครื่องมือ สถานที่ทำงานวิจัย งานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณยาย และเพื่อนๆ ที่เป็นแรงผลักดัน และปลอบโยนในยามที่ท้อแท้เมื่อเจอปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

วรัญญา พูลแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 นิยามของคอนเดนเสท.....	5
2.2 ประโยชน์ของปิโตรเลียมคอนเดนเสท.....	5
2.3 ข้อมูลขอลปรอท.....	6
2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท.....	6
2.3.2 รูปแบบของปรอท.....	7
2.3.3 อันตรายของปรอท.....	8
2.4 ปริมาณปรอทและโลหะหนักอื่นๆในคอนเดนเสท.....	9
2.5 อันตรายจากการปนเปื้อนปรอทในคอนเดนเสท.....	9
2.5.1 อันตรายต่อวัสดุและอุปกรณ์ในกระบวนการการผลิต.....	9

2.5.2	อันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน	10
2.5.3	อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม.....	10
2.6	กระบวนการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท	10
2.6.1	กระบวนการดูดซับ	11
2.6.2	กระบวนการกรอง	11
2.7	ระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	12
2.7.1	การสกัดและนำกลับไอออนของโลหะด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย	12
2.8	โมดูลเส้นใยกลวง.....	13
2.8.1	การสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง	14
2.8.2	การสกัดด้วยตัวระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์	15
2.9	การประยุกต์ใช้ระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทตามทฤษฎีของการสกัดด้วยตัวทำละลาย	16
2.10	การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Experiment)	17
2.10.1	รูปแบบการทดลองแฟกทอเรียล	18
2.11	การคำนวณตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์	18
2.12	การคำนวณสัมประสิทธิ์ของการสกัดเสริมฤทธิ์.....	19
2.13	การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสำหรับสำหรับระบบการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์	20
2.14	การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่ และลักษณะปฏิกิริยาในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์.....	22
2.14.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่	22
2.14.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะปฏิกิริยา (Reaction flux model)	25
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
2.15.1	เอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับสารสกัด	26
2.15.2	เอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวง	28

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	30
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	31
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	32
3.3 วิธีการทดลอง	32
3.3.1 การศึกษารูปแบบปรอทในคอนเดนเสท.....	33
3.3.2 การทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท	33
3.3.3 การศึกษาตัวแปรของอุณหพลศาสตร์.....	36
3.3.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์การแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท	37
3.3.5 การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปรอทในสารละลายป้อน สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทมวลในเมมเบรน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก.....	37
3.3.6 การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการแพร่และลักษณะปฏิกิริยาในการ กำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	38
4.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบของปรอทในคอนเดนเสท.....	38
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท และพิจารณาผลกระทบของ ปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	40
4.2.1 ผลการศึกษาชนิดของสารสกัดเสริมฤทธิ์ต่อประสิทธิภาพในการแยกปรอทออกจากคอน เดนเสทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	43
4.2.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดเสริมฤทธิ์ต่อประสิทธิภาพในการแยก ปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย	45
4.2.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการ สกัดด้วยตัวทำละลาย.....	46
4.3 ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการแยกปรอทในระบบเมมเบรนเส้นใย กลวงแบบคอนแทกเตอร์	47

4.3.1 ผลการศึกษารูปแบบการไหลต่อประสิทธิภาพการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์.....	48
4.3.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลของสารป้อนและสารสกัดต่อประสิทธิภาพการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์	48
4.3.3 ผลการศึกษาเสถียรภาพของระบบในรูปแบบระยะเวลาต่อประสิทธิภาพการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์	49
4.4 ผลการศึกษาตัวแปรของอุณหพลศาสตร์.....	50
4.5 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท	51
4.6 ผลการศึกษากลไกการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท.....	52
4.7 ผลการคำนวณศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปรอทในสารละลายป้อนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเมมเบรน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก.....	53
4.8 ผลการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการแพร่และลักษณะปฏิกิริยาในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุกรม.....	59
ภาคผนวก ก.....	65
ภาคผนวก ข.....	76
ภาคผนวก ค.....	81
ประวัติผู้เขียน	82

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1	สมบัติทางเคมีและกายภาพของปรอท.....	7
ตารางที่ 2-2	ตัวอย่างรูปแบบปรอทตามช่วงจุดเดือดของคอนเดนเสท	8
ตารางที่ 2-3	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละกระบวนการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท	12
ตารางที่ 2-4	ตารางเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบวิธีการทดลองแบบแฟกทอเรียล	17
ตารางที่ 2-5	งานวิจัยที่ศึกษาการใช้สารกรดเบสที่นำมาใช้ในการนำกลับปรอทออกจากวัฏภาคน้ำมัน	27
ตารางที่ 3-1	ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆในคอนเดนเสทและวิธีการวิเคราะห์	30
ตารางที่ 3-2	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	31
ตารางที่ 3-3	คุณสมบัติของอุปกรณ์โมดูลด้วยเส้นใยกลวงที่ใช้ในการทดลอง [19]	32
ตารางที่ 4-1	ผลวิเคราะห์ชนิด และปริมาณของไฮโดรคาร์บอนในตัวอย่างคอนเดนเสท	39
ตารางที่ 4-2	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง	43
ตารางที่ 4-3	ผลของอันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยาของการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท	52
ตารางที่ 4-4	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของปรอทซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของโทโอยูเรียที่ความเข้มข้น 0.5-1.5 โมลต่อลิตรกำหนดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร	54
ตารางที่ ก-1	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในสารสกัดภายหลังการสกัด และร้อยละการกำจัดปรอทด้วยชนิดของสารสกัดที่แตกต่างกันด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย	65
ตารางที่ ก-2	ข้อมูลดิบของร้อยละการกำจัดปรอทด้วยการออกแบบวิธีการแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย	66

ตารางที่ ก-3	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในสารสกัดภายหลังการสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ที่ไทโอยูเรียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย	67
ตารางที่ ก-4	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในสารสกัดภายหลังการสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ที่กรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น ต่าง ๆ ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย	68
ตารางที่ ก-5	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในสารสกัดภายหลังการสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยวิธีการสกัด ด้วยตัวทำละลาย	69
ตารางที่ ก-6	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยเวลาที่แตกต่างกันโดยเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในรูปแบบ การไหลลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวน	69
ตารางที่ ก-7	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยเวลาที่แตกต่างกันโดยเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในรูปแบบ การไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน	70
ตารางที่ ก-8	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยอัตราการไหล 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที	71
ตารางที่ ก-9	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยอัตราการไหล 3.33 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที	72
ตารางที่ ก-10	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยอัตราการไหล 5.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที	73
ตารางที่ ก-11	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยอัตราการไหล 6.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที	74
ตารางที่ ก-12	ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด ปรอทด้วยอัตราการไหลที่เวลา 0-7,200 วินาที	75

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1	ตำแหน่งของปิโตรเลียมคอนเดนเสทภายใต้หลุมขุดเจาะ.....	5
ภาพที่ 2-2	แผนผังผลิตภัณฑ์จากคอนเดนเสทจากอุตสาหกรรมต้นน้ำสู่ปลายน้ำ [21].....	6
ภาพที่ 2-3	แผนภูมิแสดงปริมาณปรอทและโลหะหนักอื่นๆที่ปนเปื้อนในคอนเดนเสท	9
ภาพที่ 2-4	ตัวอย่างกระบวนการการดูดซับปรอทออกจากไฮโดรคาร์บอนด้วยดูดซับที่มีความเลือกเฉพาะกับปรอท[6].....	11
ภาพที่ 2-5	ขั้นตอนการสกัดและนำกลับด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	13
ภาพที่ 2-6	ลักษณะของโมดูลเส้นใยกลวง.....	14
ภาพที่ 2-7	การสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง	15
ภาพที่ 2-8	โมดูลการสกัดเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์	16
ภาพที่ 2-9	การประยุกต์ใช้โมดูลเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท (1) โมดูลเส้นใยกลวง (3) เครื่องวัดอัตราการไหล (4) มาตรวัดความดัน (5) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (6) สารป้อน (คอนเดนเสท) (7) สารสกัด (วัฏภาคสารละลาย). 17	
ภาพที่ 3-1	อุปกรณ์ Liquid- cel® เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous) ในรูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน (1) โมดูลเส้นใยกลวง (3) เครื่องวัดอัตราการไหล (4) มาตรวัดความดัน (5) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (6) คอนเดนเสท (7) สารสกัด.....	35
ภาพที่ 3-2	อุปกรณ์ Liquid- cel® เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองแบบกะ (Batch) ในรูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวน (1) โมดูลเส้นใยกลวง (3) เครื่องวัดอัตราการไหล (4) มาตรวัดความดัน (5) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (6) คอนเดนเสท (7) สารสกัด . 35	
ภาพที่ 4-1	ผล FTIR ของคอนเดนเสทในช่วงความยาวคลื่น 400-3,400 เซนติเมตร ⁻¹	39
ภาพที่ 4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารสกัดต่อร้อยละการกำจัดปรอทภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิดที่ 0.5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนคอนเดนเสทต่อสารสกัดเท่ากัน (O/A=1) ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เวลา 3,600 วินาที.....	41

ภาพที่ 4-3	กราฟ 3 มิติแสดงผลการทดลองระหว่างชนิดของสารและความเข้มข้น (AB) และชนิดของสารและความอุณหภูมิ (AC) ต่อร้อยละการกำจัดปรอท.....	42
ภาพที่ 4-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดปรอทต่อชนิดของสารสกัดเดี่ยวและสารสกัดเสริมฤทธิ์และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว	44
ภาพที่ 4-5	ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นของไทโอยูเรียในสารสกัดเสริมฤทธิ์ต่อร้อยละการกำจัดปรอท (ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร) ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: อัตราส่วนคอนเดนเสทต่อสารสกัดเท่ากัน (O/A=1) ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เวลา 3,600 วินาที	45
ภาพที่ 4-6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารสกัดเสริมฤทธิ์ต่อร้อยละการกำจัดปรอท (กำหนดความเข้มข้นไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร) ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: อัตราส่วนคอนเดนเสทต่อสารสกัดเท่ากัน (O/A=1) ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เวลา 3,600 วินาที	46
ภาพที่ 4-7	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อร้อยละการกำจัดปรอท (กำหนดความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรของกรดไฮโดรคลอริกและ 1.5 โมลต่อลิตรของไทโอยูเรีย) ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: อัตราส่วนคอนเดนเสทต่อสารสกัดเท่ากัน (O/A=1) ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เวลา 3,600 วินาที	47
ภาพที่ 4-8	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลต่อการกำจัดปรอทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวง ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: สารสารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียที่ 0.5 และ 1.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิที่ 323.15 เคลวิน อัตราการไหล 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที เวลา 3,600 วินาที.....	48
ภาพที่ 4-9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลต่อการกำจัดปรอทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวง ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: สารสารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียที่ 0.5 และ 1.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิที่ 323.15 เคลวิน ลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวน เวลา 3,600 วินาที.....	49
ภาพที่ 4-10	ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพของระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสท ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: สารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียที่ 0.5 และ 1.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิที่ 323.15 เคลวิน ลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวน เวลา 3,600 วินาที	50

ภาพที่ 4-11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_{ex}$ และ $1/T$	51
ภาพที่ 4-12	FTIR ของคอนเดนเสทก่อนและหลังแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท.....	53
ภาพที่ 4-13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln (C_f/C_0)$ และ เวลา.....	54
ภาพที่ 4-14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $[Cl^-]/[NH_2CSNH_2]$ และ $1/P$	55
ภาพที่ 4-15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $[NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5HgCl]/[Cl^-]$ และ $[NH_2CSNH_2]/[C_6H_5HgCl]$	55
ภาพที่ 4-16	กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของปรอทที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่และปฏิกิริยา	56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเติบโตขึ้นอย่างมากตามความต้องการของโลก จากการนำผลิตภัณฑ์จากการขุดเจาะใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ เช่น อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงและพลังงาน และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยหนึ่งในสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเหล่านี้ คือ คอนเดนเสท โดยทั่วไปคอนเดนเสทเกิดขึ้นพร้อมกับแก๊สธรรมชาติ และการขุดเจาะปิโตรเลียม ปัจจุบันพบว่าปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในคอนเดนเสทโดยเฉพาะอย่างยิ่งปรอท ซึ่งเป็นปัญหาในหลายด้าน ได้แก่ สุขภาพ และสิ่งแวดล้อม และปัญหาในกระบวนการผลิต การปนเปื้อนของปรอทในวัสดุและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตโดยส่วนมากมักพบปัญหานี้ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลกระทบต่อให้เกิดการกัดกร่อน [1, 2] และเกิดกากตะกอนขึ้น ซึ่งอาจปนเปื้อนเข้าสู่วัฏจักรสิ่งแวดล้อมได้ และการปนเปื้อนของปรอทส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงจำนวนมาก มากไปกว่านั้นสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานหากได้รับปรอทเข้าสู่ร่างกายในระหว่างปฏิบัติงานส่งผลให้เกิดโรคต่าง ๆ อย่างเฉียบพลัน และเรื้อรัง [3-5] จากการสำรวจพบว่าการปนเปื้อนของปรอทในคอนเดนเสทอยู่ในช่วง 0.01 – 3.00 มิลลิกรัมต่อลิตร [6, 7] ซึ่งมีปริมาณที่เกินค่ากำหนดก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ และการกลั่น ซึ่งถูกกำหนดให้ไม่ควรเกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร [8] ดังนั้นการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทก่อนจะเข้าสู่กระบวนการผลิตต่าง ๆ จึงมีความสำคัญ

การเผยแพร่งานวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักออกจากคอนเดนเสทพบไม่มากนักในปัจจุบัน กระบวนการดั้งเดิมในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทคือ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) Sainal และคณะ (2007) [9] ใช้ระบบดูดซับเพื่อกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทก๊าซธรรมชาติในระดับห้องปฏิบัติการ และนำไปใช้กับโรงงานจริง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารปรอทสูงถึงร้อยละ 95.00 Wang และคณะ (2020) [6] ศึกษาการกำจัดปรอทในรูป Hg(II) ออกจากไฮโดรคาร์บอนเหลวด้วยกระบวนการดูดซับซึ่งสังเคราะห์ตัวดูดซับด้วยไบโอชาร์ จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 87.00 แต่อย่างไรก็ตามระบบต้องมีการปรับสภาพตัวดูดซับด้วยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ที่อุณหภูมิสูงถึง 573.15 เคลวิน การปรับสภาพตัวดูดซับคือสิ่งสำคัญในการ

เพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดปรอท ระบบนี้พบว่ามีความเสี่ยงคือ การดำเนินการที่ซับซ้อน ใช้ต้นทุนสูง ซึ่งตามมาซึ่งค่าใช้จ่ายที่สูงตาม ดังนั้นเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวง (Hollow fiber technology) เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่น่าสนใจซึ่งมักนำมาใช้ในการกำจัดไอออนโลหะที่ปนเปื้อนในแหล่งต่าง ๆ ที่มีความเข้มข้นต่ำมาก เพราะระบบนี้มีประสิทธิภาพการกำจัดและการกู้คืนสูง ใช้พลังงานน้อย และใช้ต้นทุนการดำเนินงานน้อย ดังนั้นการนำเทคโนโลยีนี้มาทดลองใช้ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

ระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ (HFMC) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวงที่สามารถใช้เป็นทางเลือกแทนกระบวนการสกัดแบบเดิม เช่น การกำจัดโลหะหนัก สารอินทรีย์ระเหยง่าย และผลิตภัณฑ์ชีวภาพทุกชนิด [10] Rout and Sarangi [11] เปรียบเทียบระบบการสกัดด้วยเมมเบรนเทคโนโลยีกับระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย ผลการทดลองพบว่า การสกัดด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวงให้ประสิทธิภาพมากกว่าระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้ทฤษฎีของการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) นำมาประยุกต์ให้อยู่ในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการแยกปรอทขึ้นอยู่กับสารสกัดที่ใช้ การเลือกสารจึงศึกษาจากกรดกลวง เบส ทั่วไป โดยเลือกศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ประสบความสำเร็จในการแยกปรอทออกจากวัฏภาคน้ำมันหรือสารสกัด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกปรอทระหว่างสารสกัดเดี่ยวและสารสกัดเสริมฤทธิ์ (Synergistic extractant) [12-19]

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ โดยหาสภาวะที่ดีที่สุดเบื้องต้นด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเข้มข้น และ อุณหภูมิ รวมทั้งพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยร่วมซึ่งออกแบบการทดลองด้วยแฟกทอเรียล เมื่อทราบสภาวะที่ดีที่สุดแล้วจึงนำมาทดลองในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุด ได้แก่ รูปแบบการไหล อัตราการไหล และเสถียรภาพของระบบ การวิเคราะห์ชนิดของปรอทในคอนเดนเสทวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมส สเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ร่วมกับ เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) กลไกการเกิดปฏิกิริยายืนยันด้วยการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน หรือพันธะจากเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี นอกจากนี้คำนวณตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ของระบบ ได้แก่ ค่า

การเปลี่ยนแปลงมาตรฐานเอนทัลปี ค่าการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานเอนโทรปี และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท (Kinetics) และประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่ (Diffusion flux model) และลักษณะปฏิกิริยา (Reaction flux model) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ถ่ายโอนความเข้มข้นของปรอทในกระบวนการแยกปรอทออกจากคอนเดนในระบวมเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1 เพิ่มกระบวนการทางเลือกใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท
- 1.2.2 ลดความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับโรงกลั่น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลและของสภาวะต่างๆที่มีผลกระทบต่อกระบวนการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาชนิดของสารสกัดที่เหมาะสมในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย
- 1.3.2 ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกปรอทจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด (0.1-2 โมลต่อลิตร) และอุณหภูมิ (303.15-323.15 เคลวิน) ด้วยวิธีแฟกทอเรียล
- 1.3.3 นำสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายมาศึกษาด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวง ได้แก่ รูปแบบการไหล (สารป้อนและสารสกัดไหลวน และสารป้อนไหลผ่านสารสกัดไหลวน) อัตราการไหล (1.67-6.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที) เวลา (0-3,600 วินาที) และเสถียรภาพของระบบ (7,200 วินาที)
- 1.3.4 ประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายปรากฏการณ์การถ่ายโอนความเข้มข้นของปรอทในกระบวนการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ทราบกระบวนการทางเลือกใหม่ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

1.4.2 ทราบถึงปัจจัยและสถานะต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการแยกโปรตีนออกจากคอนเดนเสทด้วยกระบวนการเมมเบรนเส้นใยกลางแบบคอนแทกเตอร์

1.4.3 เพื่อลดความเข้มข้นของโปรตีนในคอนเดนเสทให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับโรงกลั่น

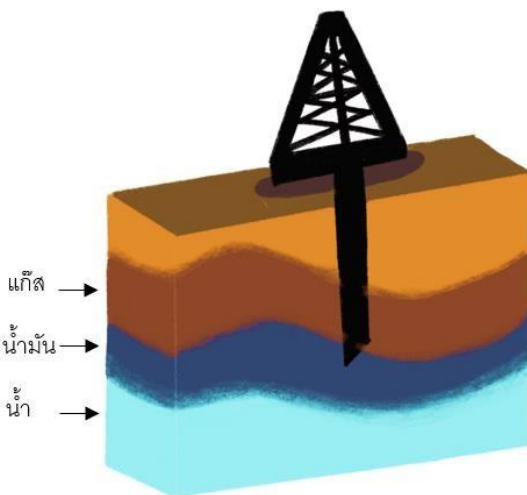


บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามของคอนเดนเสท

คอนเดนเสท คือ ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มเดียวกับแก๊สธรรมชาติแต่มีสถานะเป็นของเหลวในสภาพบรรยากาศ โดยทั่วไปเมื่ออยู่ภายใต้แหล่งกักเก็บตามธรรมชาติจะมีสถานะเป็นแก๊ส ตำแหน่งของคอนเดนเสทภายใต้แหล่งกักเก็บอยู่ด้านบนสุดดังแสดงในภาพที่ 2-1 เมื่อนำคอนเดนเสทขึ้นจากแหล่งขุดเจาะจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว จากความดันและอุณหภูมิที่ลดลง คอนเดนเสทมีองค์ประกอบของปริมาณคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างโมเลกุลที่มากกว่าแก๊สธรรมชาติซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงตั้งแต่ 3-8 อะตอม หรือสารประกอบอะโรมาติกบางครั้งอาจพบสูงถึง 15 อะตอม ซึ่งองค์ประกอบในคอนเดนเสทแตกต่างออกไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา [1]

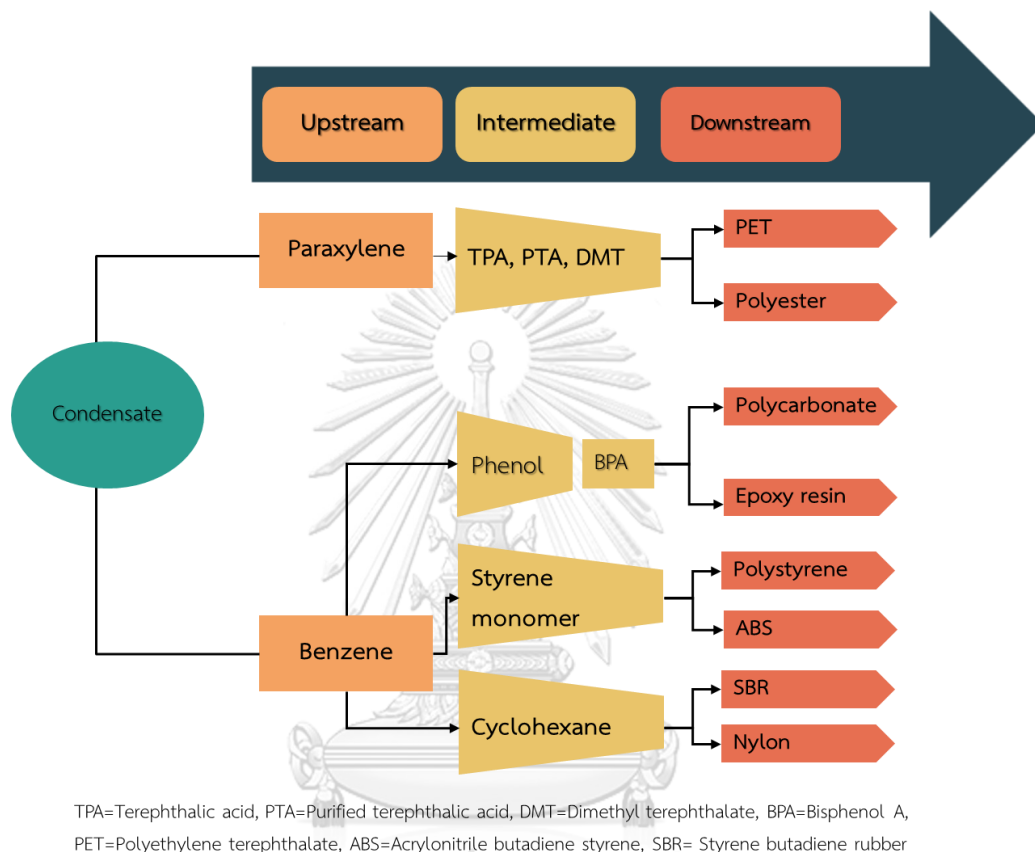


ภาพที่ 2-1 ตำแหน่งของปิโตรเลียมคอนเดนเสทภายใต้หลุมขุดเจาะ

2.2 ประโยชน์ของปิโตรเลียมคอนเดนเสท

คอนเดนเสทนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น น้ำมันเบนซิน โทลูอิน ซึ่งวัตถุดิบหลักของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น การนำคอนเดนเสทที่มีพาราฟินสูงเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพาราไซลีน และเบนซินซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ต้นน้ำ (Upstream) เพื่อนำไปใช้ต่อเนื่องเช่น การ

ผลิตเส้นใยโพลีเอสเตอร์ และ สไตรีนโมโนเมอร์ ภาพแผนผังตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมคอนเดนเสทจากอุตสาหกรรมต้นน้ำสู่ปลายน้ำ (Downstream) แสดงดังภาพที่ 2-2 นอกจากนี้ยังสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจน มีเทน อีเทนจากผลพลอยได้จากการปฏิกริยาแตกตัวด้วยไอน้ำได้อีกด้วย (Steam cracking) [8, 20]



ภาพที่ 2-2 แผนผังผลิตภัณฑ์จากคอนเดนเสทจากอุตสาหกรรมต้นน้ำสู่ปลายน้ำ [21]

2.3 ข้อมูลขอลปรอท

2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท

ปรอท (Mercury) คือ โลหะหนักชนิดหนึ่งอยู่ในกลุ่มธาตุทรานซิชันมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องมีสีเงินวาวสามารถกลิ้งไหลได้ ปรอทเป็นองค์ประกอบที่พบได้ตามธรรมชาติในดินและหิน ซึ่งพบมากในปิโตรเลียมและแก๊สธรรมชาติ ซึ่งปรอทสามารถพบได้หลายรูปแบบ ได้แก่ ปรอทในรูปโลหะ (Elemental mercury) ปรอทในรูปแบบอินทรีย์ (Organic mercury) และปรอทในรูปแบบอนินทรีย์ (Inorganic mercury) คุณสมบัติทางเคมี และกายภาพของปรอทแสดงดังตารางที่ 2-1 [22]

ตารางที่ 2-1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของปรอท

สมบัติทางเคมีและกายภาพ	
มวลโมเลกุล ที่ 20 องศา	13.6 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว	-38.9 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	356.6 องศาเซลเซียส
สถานะออกซิเดชัน	0 +1 และ+2
ความถ่วงจำเพาะ	13.545
ความดันไอที่ 20 องศาเซลเซียส	0.26 ปาสคาล

2.3.2 รูปแบบของปรอท

1) ปรอทในรูปโลหะ (Elemental mercury, Hg^0)

ปรอทในรูปโลหะมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง โลหะปรอทที่มีความบริสุทธิ์มากจะมีความเฉื่อยไม่มีพิษร้ายแรง แต่สามารถระเหยเข้าสู่บรรยากาศได้

2) ปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic mercury compound)

ปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์จะอยู่ในรูปแบบพันธะไอออนิก เมื่อถูกออกซิไดซ์แล้วจะพบได้ 3 รูปแบบคือ Hg^0 , Hg^+ , Hg^{2+} ปรอทในรูปสารประกอบอนินทรีย์หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ เกลือของปรอทซึ่งเกิดจากการรวมตัวของปรอท และสารอื่น เกลือของปรอทมีลักษณะเป็นผงหรือผลึกสามารถละลายน้ำได้และมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา

3) สารประกอบปรอทอินทรีย์ (Organomercury compounds)

สารประกอบอินทรีย์จะอยู่ในรูปของการรวมตัวระหว่างปรอทกับธาตุคาร์บอน และธาตุอื่น ๆ ซึ่งมีความเป็นพิษมาก สามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบทั้งสารประกอบเชิงเดี่ยว เช่น สารประกอบเมทิล (Methyl mercury, CH_3Hg) และสารประกอบเชิงคู่ เช่น ไดเมทิลเมอร์คิวรี (Dimethyl mercury, $(CH_3)_2Hg$)

โดยส่วนใหญ่รูปแบบปรอทที่พบมากในคอนเดนเสทคือ ปรอทในรูปโลหะ และปรอทในรูปแบบสารประกอบอินทรีย์ที่มีจุดเดือดเทียบได้กับช่วงของคอนเดนเสท ตัวอย่างรูปแบบปรอทตามช่วงจุดเดือดของคอนเดนเสท [23] แสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างรูปแบบปรอทตามช่วงจุดเดือดของคอนเดนเสท

รูปแบบปรอท	สูตรโมเลกุล	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
Dimethyl mercury	Hg (CH ₃) ₂	96
Diethyl mercury	Hg (C ₂ H ₅) ₂	159
Di-isopropyl mercury	Hg (iC ₃ H ₇) ₂	170
Dipropyl mercury	Hg (C ₃ H ₇) ₂	190
Dibutyl mercury	Hg (C ₄ H ₉) ₂	206
Metallic mercury	Hg ⁰	357

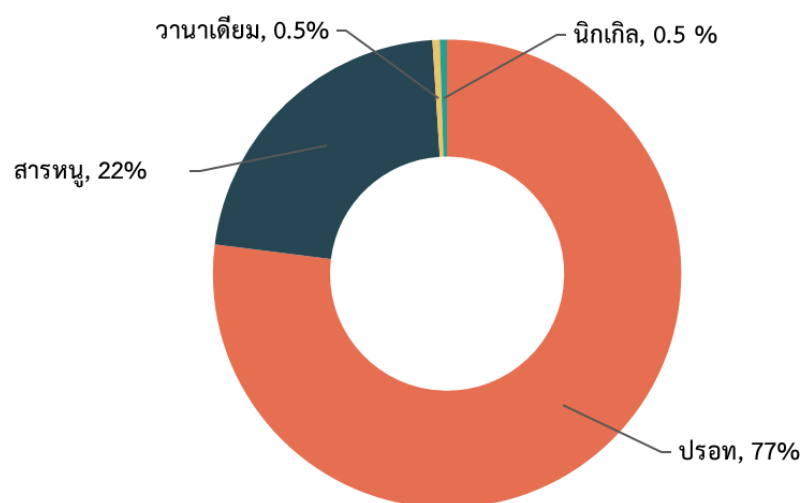
2.3.3 อันตรายของปรอท

ปรอทเป็นธาตุที่สามารถพบได้ในธรรมชาติและมีความอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โดยสามารถแบ่งลักษณะความเป็นอันตรายได้ 2 ชนิด ได้แก่ อันตรายชนิดเฉียบพลัน มักเกิดจากการสูดดมเข้าไปในปริมาณที่มากทันที จะเกิดอาการปวดศีรษะ ไอ ต่อมาจะเริ่มมีอาการเป็นไข้ หายใจไม่สะดวก ปากเปื่อย และเป็นแผลอักเสบ บางรายที่เป็นในขั้นรุนแรงเฉียบพลันอาจมีอาการปอดบวม และหลอดลมอักเสบเฉียบพลัน ลักษณะความเป็นอันตรายชนิดที่ 2 คือ อันตรายชนิดเรื้อรัง โดยพิษเหล่านั้นจะสะสมอยู่ในร่างกายเป็นเวลานาน จึงค่อย ๆ แสดงอาการออกมาให้เห็น เช่น น้ำลายมีกลิ่นมากกว่าปกติ ปวดบริเวณเหงือกและฟัน เลือกออกได้ง่าย ลำไส้ใหญ่เกิดอาการอักเสบ เกิดอาการคัน และกระดูกของกล้ามเนื้อเป็นประจำบริเวณเปลือกตา ลิ้น ริมฝีปาก หรือนิ้วมือมาแบบเป็นช่วง ๆ อาการเปลี่ยนแปลงง่าย เก็บอาการไม่ค่อยอยู่ โดยปรอทสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ [24]

- 1) ทางการหายใจ การหายใจสูดดมหรือไอปรอทเข้าสู่ร่างกาย เนื่องจากปรอทสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่ายส่วนมากแล้วเมื่อสูดดมเข้าไปก็จะตกค้างอยู่บริเวณจมูก
- 2) ทางปาก การรับประทานปรอทโดยตรงนั้นมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก มักจะเกิดจากรับประทานน้ำและอาหารพืชผักผลไม้ที่มีสารปนเปื้อนปรอทเข้าสู่ร่างกาย
- 3) ทางผิวหนัง การรับสารปรอทเข้าสู่ผิวหนังเกิดจากการสัมผัสผงหรือไอของปรอทสู่ผิวหนังเมื่อเกิดการดูดซึมเข้าสู่ผิวหนังจะมีอาการระคายเคือง คัน บวม ส่วนมากจะพบกับคนที่ต้องทำงานในพื้นที่ที่มีสารปรอท

2.4 ปริมาณปรอทและโลหะหนักอื่นๆในคอนเดนเสท

ในคอนเดนเสทจะประกอบด้วย ไฮโดรเจน คาร์บอนหลายอะตอม เฮทเทอโรอะตอมเช่น ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และ โลหะหนัก [25] จากข้อมูลที่ได้รับจากบริษัท วีระสุวรรณ จำกัด พบว่ามีการปนเปื้อนของปรอทและโลหะอื่นๆ ดังนี้ ปรอท (77%) สารหนู (22%) วานาเดียม (0.5%) นิกเกิล (0.5%) แสดงดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 แผนภูมิแสดงปริมาณปรอทและโลหะหนักอื่นๆที่ปนเปื้อนในคอนเดนเสท

2.5 อันตรายจากการปนเปื้อนปรอทในคอนเดนเสท

2.5.1 อันตรายต่อวัสดุและอุปกรณ์ในกระบวนการการผลิต

การปนเปื้อนของปรอทในคอนเดนเสทเป็นอันตรายต่อวัสดุอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต คือ การกัดกร่อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของปรอทกับอะลูมิเนียม และแตกร้างจากความเครียด ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงจำนวนมากกรณีที่ร้ายแรงที่สุดต้องหยุดการดำเนินการการผลิตเพื่อทำการซ่อมบำรุง โดยส่วนมากมักจะพบปัญหานี้ที่อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และอีกหนึ่งอันตรายต่อวัสดุและอุปกรณ์ในการผลิตคือ การเสื่อมประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ในกระบวนการผลิตอะโรมาติกจากคอนเดนเสทที่ดำเนินการด้วยปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) จะต้องดำเนินการด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา หากมีการปนเปื้อนของปรอทกับตัวเร่ง

ปฏิกิริยาจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพเร็วขึ้นทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการในการฟื้นฟูตัวเร่งปฏิกิริยา (Regeneration) [2, 23]

2.5.2 อันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน

ปรอทเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานผ่านการสัมผัสโดยตรงหรือสูดดมไอปรอทเข้าสู่ร่างกายทางระบบทางเดินหายใจ และการซึมผ่านทางผิวหนัง เมื่อได้รับปรอทเข้าสู่ร่างกายแล้วจะเกิดอาการเคืองต่อผิวหนัง และเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ โดยลักษณะอาการแบบเฉียบพลันมีผลต่อปอด ทำให้ปอดอักเสบ หลอดลมอักเสบ ไอ หอบเหนื่อย แน่นหน้าอก การสัมผัสที่ความเข้มข้นต่ำเป็นระยะเวลานานทำให้เกิดอาการที่ซับซ้อน ซึ่งมีอาการแตกต่างกันในแต่ละบุคคลเริ่มด้วยอาการอ่อนเพลีย เบื่ออาหาร น้ำหนักลด ง่วงนอน อาหารไม่ย่อย มีรสโลหะในปากหรือคอ เหงือกบวม มีเส้นสีดำที่เหงือก ความจำเสื่อม นิ้วมือ หนึ่งตา ริมฝีปากสั่น อาการแบบเรื้อรัง เกิดได้กับระบบอวัยวะที่สำคัญ ได้แก่ ความผิดปกติของระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายอาการพิษต่อระบบประสาทส่วนกลางอย่างเรื้อรัง มักพบอาการ สั่น หลงลืม อารมณ์เปลี่ยนแปลง และระบบการทำงานของไตผิดปกติมีภาวะไตวายเรื้อรัง [26-28]

2.5.3 อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

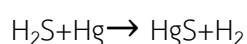
อันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเป็นผลต่อเนื่องจากความเสียหายของอุปกรณ์จากการกัดกร่อนของวัสดุก่อให้เกิดกากตะกอนของเสียโดยสารเหล่านี้สามารถเข้าสู่วัฏจักรสิ่งแวดล้อม และห่วงโซ่อาหารได้ง่าย และการเผาคอนเดนเสทที่ยังไม่ได้รับการกำจัดปรอทนำไปสู่การปลดปล่อยมลพิษสู่อากาศทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศตามมา [23, 27]

2.6 กระบวนการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

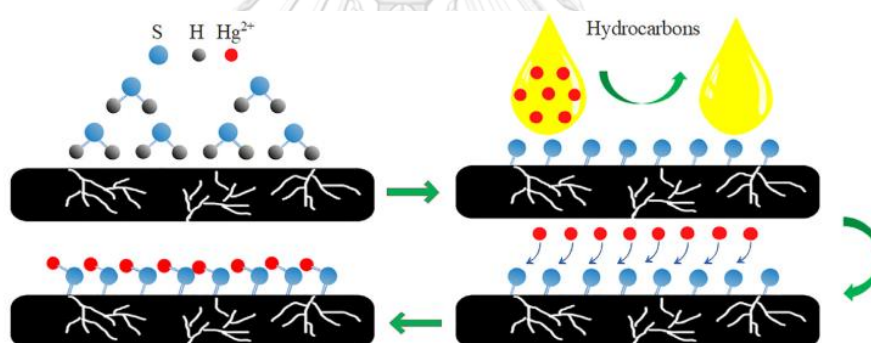
เนื่องจากการปนเปื้อนของปรอทในคอนเดนเสทส่งผลกระทบต่อในหลายด้าน เช่น ปัญหาด้านวัสดุและอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตที่เสียหาย ปัญหาด้านสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ปัญหาในด้านสิ่งแวดล้อมดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสท โดยกระบวนการทั่วไปที่นำมาใช้ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทคือ กระบวนการดูดซับ กระบวนการกรอง สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการนำระบบเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวงมาประยุกต์ใช้ซึ่งได้เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบดังแสดงดังตารางที่ 2-3

2.6.1 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับปรอทออกจากคอนเดนเสท โดยการเลือกตัวดูดซับที่มีความเลือกเฉพาะกับปรอท เช่นตัวดูดซับถ่านกัมมันต์และตัวดูดซับในกลุ่มเมทัลซัลไฟด์ บางครั้งจะเพิ่มการทำปฏิกิริยาร่วมด้วยเพื่อให้เกิดสถานะที่เหมาะสมในการแยกปรอทจากคอนเดนเสท การเพิ่มกระบวนการนี้ขึ้นเพราะโดยส่วนมากในอุตสาหกรรมมักเลือกใช้ตัวดูดซับที่เลือกเฉพาะกับธาตุปรอท จึงต้องทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนรูปแบบของปรอทที่อยู่ในรูปแบบสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปแบบของโลหะปรอท เพื่อให้ง่ายต่อการกำจัดต่อไป [9] โดยส่วนมากมักจะทำปฏิกิริยาร่วมกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังสมการที่ (2.1) ภาพตัวอย่างกระบวนการการดูดซับปรอทออกจากไฮโดรคาร์บอนซึ่งทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อน และดูดซับปรอทโดยตัวดูดซับที่มีความเลือกเฉพาะกับปรอท (ไบโอชาร์) แสดงดังภาพที่ 2-4 [6]



(2.1)



ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างกระบวนการการดูดซับปรอทออกจากไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวดูดซับที่มีความเลือกเฉพาะกับปรอท

2.6.2 กระบวนการกรอง

กระบวนการกรองเป็นวิธีที่ง่ายสามารถกรองได้โดยตรงและไม่ซับซ้อนแต่มีข้อจำกัดโดยสามารถกรองแยกปรอทได้เฉพาะในรูปสารปรอทเท่านั้นไม่สามารถกำจัดปรอทในรูปแบบสารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบอนินทรีย์ได้ [3]

ตารางที่ 2-3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละกระบวนการแยกโปรตีนออกจากคอนเดนเสท

กระบวนการกำจัดโปรตีน	ข้อดี	ข้อเสีย	อ้างอิง
กระบวนการดูดซับ	- ประสิทธิภาพในการกำจัดโปรตีนสูง - สามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้	- ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง - ใช้พลังงานสูงต้องดำเนินการที่อุณหภูมิสูง - มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาตัวเร่งปฏิกิริยา	[6]
กระบวนการกรอง	- ดำเนินการง่ายไม่ซับซ้อน - ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ	- ไม่สามารถกำจัดโปรตีนในรูปแบบสารอินทรีย์ได้โดยตรง	[28]
เทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวง	- สามารถสกัดไอออนของโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำได้ - ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ	- ต้องมีกระบวนการกำจัดสารขั้นต้นก่อนเช่น การกำจัดสารคอลลอยด์และแขวนลอย	[29, 30]

2.7 ระบบการสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นกระบวนการสกัดพื้นฐานเพื่อสกัดหรือแยกสารเป้าหมายซึ่งอาจเป็นผลิตภัณฑ์ หรือสิ่งปนเปื้อนออกจากสารผสม ระบบประกอบด้วยสารละลาย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไม่ละลายซึ่งกันและกันได้แก่ สารละลาย และสารอินทรีย์ซึ่งอาจประกอบด้วยสารสกัด (Extractant) และตัวทำละลาย (Solvent) เมื่อเขย่าหรือปั่นกวนทั้งสองสารเข้าด้วยกันทำให้สารเป้าหมายทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มีความเลือกเฉพาะกับสารเป้าหมายเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและถ่ายโอนเข้าไปอยู่ในวัฏภาคอินทรีย์ ด้วยศักยภาพทางเคมีจนเข้าสู่สภาวะสมดุล [31, 32]

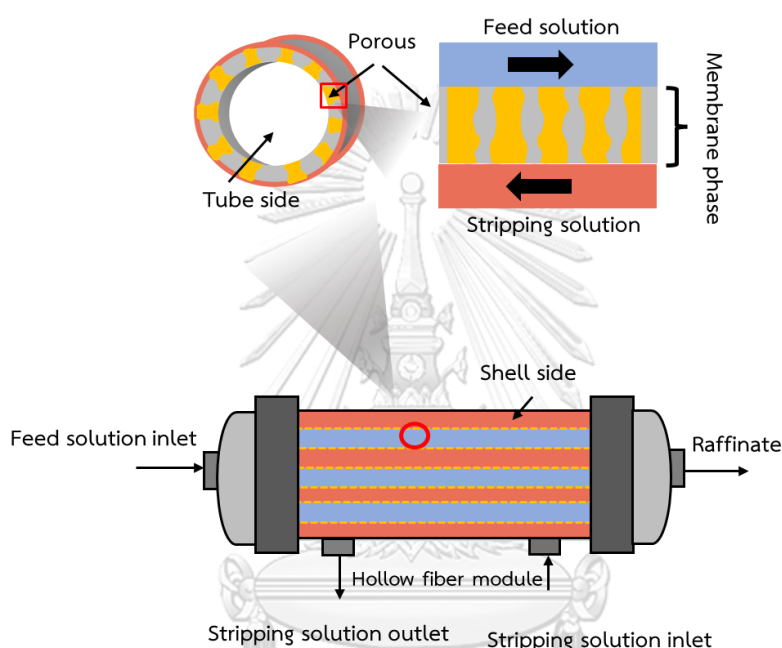
2.7.1 การสกัดและนำกลับไอออนของโลหะด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

การแยกไอออนโลหะด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การสกัด และการนำกลับ

2.7.1.1 ขั้นตอนการสกัด (Extraction process)

ไอออนของโลหะอยู่ในวัฏภาคสารละลาย และสารสกัดจะอยู่ในวัฏภาคอินทรีย์ ขั้นตอนการสกัดด้วยตัวทำละลายดำเนินการด้วยการใส่สารอินทรีย์หรือสารสกัด หรือสารสกัดที่

แบบท่อ (Tubular) และเยื่อแผ่นเหลวแบบม้วน (Spiral wound) โดยลักษณะเด่นของโมดูลเส้นใยกลวง คือมีพื้นที่การถ่ายเทมวลที่สูงเพราะมีช่องว่างน้อย มีอัตราส่วนต่อปริมาตรสูง ข้อเสียคือต้องบำบัดสารป้อนในขั้นต้นก่อนเพื่อกำจัดสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่ทำให้เกิดการอุดตันในโมดูลเส้นใยกลวงได้ [33] ลักษณะของโมดูลเส้นใยกลวงแสดง ดังภาพที่ 2-6 โมดูลเส้นใยกลวงสามารถนำมาใช้ได้หลายรูปแบบเช่น ระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง และ ระบบเมมเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

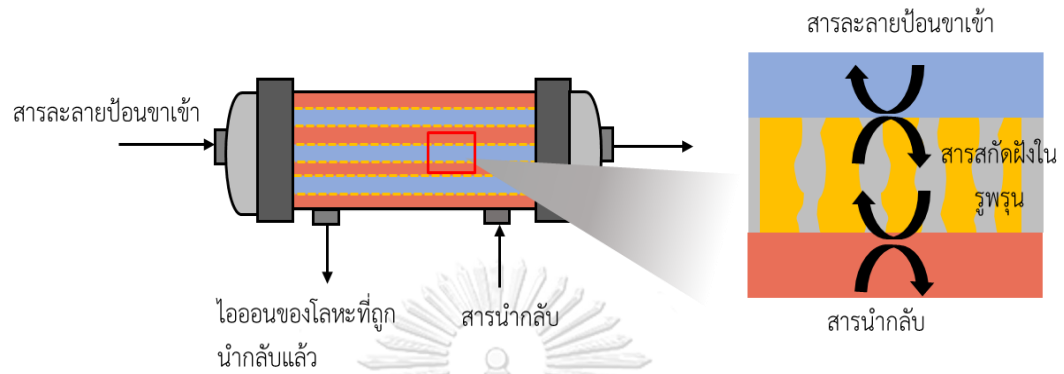


ภาพที่ 2-6 ลักษณะของโมดูลเส้นใยกลวง

2.8.1 การสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นที่เหลวพุงด้วยเส้นใยกลวงจะมีตัวรองรับ หรือสารสกัดถูกตรึงภายในรูพรุนทั้งหมดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ สามารถสกัดและนำกลับได้ใน 1 โมดูล โดยขั้นตอนการสกัดต้องเตรียมเยื่อแผ่นเหลวในเส้นใยกลวง โดยป้อนเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นสารสกัดหรือสารสกัดผสมด้วยตัวทำละลายเข้าสู่ในรูพรุนของเส้นใยกลวงชนิดไม่ชอบน้ำเพื่อตรึงแผ่นเหลวไว้ และจึงดำเนินการป้อนสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อไอออนของสารที่ต้องการสกัดแพร่เข้าสู่เยื่อแผ่นเหลวจึงเกิดการสกัดขึ้นเยื่อแผ่นเหลวจะคัดเลือกเฉพาะไอออนของสารที่ต้องการแยกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน และสารละลายนำกลับที่ถูกป้อนในทิศทางตรงกันข้ามทำ

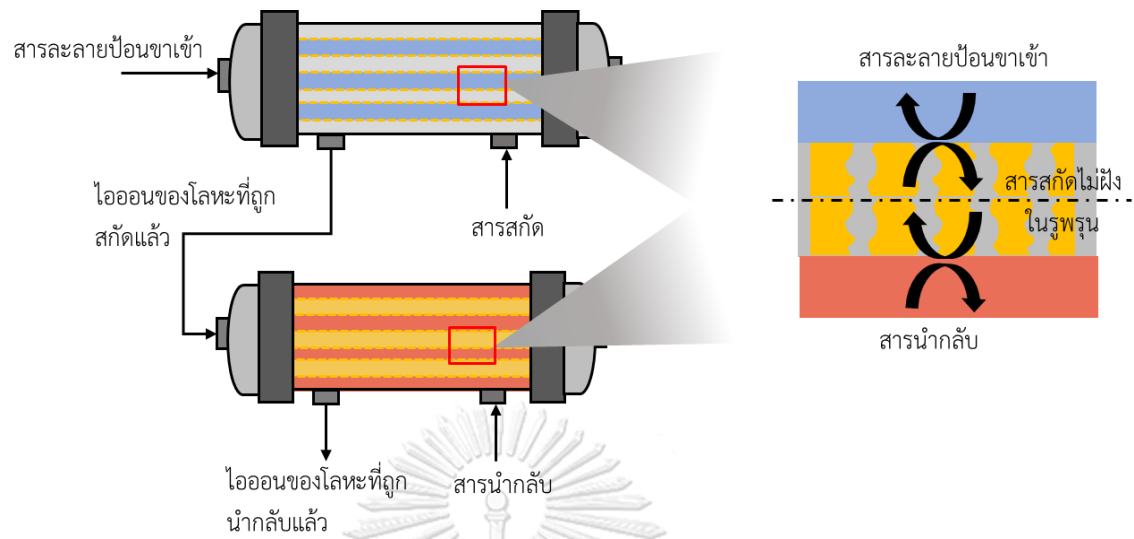
หน้าที่นำกลับไอออนของสารที่ต้องการแยกในสารสกัดให้ถ่ายโอนอยู่ในสารละลายนำกลับเพื่อให้ง่ายต่อการกำจัด และการนำสารสกัดกลับมาใช้ใหม่ โมดูลการสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงแสดงดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 การสกัดด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

2.8.2 การสกัดด้วยตัวระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

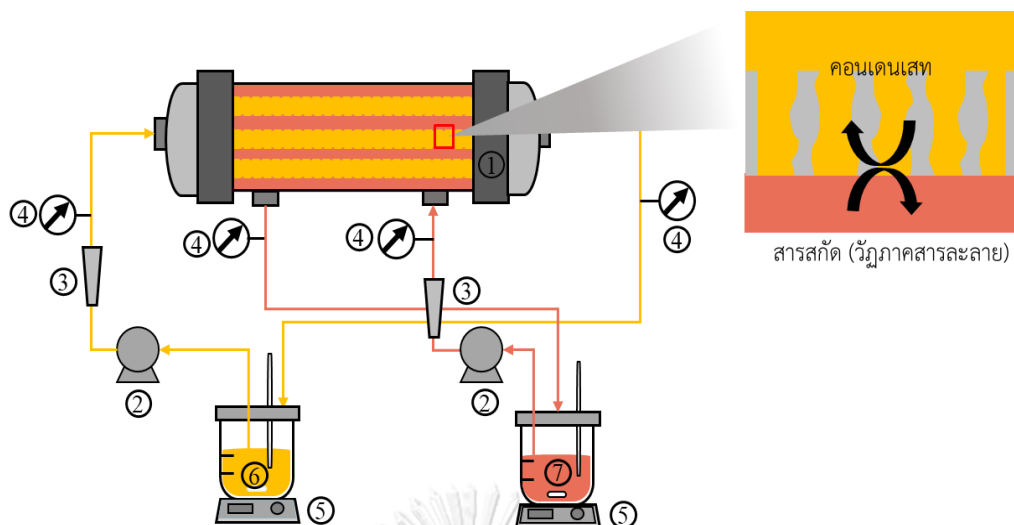
สำหรับระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์สารสกัดจะอยู่ภายในรูพรุนบางส่วน และสารสกัดอีกส่วนสามารถเคลื่อนที่ได้ โดยขั้นตอนการสกัดด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์จะแบ่งเป็น 2 โมดูล โดยโมดูลที่ 1 ใช้สำหรับการสกัดและโมดูลที่ 2 ใช้สำหรับการนำกลับ กลไกการสกัดในโมดูลที่ 1 เกิดขึ้นเหมือนระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง แต่ไอออนของสารที่ต้องการสกัดจะแพร่ผ่านจากผนังด้านในไปยังผนังด้านนอกจนเข้าสู่โมดูลที่ 2 ที่ทำหน้าที่นำกลับแพร่ต่อไปสู่ผนังด้านในจึงเกิดการนำกลับขึ้น ส่วนสารสกัดไหลวนกลับเข้าสู่ระหว่าง 2 โมดูลเรื่อย ๆ เพื่อแก้ไขระบบให้ดำเนินการได้อย่างต่อเนื่องไม่ต้องหยุดเพื่อเติมสารสกัดในรูพรุน โดยกลไกการเกิดปฏิกริยานั้นจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ผิวสัมผัส (Interface) ระบบการสกัดด้วยเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ แสดงดังภาพที่ 2-8 [16, 34]



ภาพที่ 2-8 โมดูลการสกัดเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

2.9 การประยุกต์ใช้ระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทตามทฤษฎีของการสกัดด้วยตัวทำละลาย

เนื่องจากคอนเดนเสทเป็นสารป้อนที่อยู่ในวัฏภาคน้ำมัน วัฏภาคของสารละลายป้อนได้เปลี่ยนไปจึงนำทฤษฎีจากระบวนการการสกัดด้วยระบบเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในโมดูลที่ 2 ที่ใช้สำหรับการนำกลับมาประยุกต์ใช้ตามหลักทฤษฎีของการสกัดด้วยตัวทำละลาย คือการถ่ายโอนไอออนของโลหะจากวัฏภาคหนึ่งสู่อีกวัฏภาค ซึ่งนำมาเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสโดยการใส่ระบบเส้นใยกลวงมาประยุกต์ใช้ โดยกระบวนการนี้จะไม่มีการฝังสารสกัดใด ๆ ในรูพรุน ให้สารละลายป้อนคอนเดนเสทไหลเข้าสู่เส้นใยกลวงผ่านด้านท่อ ด้วยคุณลักษณะเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำจะนำคอนเดนเสทเข้าไปที่รูพรุน สารสกัดในวัฏภาคน้ำป้อนเข้าสู่ระบบในด้านเปลือกโดยการสกัดจะเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวของสารสกัดและคอนเดนเสท การเคลื่อนที่ของไอออนของโลหะจากวัฏภาคของสารป้อนไปยังวัฏภาคของสารสกัดโดยหลักอาศัยหลักการถ่ายเทมวล การประยุกต์ใช้โมดูลเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทแสดงดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 การประยุกต์ใช้ไมดูลเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในการแยกโปรตีนออกจากคอนเดนเสท (1) ไมดูลเส้นใยกลวง (3) เครื่องวัดอัตราการไหล (4) มาตรวัดความดัน (5) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (6) สารป้อน (คอนเดนเสท) (7) สารสกัด (วิฎภาคสารละลาย)

2.10 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Experiment)

การทดลองโดยใช้ปัจจัยในการทดลองโดยใช้ปัจจัยในการทดลองมากกว่าหรือเท่ากับ 2 ปัจจัยโดยแต่ละปัจจัยมีการแบ่งออกเป็นปัจจัยย่อย ๆ ได้อีกหลายระดับ จะเรียกรูปแบบการทดลองในลักษณะนี้ว่า การทดลองแบบแฟกทอเรียล การทดลองแฟกทอเรียล คือการทดลองที่มีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือ อันตรกิริยา (Interactions) เช่น ผลกระทบหลัก ผลกระทบของปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย เป็นต้น [35] ซึ่งการออกแบบวิธีการทดลองลักษณะนี้ทั้งข้อดีและข้อเสียซึ่งแสดงดังตารางที่ 2-4 [36]

ตารางที่ 2-4 ตารางเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการออกแบบวิธีการทดลองแบบแฟกทอเรียล

ข้อดี	ข้อเสีย
- สามารถศึกษาได้หลายปัจจัยพร้อม ๆ กัน	- หากมีปัจจัยที่ศึกษามากจะสิ้นเปลืองทรัพยากร
- ทราบถึงผลกระทบของปัจจัยร่วม	- ยากต่อการหาหน่วยทดลองที่เหมาะสมในกรณีที่มีหลายปัจจัยที่ต้องการศึกษา
	- การจัดรูปแบบซับซ้อน

2.10.1 รูปแบบการทดลองแฟกทอเรียล

2.10.1.1 การทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment)

การทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบมักจะนำมาใช้ศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปได้ทุกกรณี สามารถศึกษาผลกระทบหลัก (Main effect) และผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) โดยจำนวนการทดลองจะเท่ากับ a^k โดยที่ a คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ต้องการศึกษา k คือ จำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษา ยกตัวอย่างเช่นการศึกษาแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 3^3 ซึ่งหมายความว่า 3^3 คือ จำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษา 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยศึกษา 3 ระดับ ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองทั้งหมด 27 การทดลองโดยไม่รวมการทำซ้ำ

2.10.1.2 การทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment)

การทดลองแฟกทอเรียลบางส่วนมักนำมาใช้ในกรณีที่มีเวลา งบประมาณ และทรัพยากรที่ใช้ในการทดลองจำกัด ซึ่งจะลดจำนวนของการทดลองลง โดยทั่วไปมักนิยมศึกษา 2 ระดับของปัจจัยศึกษา โดยจำนวนการทดลองจะเท่ากับ 2^{k-1} สามารถศึกษาผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมได้ตามที่ต้องการ แต่อาจไม่ศึกษาทดลองทั้งหมด จะทำการทดลองเพียงบางส่วนเท่านั้น เช่น $1/2$ หรือ $1/4$ ของการทดลองทั้งหมดเพื่อให้เข้าใจความแตกต่างของตัวแบบการทดลองข้างต้นได้ง่ายขึ้น

2.11 การคำนวณตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์

อุณหพลศาสตร์ เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของปริมาณความร้อน การเปลี่ยนรูปของปริมาณความร้อน การอนุรักษ์พลังงานของระบบต่างรวมไปถึงการศึกษาด้านต่างๆ เกี่ยวกับพลังงาน เช่น ศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ค่าการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานเอนทัลปี ค่าการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานเอนโทรปี และ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของแวนฮอฟ (Van's hoff equation) [37, 38] ดังสมการที่ (2.2) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_{ex}$ และ $1/T$ ซึ่งพิจารณาค่า ΔH° และ ΔS° ได้จากค่าความชัน และเส้นจุดตัดของสมการเส้นตรงของกราฟจากนั้นนำค่า ΔH° และ ΔS° แทนค่าเพื่อคำนวณ ΔG° ในสมการที่ (2.3)

$$\ln K_{ex} = -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (2.2)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.3)$$

โดยที่ $K_{ex} = [M]/[M_E]$

เมื่อ $[M]$ คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ละลายอยู่ในสารป้อน ณ เวลาสมมูล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$[M_E]$ คือ ความเข้มข้นของโลหะเชิงซ้อนที่ละลายอยู่ในสารสกัด ณ เวลาสมมูล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

R คือ ค่าคงตัวของก๊าซ (0.008314 กิโลจูลต่อโมล-เคลวิน)

T คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (เคลวิน)

2.12 การคำนวณสัมประสิทธิ์ของการสกัดเสริมฤทธิ์

การสกัดแบบเสริมฤทธิ์ คือการเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดโดยการรวมตัวกันของสารสกัดมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปโดยค่าการชี้วัดประสิทธิภาพของการเสริมฤทธิ์สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การสกัดแบบเสริมฤทธิ์โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) - (2.5) หากมีค่าสัมประสิทธิ์ของสารเสริมฤทธิ์น้อยกว่า 0 หมายถึงการสกัดด้วยการรวมตัวกันของสารสกัดนั้น ๆ ไม่ส่งผลต่อการสกัดแบบเสริมฤทธิ์การรวมตัวของสารเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการเสริมฤทธิ์ต้องมีสารสกัดหนึ่งทำหน้าที่เป็นสารสกัดหลักในปฏิกิริยา และสารที่เหลือทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกับไอออนของโลหะเพื่อช่วยให้เกิดการเสริมฤทธิ์ของสารสกัด [30]

$$R = D_{\max} / D_{AB} + D_B \quad (2.4)$$

$$D = [M]/[M_A] \quad (2.5)$$

เมื่อ R คือ สัมประสิทธิ์ของการสกัดเสริมฤทธิ์

D_{\max} คือ อัตราส่วนการกระจายตัวมากที่สุดของสารสกัดเสริมฤทธิ์

D_A คือ อัตราส่วนการกระจายตัวของสาร A

D_B คือ อัตราส่วนการกระจายตัวของสาร B

$[M]$ คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ละลายอยู่ในสารป้อน ณ เวลาสมมูล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$[M_E]$ คือ ความเข้มข้นของโลหะเชิงซ้อนที่เหลืออยู่ในสารสกัด ณ เวลาสมมูล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.13 การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสำหรับสำหรับระบบการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสำหรับสำหรับระบบการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์สามารถคำนวณได้จากสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Permeability coefficient) [39] ดังสมการของ Danesi [40]:

$$-V_f \ln \frac{C_t}{C_0} = A_E P \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_{i+1}} \right) t \quad (2.6)$$

$$\text{โดยที่ } \alpha_i = \frac{Q}{P L \epsilon \pi N r_i}$$

เมื่อ	C_0	คือ	ความเข้มข้นเริ่มต้นของปรอทในคอนเดนเสท (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	C_t	คือ	ความเข้มข้นเริ่มต้นของปรอทในคอนเดนเสทที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	P	คือ	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เซนติเมตรต่อวินาที)
	L	คือ	ความยาวของโมดูล (เซนติเมตร)
	ϵ	คือ	ความพรุนของเส้นใยกลวง
	N	คือ	จำนวนเส้นใยกลวงในโมดูล
	r_i	คือ	รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสัมพันธ์กันกับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในแต่ละวัฏภาคสามารถแสดงได้ดังนี้ [34, 38, 41]:

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{k_f} + \frac{r_i}{r_{lm} P_m} + \frac{r_i}{r_0 k_s} \quad (2.7)$$

$$\text{โดยที่ } r_{lm} = \frac{r_0 - r_i}{\ln \left(\frac{r_0}{r_i} \right)} \quad (2.8)$$

เมื่อ P_m คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลว (เซนติเมตรต่อวินาที)

- k_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวลของไอออนในสารละลายป้อน(เซนติเมตรต่อวินาที)
 k_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวลของไอออนในด้านเปลือก (เซนติเมตรต่อวินาที)
 r_{lm} คือ รัศมี Log-mean ของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
 r_0 คือ รัศมีภายในของเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)

การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวลในระบบเมมเบรนคอนแทกเตอร์ที่มีสารป้อนเป็นคอนเดนเสทซึ่งอยู่ในวัฏภาคอินทรีย์จะแตกต่างกับระบบดั้งเดิมที่มักจะมีสารป้อนเป็นวัฏภาคสารละลาย ดังนั้นสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวลของไอออนในสารละลายป้อนได้ตามสมการ Lévêsqe ซึ่งพิจารณาในระบบที่มีการไหลในท่อของสารละลายป้อนแบบราบเรียบ [19] โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของไอออนโปรทในคอนเดนเสทสามารถหาจากสมการของ Wilke-Chang [42] จากการคำนวณพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทมวลของไอออนในสารละลายป้อน (k_f) เปลี่ยนเป็นค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานในสารละลายป้อน (R_f) ซึ่งมีความสัมพันธ์คือเป็นส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานในสารละลายป้อน เท่ากับ 1.11×10^{-4} วินาทีต่อเซนติเมตร ซึ่งมีค่าน้อยมาก สามารถละทิ้งได้ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลผ่าน HFMC จึงพิจารณาจากสมการ (2.9)

$$\frac{1}{P} = \frac{r_i}{r_{lm}P_m} + \frac{r_i}{r_0k_s} \quad (2.9)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเมมเบรน (P_m) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ดังสมการที่ (2.10) เมื่อจัดรูปจากค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย D จะได้สมการการหาค่าสัมประสิทธิ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเมมเบรน (k_m) และในด้านเปลือก (k_s)

$$P_m = Dk_m \quad (2.10)$$

2.14 การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่ และลักษณะปฏิกิริยาในการแยกโปรทออกจากคอนเดนเสทโดยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

2.14.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่

การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่สำหรับระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ถูกนำมาปรับใช้ให้เหมาะสม โดยพัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Wongsawa และคณะ [43] ซึ่งจะพิจารณาในส่วนการแพร่เป็นหลัก ขั้นตอนการกำจัดโปรทที่เกิดขึ้นในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: โปรทที่อยู่ในวัฏภาคอินทรีย์ ($[C_6H_5HgCl]$) ถ่ายโอนจากตำแหน่งสารละลายป้อน (Bulk feed) สู่อำนาจผิวสัมผัสระหว่างสารละลายป้อน-เมมเบรน (Feed-Membrane interface) และแพร่ต่อเนื่องเข้าไปที่เมมเบรนจนถึงผิวสัมผัสระหว่างเมมเบรน-ด้านเปลือก (Membrane-Shell interface)

ขั้นตอนที่ 2: ปฏิกิริยาการกำจัดโปรทเกิดขึ้นที่ตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างเมมเบรน-ด้านเปลือก (Membrane-Shell interface) จึงเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโปรทขึ้น ($[NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg]_{msi}$)

ขั้นตอนที่ 3: สารสกัดสำหรับงานวิจัยนี้คือ สารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริก และไทโอยูเรียซึ่งเข้ามาในระบบทางด้านเปลือกของเมมเบรน (Shell side) ไทโอยูเรียจะได้รับโปรตอนด้วยกรดไฮโดรคลอริก และทำปฏิกิริยากับไอออนของโปรทเพื่อให้ได้สารประกอบเชิงซ้อน ($[NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg]_{msi}$) ต่อมาสารประกอบเชิงซ้อนจะเคลื่อนตัวไปยังด้านเปลือกการกำจัดโปรทถือเป็นอันสิ้นสุด ($[NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg]_s$)

อ้างอิงจากขั้นตอนที่ 1 ของการกำจัดโปรทที่เกิดขึ้นในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ความเข้มข้นของโปรท ณ ตำแหน่งสารละลายป้อนและตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างตำแหน่งสารละลายป้อน-เมมเบรนจะมีค่าเท่ากัน [44] ดังนั้นฟลักซ์ของการแพร่ของโปรทใน วัฏภาคเมมเบรน และด้านเปลือกจะแสดงดังสมการที่ (2.11) – (2.12)

$$J_m R_m = [C_6H_5HgCl]_{fmi} - [NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg]_{msi} \quad (2.11)$$

$$J_s R_s = [NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg]_{msi} - [NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg]_s \quad (2.12)$$

เนื่องจากในระบบนี้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างเมมเบรน-ด้านเปลือกสารประกอบเชิงซ้อนของปรอทจะเกิด ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทันทีทันใด (Instantaneous reaction) ดังนั้น ณ ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของปรอทเท่านั้นและจะถ่ายโอนเข้าสู่ด้านเปลือกจากความสัมพันธ์นี้จึงนำมาเขียนค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาได้ดังนี้ (K_{ex})

$$K_{ex} = \frac{[\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}][\text{Cl}^-]}{[\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}][\text{NH}_2\text{CSNH}_2]} \quad (2.13)$$

จัดรูปจากความสัมพันธ์ของค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปของฟลักซ์ของปรอทในด้านเปลือก (J_s) แสดงดังสมการ (2.14)

$$J_s R_s = \frac{K_{ex} [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}][\text{NH}_2\text{CSNH}_2]}{[\text{Cl}^-]} - \frac{[\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}]_s}{R_s} \quad (2.14)$$

สำหรับระบบนี้จะตั้งสมมติฐานว่าปฏิกิริยาที่อยู่ในสภาวะคงที่ (Pseudo steady state) ดังนั้นจึงให้ฟลักซ์ ณ ตำแหน่งฟลักซ์ของปรอทในวัฏภาคเมมเบรนและฟลักซ์ของปรอทในด้านเปลือกมีค่าเท่ากัน ($J_m = J_s = J$) จัดรูปสมการโดยใช้ความสัมพันธ์ของค่าคงที่สมดุลในสมการที่ (2.13) ร่วมด้วยจะได้สมการที่ (2.15)

$$J = \frac{[\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi} K_{ex} [\text{NH}_2\text{CSNH}_2] + \frac{[\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}]_s [\text{Cl}^-]}{R_m}}{R_m K_{ex} [\text{NH}_2\text{CSNH}_2] + R_s [\text{Cl}^-]} \quad (2.15)$$

ใช้ความสัมพันธ์ของสารกำหนดปริมาณในสารละลายป้อนต่อการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แทนในสมการที่ (2.13) จากนั้นจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปสมการที่ (2.16)

$$[\text{NH}_2\text{CSNH}_2] = \frac{[\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_0 [\text{Cl}^-]}{K_{ex} [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi} - J_m R_m} \quad (2.16)$$

แทนสมการที่ (2.16) ในสมการที่ (2.15) จะได้สมการกำลังสองดังนี้

$$J^2 R_s R_m - J (R_m [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}]_s) + R_s [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi} + R_m [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_0 [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi} + ([\text{NH}_2\text{CSNH}_2] [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}]_s) = 0 \quad (2.17)$$

เมื่อแก้สมการกำลังสอง พลิกซ์โดยรวมของไอออนของปรอทแสดงดังสมการที่ (2.18)

$$J = \frac{R_m [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}] + R_s [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi} + R_m [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_0}{2R_s R_m} \pm \sqrt{\frac{R_m [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}] + R_s [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi}^2 - 4R_s R_m [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi} + [\text{NH}_2\text{CSNH}_2] + [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}]_s}{2R_s R_m}} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) ให้สมมุติฐานดังนี้

$$\lllllll J = \frac{R_m [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}] + R_s [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi} + R_m [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_0}{2R_s R_m} \pm \sqrt{\frac{R_m [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}] + R_s [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi}^2 - 4R_s R_m [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi} + [\text{NH}_2\text{CSNH}_2] + [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}]_s}{2R_s R_m}} \quad (2.19)$$

ดังนั้น

$$\pm \sqrt{\frac{R_m [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}] + R_s [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi}^2 - 4R_s R_m [\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi} + [\text{NH}_2\text{CSNH}_2] + [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}]_s}{2R_s R_m}}$$

สามารถละทิ้งได้แสดงดังสมการที่ (2.20)

$$J = \frac{[\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi}}{2R_m} + \frac{[\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_0 + [\text{NH}_2\text{CSNH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}]_s}{2R_s} \quad (2.20)$$

แทนสมการที่ (2.20) ในสมการ Fick's law of diffusion แสดงดังสมการที่ (2.21)

$$J = \frac{-V_f}{A_E} \frac{d[\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}]_{fmi}}{dt} \quad (2.21)$$

เมื่ออินทิเกรต ณ เวลาใดๆ จะได้สมการสุดท้ายแสดงดังสมการที่ (2.22)

$$[C_6H_5HgCl]_t = \frac{R_s [C_6H_5HgCl]_0 + R_m [C_6H_5HgCl]_0 + R_m \overline{[NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg]}}{R_s} \times \exp\left(\frac{-A_E}{V_f} \frac{1}{2R_m}\right) - R_m \frac{[C_6H_5HgCl]_0 \overline{[NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg]}}{R_s} \quad (2.22)$$

เมื่อ	J_m	คือ	ฟลักซ์ของปรอทในวัฏภาคเมมเบรน (มิลลิกรัมต่อเมตร ² ·วินาที)
	J_s	คือ	ฟลักซ์ของปรอทในด้านเปลือก (มิลลิกรัมต่อเมตร ² ·วินาที)
	J	คือ	ฟลักซ์รวมของปรอท (มิลลิกรัมต่อเมตร ² ·วินาที)
	R_m	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานในวัฏภาคเมมเบรน (วินาทีต่อเซนติเมตร)
	R_s	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานในด้านเปลือก (วินาทีต่อเซนติเมตร)
	s	คือ	สัญลักษณ์ย่อของตำแหน่งด้านเปลือก
	V_f	คือ	ปริมาณของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
	A_E	คือ	พื้นที่ผิวในการกรองของโมดูลเส้นใยกลวง (ตารางเซนติเมตร)
	t	คือ	ระยะเวลาในการสกัด (วินาที)
	fmi	คือ	สัญลักษณ์ย่อของตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างสารป้อน-เมมเบรน
	msi	คือ	สัญลักษณ์ย่อของตำแหน่งผิวสัมผัสระหว่างเมมเบรน-ด้านเปลือก

2.14.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะปฏิกิริยา (Reaction flux model)

การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะปฏิกิริยาสำหรับระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ถูกนำมาปรับใช้ให้เหมาะสม โดยปรับใช้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Pancharoen และคณะ [45] ซึ่งการคำนวณแบบจำลองนี้จะพิจารณาแบบปฏิกิริยาเป็นหลักโดยการคำนวณ ณ เวลา ใดๆ จะขึ้นกับอันดับปฏิกิริยาดังนี้

กรณีปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์ ณ เวลา ใด ๆ (Zero-order reaction, $n = 0$)

$$\bar{C}_{A(L,t)} = \bar{C}_{A(0, t-\tau_0)} + k(t-\tau_0) - kt \quad (2.23)$$

เมื่อ $\bar{C}_{A(L,t)} = C_{A(L,t)} - C_{A(L,0)}$, $\bar{C}_{A(0, t-\tau_0)} = C_{A(0, t-\tau_0)} - C_{A(0,0)}$, และ $\tau_0 = \frac{LA_c}{Q}$

กรณีปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ณ เวลาใด ๆ (First-order reaction, $n = 1$)

$$\bar{C}_{A(L,t)} = e^{-\alpha} \bar{C}_{A(0, t-\tau_0)} \quad (2.24)$$

$$\text{โดย } \alpha = \frac{kA_c L}{Q}$$

กรณีปฏิกิริยาไม่ใช่อันดับที่ศูนย์และหนึ่ง ณ เวลาใด ๆ $n \neq 0, 1$

$$\bar{C}_{A(L,t)} = e^{-\beta} \bar{C}_{A(0, t-\tau_0)} \quad (2.25)$$

$$\text{โดย } \beta = \frac{A_c k n}{Q \gamma} \ln \left(\frac{\gamma L + \lambda}{\lambda} \right), \gamma = \frac{(1-n)kA_c}{Q}, \text{ และ } \lambda = C_{A(0,0)}^{(1-n)}$$

เมื่อ	C_A	คือ	ความเข้มข้นของไอออนปรอทในสารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	t	คือ	ระยะเวลาในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสท (วินาที)
	A_c	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรนเส้นใยกลวง (ตารางเซนติเมตร)
	Q	คือ	อัตราการไหลของสารละลายป้อน (ลูกบาศก์เซนติเมตรเซนติเมตรต่อวินาที)
	L	คือ	ความยาวของเมมเบรนเส้นใยกลวง (เซนติเมตร)
	r_A	คือ	อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร A (มิลลิกรัมต่อลิตร·วินาที)
	n	คือ	อันดับของปฏิกิริยา

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.15.1 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวกับสารสกัด

เนื่องจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกโลหะหนักออกจากคอนเดนเสทพบ น้อยมาก และข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ รวมถึงกลไกต่าง ๆ ในการแยกปรอทออกจาก คอนเดนเสทยังคงขาดแคลน ดังนั้นการเลือกชนิดของสารสกัดสำหรับศึกษาในการทดลอง พิจารณา จากการศึกษางานวิจัยดังต่อไปนี้โดยเลือกศึกษาสารที่เป็นกรดเบสทั่วไป และสารเสริมฤทธิ์จากหลาย กระบวนการที่นำมาใช้นำกลับปรอทออกจากสารสกัดตัวภูภาคน้ำมันดังแสดงตาราง 2-5 ซึ่งสารนำกลับ เหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการทดลองแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทและนิยามชื่อว่า สารสกัด

ตารางที่ 2-5 งานวิจัยที่ศึกษาการใช้สารกรดเบสที่นำมาใช้ในการนำกลับปรอทออกจากวัฏภาคน้ำมัน

ผู้วิจัย	สารป้อน	ไอออน โลหะ	สารนำกลับ	กระบวนการ	ร้อยละการกำจัด
Sangtumrong และคณะ [12]	น้ำเสียสังเคราะห์	Hg(II)	NaOH	HFSLM	95.00
Chakrabarty และคณะ [13]	น้ำเสียสังเคราะห์	Hg(II)	NaOH	FSSLM	95.00
Minhas และคณะ [14]	น้ำเสียสังเคราะห์	Hg(II)	DI-water	BLM	N/A
Chaturabul และคณะ [15]	น้ำทิ้ง อุตสาหกรรม ปิโตรเลียม	Hg(II)	Thiourea	HFSLM	90.11
Sribudda และคณะ [16]	น้ำทิ้ง อุตสาหกรรม ปิโตรเลียม	Hg(II)	Thiourea	HFMC	47.88
Hamzah และคณะ [17]	น้ำเสียสังเคราะห์	Hg(II)	HNO ₃	LME	N/A
Meera และคณะ [18]	น้ำเสียสังเคราะห์	Hg(II)	HCl + Thiourea	SX	99.01
Traiwongsa และคณะ [19]	น้ำเสียสังเคราะห์	Hg(II)	HCl + Thiourea	HFSLM	81.00

โดยกระบวนการ HFSLM คือ เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง, FSSLM คือ เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat sheet supported liquid membrane), BLM คือ เยื่อแผ่นเหลว (Bulk liquid membrane), HFMC คือ เมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์, LME คือ เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Liquid membrane emulsion) และ SX คือ กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

2.15.2 เอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวง

การประยุกต์ระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงมาใช้ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท จะศึกษาพัฒนาระบบจากหลักการ การสกัดด้วยตัวทำละลายซึ่งเป็นพื้นฐานของระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ (HFMC) โดยทบทวนจากเอกสารงานวิจัยดังต่อไปนี้

Sribudda และคณะ [16] ศึกษาการสกัด Hg(II) และ As(V) ออกจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมปิโตรเลียมด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ โดยแบ่งโมดูลการสกัดเป็น 2 โมดูลสำหรับการสกัดและนำกลับ โดยใช้สารสกัดคือ Aliquat 336 ศึกษาในรูปแบบการไหลสารป้อนและสารสกัดไหลวน ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัด ชนิดของสารนำกลับ (กรดไนตริก น้ำกลั่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ ไทโอยูเรีย) ความเข้มข้นของสารนำกลับ อัตราการไหล จากการทดลองพบว่าประสบความสำเร็จในการสกัดและนำกลับ Hg(II) และ As(V) โดยร้อยละการสกัดสูงถึง 100 และ 78.78 ตามลำดับ และร้อยละนำกลับสูงสุดของ Hg(II) และ As(V) คือ 47.88 และ 6.66 ตามลำดับ ด้วยสารสกัด Aliquat 336 14% (v/v) และ ไทโอยูเรียที่ความเข้มข้น 0.07 โมลต่อลิตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

Mohdee และคณะ [34] ศึกษาการแยกสารหนูออกจากน้ำเสียจากหลุมขุดเจาะปิโตรเลียมโดยเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์โดยแบ่งเป็น 2 โมดูลสำหรับการสกัด และการนำกลับสาร การแบ่งออกเป็นสองโมดูลเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบ การสกัดเป็นไปตามหลักการพื้นฐานของการสกัดด้วยตัวทำละลาย งานวิจัยนี้ศึกษาสารสกัดหลายชนิด ได้แก่ Cyanex 921 Cyanex 923 และ Aliquat 336 รวมทั้งสารสกัดเสริมฤทธิ์ ได้แก่ ชนิดรวมทั้ง ได้แก่ Cyanex 921+ Aliquat 336 และ Cyanex 923 + Aliquat 336 การทดลองใช้รูปแบบการไหลแบบสารป้อนและสารนำกลับไหลวน โดยศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของสารสกัด สัมประสิทธิ์ของสารเสริมฤทธิ์ อัตราการไหล ระยะเวลาในการสกัดและนำกลับ และได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่และแบบปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่ากระบวนการนี้ประสบความสำเร็จสามารถสกัดและนำกลับสารหนูได้ถึง 94.42 และ 78.90 โดยใช้สารสกัดคือ สารเสริมฤทธิ์ของ Aliquat 336 + Cyanex 921 ที่ความเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร และ 0.04 โมลต่อลิตร ตามลำดับ สารนำกลับ คือ ไทโอยูเรีย ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลที่ 100 มิลลิลิตร

ต่อมาที่ เวลาที่เหมาะสมในการสกัดและนำกลับที่ 60 นาที ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบปฏิกิริยา

Ambare และคณะ [46] ศึกษาการ Nd(III) จากสารละลายกรดไนตริกด้วยกระบวนการเทคโนโลยีเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ โดยใช้หลักการสกัดแบบไม่กระจายตัว (Non-dispersive solvent extraction, NDSX) ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหล ความเป็นกรดในสารป้อน ความเข้มข้นของ Nd(III) ในสารสกัด และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการทดลองพบว่า ประสบความสำเร็จในการสกัด Nd(III) ถึงร้อยละ 99.90 โดยใช้สารสกัด di-nonyl phenyl phosphoric acid (DNPPA) และ tri-n-octylphosphine oxide (TOPO) ที่ละลายใน Petrofin ความเป็นกรดไม่ส่งผลต่อการสกัดในช่วง 0.1–0.7 โมลต่อลิตร ที่ปรับด้วยกรดไนตริก อัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการดำเนินการที่ 30 นาที แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับผลการทดลอง

Juang และคณะ [36] ทำการศึกษาการแยก Co(II) และ Ni(II) ออกจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น โดยหาสภาวะที่ดีที่สุดการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยศึกษา ชนิดและความเข้มข้น ของสารสกัด (tri-n-octylamine และ Aliquat 336) และสารนำกลับ (H_2SO_4 , HCl, NaCl, สารเสริมฤทธิ์ของ NaCl and citrate) และนำมาประยุกต์ใช้ในระบบ Rotating disc contactor (RDC) เปรียบเทียบกับระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ (HFMC) ซึ่งพัฒนาระบบใหม่จากการทดลองในระบบการสกัดด้วยตัวทำละลายพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ สารสกัดที่ดีที่สุดคือ Aliquat 336 และเฟสโมดิฟายเออร์ 1-dodecanol ใน kerosene และสารนำกลับคือ 1N ของกรดไฮโดรคลอริก การทดสอบด้วยระบบ RDC หลังจากการทำงาน 1 ชั่วโมง พบว่า กรดไฮโดรคลอริกสามารถนำกลับ Co(II) จากสารสกัด Aliquat 336 เพียงสารเดียวได้ร้อยละการนำกลับที่ 60 ในเวลา 1 ชั่วโมง แต่ระบบ HFMC สามารถนำกลับ Co(II) ร้อยละ 30 ที่เวลา 5 ชั่วโมง การถ่ายเทมวลในระบบ HFMC จะช้ากว่าดังนั้นเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้จริงควรเอาชนะปัญหานี้ในระบบ HFMC

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Experimental research) เพื่อศึกษาการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท ด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ เพิ่มกระบวนการทางเลือกใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทและอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนางานวิจัยและอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต ขั้นตอนการศึกษามีรายละเอียดของสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และวิธีการทดลอง ดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างคอนเดนเสทที่นำมาศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท วีระสุวรรณ จำกัด ซึ่งความเข้มข้นของโลหะหนักต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3-1 โดยสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมดรายละเอียดชื่อสารเคมี สูตรโมเลกุล และแหล่งที่มาแสดงดังตารางที่ 3-2 โดยมีความบริสุทธิ์ในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab grade)

ตารางที่ 3-1 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆในคอนเดนเสทและวิธีการวิเคราะห์

โลหะ	ความเข้มข้นของโลหะ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	วิธีการวิเคราะห์
ปรอท	0.065-2.400	ASTM UOP938
สารหนู	0.696	ICP-MS
วานาเดียม	< 1.000	ICP-ES
สังกะสี	< 1.000	ICP-ES
นิกเกิล	< 1.000	ICP-ES

โดยที่ ASTM UOP938 คือ มาตรฐาน American Society for Testing and Materials UOP938, ICP-ES = inductively coupled plasma emission spectrometry และ ICP-MS = inductively coupled plasma mass spectrometry

ตารางที่ 3-2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วิภูภาค	ชื่อสารเคมี	สูตรโมเลกุล	แหล่งที่มา
สารละลายป้อน (วิภูภาคอินทรีย์)	คอนเดนเสทที่ได้จากหลุมขุด เจาะก๊าซธรรมชาติ	-	บริษัท วีระสุวรรณ จำกัด
สารสกัด (วิภูภาคสารละลาย)	กรดไฮโดรคลอริก	HCl	Qrec
	กรดซัลฟิวริก	H ₂ SO ₄	Qrec
	กรดไนตริก	HNO ₃	Merk
	ไทโอยูเรีย	NH ₂ CSNH ₂	Loba Chemie
	น้ำกลั่น	H ₂ O	
	โซเดียมคลอไรด์	NaCl	Loba Chemie
	โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	Loba Chemie

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) ชุดทดลองเครื่อง Liquid- cel® Liquid/Liquid extraction system จากบริษัท Hoechst celanes corporation ซึ่งประกอบด้วย เครื่องสูบลองชุด มาตรฐานและเครื่องควบคุมอัตราการไหล 2 ชุด และมาตรฐานวัดความดัน

2) อุปกรณ์เส้นใยกลวงที่ผลิตจากโพลีโพรพิลีน Liquid- cel® เมมเบรน โดยคุณลักษณะของอุปกรณ์เส้นใยกลวงแสดงดังตารางที่ 3-3

3) เครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน (Hot plate stirrer) ยี่ห้อ Stuart รุ่น UC152D

4) เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AG285

5) ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 100 250 500 1,000 5,000 มิลลิลิตร

6) กระจกบอทวง ขนาด 5 25 50 มิลลิลิตร

7) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 25 50 100 500 1,000 มิลลิลิตร

8) เทอร์โมมิเตอร์ (Mercury thermometer)

9) เครื่องวัดค่าความเป็นกรดเบส (pH meter) ยี่ห้อ EuTech รุ่น Instruments pH

ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของอุปกรณ์โมดูลด้วยเส้นใยกลางที่ใช้ในการทดลอง [19]

ลักษณะ	วัสดุ/ค่า	หน่วย
วัสดุที่ใช้ผลิตเส้นใยกลาง	พอลิโพรพิลีน	-
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	0.002	เดซิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	0.003	เดซิเมตร
ปริมาณรูพรุน	30	%
ความคดเคี้ยว	2.6	-
พื้นที่ผิว	1.4	ตารางเดซิเมตร
พื้นที่ผิวต่อปริมาตร	293	ตารางเดซิเมตรต่อลูกบาศก์ เดซิเมตร
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	1-60	องศาเซลเซียส
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดเส้นใยกลาง	0.63	เดซิเมตร
ความยาวของชุดเส้นใยกลาง	2.03	เดซิเมตร
ปริมาณเส้นใยกลางทั้งหมด	35,000	เส้น

3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) รุ่น AA240FS
- 2) เครื่องฟลูออริเมตริกอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One
- 3) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ แมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น LECO/Pegasus 4D

3.3 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ การวิเคราะห์รูปแบบของปรอทในคอนเดนเสท การหาสถานะที่ดีที่สุดในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารสกัด อุณหภูมิ และพิจารณาผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย และประยุกต์ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในระบบเมมเบรนเส้นใยกลางแบบคอนแทกเตอร์ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ รูปแบบการไหล อัตราการไหล เสถียรภาพของระบบใน

รูปแบบระยะเวลา ส่วนสุดท้ายคือพิจารณากลไกการสกัดปรอท และการคำนวณค่าต่างๆของระบบ ได้แก่ อุณหพลศาสตร์ จนพลศาสตร์ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.3.1 การศึกษารูปแบบปรอทในคอนเดนเสท

ศึกษารูปแบบของปรอทเริ่มต้นในคอนเดนเสทด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อพิจารณาชนิดและปริมาณของไฮโดรคาร์บอน และศึกษาหมู่ฟังก์ชัน และพันธะต่าง ๆ ในคอนเดนเสทโดยเครื่องฟลูออเรสเซนต์ฟอสโฟรีม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยพิจารณาข้อมูลร่วมกับงานวิจัยต่าง ๆ

3.3.2 การทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

วิธีการทดลองหาหาสภาวะที่ดีที่สุดในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการทดลองเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดเบื้องต้นด้วยกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย รวมทั้งพิจารณาผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย และเมื่อได้สภาวะที่ดีที่สุดจากกระบวนการนี้แล้วจึงนำมาศึกษาในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

3.3.2.1 การทดลองเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายและพิจารณาผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย

1) ก่อนทำการสกัดเก็บตัวอย่างคอนเดนเสทเพื่อวัดความเข้มข้นเริ่มต้นทุกครั้ง จากนั้นทำการแยกปรอทโดยการปั่นกวนคอนเดนเสท และสารสกัดเดี่ยว ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก ไทโอยูเรีย น้ำกลั่น โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยกำหนดความเข้มข้นของแต่ละสารสกัดที่ 0.5 โมลต่อลิตร เพื่อดูแนวโน้มของสารสกัดเบื้องต้น กำหนดให้อัตราส่วนของปริมาณของคอนเดนเสทต่อสารสกัดเท่ากัน ($O/A=1$) ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการสกัด 3,600 วินาที หลังจากนั้นนำสารผสมเข้าสู่กรวยแยกตั้งทิ้งไว้ และเก็บตัวอย่างด้านล่าง ปริมาณ 10-15 มิลลิลิตร เพื่อวัดความเข้มข้นของปรอทโดยเครื่อง เครื่องอะตอมมิกแอปซอบชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

2) พิจารณาแนวโน้มของสารสกัดต่อประสิทธิภาพการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท (%Removal) และเลือกสารที่มีประสิทธิภาพที่สุด 3 ชนิดเพื่อศึกษาพิจารณาผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยเนื่องจากการคำนึงถึงทรัพยากรในการทดลอง ปัจจัยที่สนใจได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเข้มข้น และ อุณหภูมิ โดยทำการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

3) วิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยและพิจารณาว่าสารสกัดชนิดเดียวให้ประสิทธิภาพเพียงพอหรือไม่ หากประสิทธิภาพไม่เพียงพอจึงทำการทดลองการใช้สารสกัดเสริมฤทธิ์ โดยทำการทดลองให้ได้สภาวะที่ดีที่สุด

3.3.2.2 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในระบบเมมเบรนเส้นใยถลุงแบบคอนแทกเตอร์

เมื่อทราบสภาวะที่ดีที่สุดจากการสกัดด้วยตัวทำละลายแล้ว จึงนำสภาวะนั้นมาศึกษาต่อในระบบเมมเบรนเส้นใยถลุงแบบคอนแทกเตอร์ โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ รูปแบบการไหล อัตราการไหล และเสถียรภาพของระบบในรูปแบบระยะเวลา สำหรับการทดลองนี้จะไม่ศึกษารูปแบบแพกทอเรียล เนื่องจากข้อจำกัดของทรัพยากรเพราะ ต้องใช้ปริมาณคอนเดนเสทมากกว่า 7 ลิตร ต่อการศึกษาการสกัดปรอทออกจากคอนเดนเสท 1 ครั้งสำหรับระบบเมมเบรนเส้นใยถลุงแบบคอนแทกเตอร์ในรูปแบบการไหลแบบสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน จึงไม่เหมาะสมหากออกแบบทำการทดลองแบบแพกทอเรียล ขั้นตอนทำการทดลองดังนี้

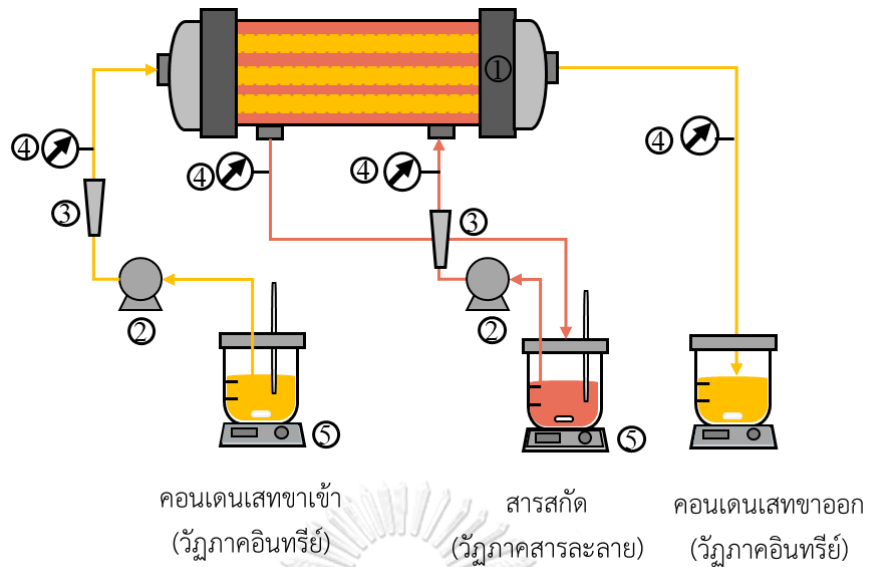
3.3.2.2.1 ศึกษาผลของรูปแบบการไหล

1) เตรียมคอนเดนเสทปริมาตร 7 ลิตร และเก็บตัวอย่าง 5-15 มิลลิลิตรเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทเริ่มต้นด้วยเครื่องเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

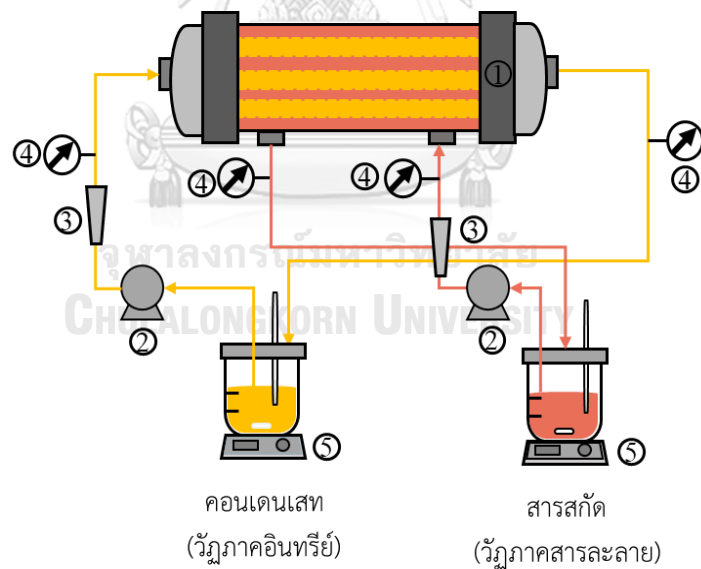
2) เตรียมความเข้มข้นของสารสกัดตามสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการศึกษาในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายจากหัวข้อที่ 3.3.2.1 ที่ปริมาตร 1 ลิตร

3) ป้อนคอนเดนเสททางด้านท่อ และสารสกัดเข้าสู่โมดูลทางด้านเปลือก รูปแบบการไหลของคอนเดนเสท ดำเนินการลักษณะสารป้อนไหลผ่าน และให้สารสกัดไหลแบบไหลวนดังภาพที่ 3-1 โดยกำหนดอัตราการไหล เท่ากันที่ 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที โดยดำเนินการทั้งหมด 3,600 วินาที ควบคุมสภาวะให้เป็นไปตามสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองก่อนหน้า

4) เก็บตัวอย่างคอนเดนเสทและสารสกัดหลังจากการดำเนินการสกัดแล้วที่เวลา ทุก ๆ 600 วินาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทหลังสกัดในด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำซ้ำในหัวข้อ 1) โดยเปลี่ยนลักษณะการไหลเป็นรูปแบบสารป้อนและสารสกัดไหลวนดังภาพที่ 3-2 ซึ่งเปลี่ยนปริมาตรของสารป้อนและสารสกัดกำหนดให้เท่ากันที่ 0.5 ลิตร



ภาพที่ 3-1 อุปกรณ์ Liquid- cel® เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous) ในรูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน (1) โมดูลเส้นใยกลวง (3) เครื่องวัดอัตราการไหล (4) มาตรวัดความดัน (5) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (6) คอนเดนเสท (7) สารสกัด



ภาพที่ 3-2 อุปกรณ์ Liquid- cel® เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองแบบกะ (Batch) ในรูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวน (1) โมดูลเส้นใยกลวง (3) เครื่องวัดอัตราการไหล (4) มาตรวัดความดัน (5) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (6) คอนเดนเสท (7) สารสกัด

3.3.2.2.2 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารป้อนและสารสกัด

1) เก็บตัวอย่างคอนเดนเสท 5-10 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทเริ่มต้นด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

2) ป้อนคอนเดนเสทและสารสกัดเข้าสู่โมดูลในทิศทางตรงกันข้ามโดยใช้รูปแบบการไหลตามสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองในหัวข้อ 3.3.3.2.1 กำหนดอัตราการไหลเท่ากันที่ 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที โดยดำเนินการทั้งหมด 3,600 นาที ควบคุมสภาวะให้เป็นไปตามสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า

3) เก็บตัวอย่างของคอนเดนเสทและสารสกัดหลังจากการดำเนินการสกัดที่เวลา 600 1,200 1,800 2,400 3,000 และ 3,600 วินาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอท โดยเครื่องอะตอมมิกแอปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ทำซ้ำข้อ 1) - 3) โดยเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 1.67 3.33 5.00 และ 6.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

3.3.2.2.3. ศึกษาความเสถียรภาพของระบบในรูปแบบระยะเวลาในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

1) เก็บตัวอย่างคอนเดนเสท 5-15 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของปรอทเริ่มต้นด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

2) ป้อนคอนเดนเสท และสารสกัดเข้าสู่โมดูลในทิศทางตรงกันข้ามตามรูปแบบการไหล และอัตราการไหล ตามสภาวะที่ดีที่สุดที่ศึกษาจากก่อนหน้า โดยดำเนินการทั้งหมด 7,200 วินาที สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของระบบ เช่นการหลุดของน้ำมันและข้อจำกัดต่างๆ ในระบบ

3) เก็บตัวอย่างของคอนเดนเสทและสารสกัดที่ ทุกๆ 600 วินาทีสังเกตการหลุดของน้ำมัน การไหลข้ามฝั่งของสารป้อน และสารสกัด นำตัวอย่างคอนเดนเสทและสารสกัดหลังจากสกัดที่เก็บแต่ละเวลานำไปวิเคราะห์ปรอทโดยเครื่องอะตอมมิกแอปชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

3.3.3 การศึกษาตัวแปรของอุณหพลศาสตร์

ทำการทดลองตามผลของอุณหภูมิจากการกักเก็บปรอท ในช่วงอุณหภูมิ 303.15-323.15 เคลวิน เพื่อนำมาคำนวณตัวแปรของอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ ค่าการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานเอนทัลปี (ΔH°) ค่าการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานเอนโทรปี (ΔS°) และ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) โดยใช้ทฤษฎีในหัวข้อ 2.11

3.3.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์การแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

ทำการทดลองเก็บข้อมูลความเข้มข้นของปรอทก่อนและหลังสกัดที่ช่วงเวลา ที่ 600-3,600 วินาที ในระบบเมมเบรนเส้นใยกลางคอนแทกเตอร์ โดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดเพื่อนำมาเลือกใช้กับแบบจำลองที่เหมาะสม โดยเลือกศึกษาอันดับปฏิกิริยา อันดับที่ 0 1 และ 2 ตามลำดับ

3.3.5 การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปรอทในสารละลายป้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเมมเบรน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก

นำผลการทดลองที่สภาวะที่ดีที่สุดมาใช้ในการคำนวณ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปรอทในสารละลายป้อน (k_f) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเมมเบรน (k_m) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก (k_s) แปรผลโดยใช้ทฤษฎีในหัวข้อ 2.13

3.3.6 การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการแพร่และลักษณะปฏิกิริยาในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยระบบเมมเบรนเส้นใยกลางแบบคอนแทกเตอร์

นำผลการทดลองที่สภาวะที่ดีที่สุดใช้ในการประยุกต์ใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีในหัวข้อ 2.14 และเปรียบเทียบผลการทดลองจริงและผลจากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบของปรอทในคอนเดนเสท

รูปแบบของปรอทในคอนเดนเสทแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา การใช้เทคนิค สเปกโตรสโกปีต่าง ๆ ในการวิเคราะห์รูปแบบของปรอทในคอนเดนเสทจึงเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับงานวิจัยนี้ วิเคราะห์รูปแบบของปรอทด้วย 2 เทคนิคได้แก่ แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี และเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

- ผลการวิเคราะห์รูปแบบปรอทด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี

จากการวิเคราะห์ชนิด และปริมาณของไฮโดรคาร์บอนในตัวอย่างคอนเดนเสทด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรีซึ่งวิเคราะห์สารเชิงปริมาณด้วยวิธีแอเรีย นอร์มไลเซชัน (Area normalization method) [47] พบว่าสารที่พบมากที่สุดคือ ไฮโดรคาร์บอนในช่วงต่าง ๆ ซึ่งช่วงที่พบมากที่สุดในช่วง $C_6 - C_9$ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4-1

- ผลการวิเคราะห์รูปแบบของปรอทในคอนเดนเสทด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

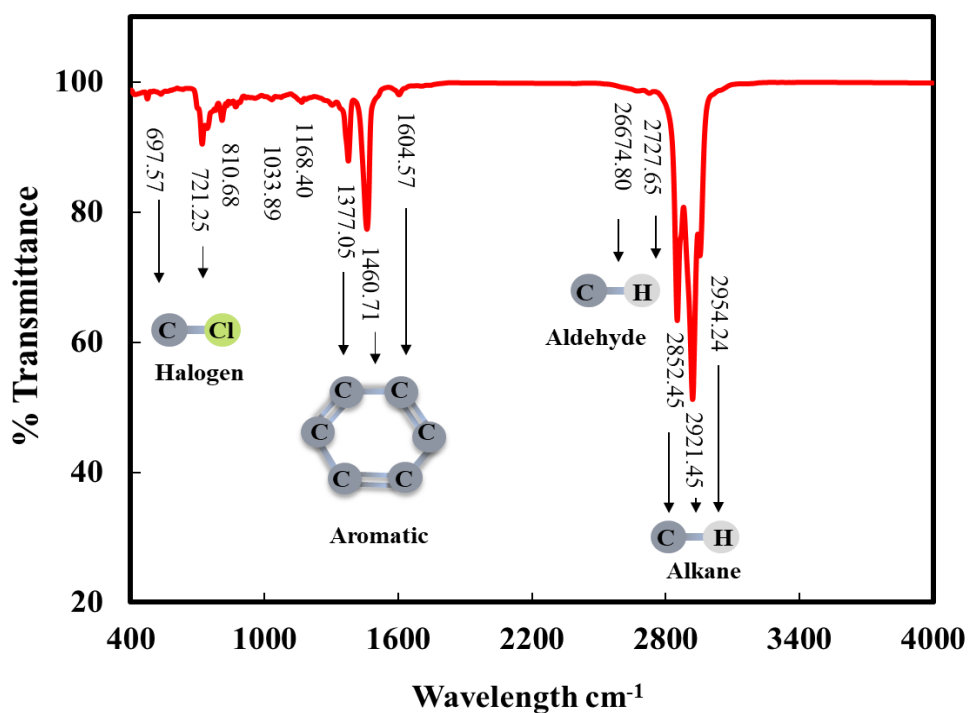
ผลการศึกษาพันธะ และหมู่ฟังก์ชันของคอนเดนเสทด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี แสดงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-3,400 เซนติเมตร⁻¹ แสดงดังภาพที่ 4-1 จากการวิเคราะห์ความยาวคลื่นในช่วงพันธะเดี่ยว (Single bond region) พบความยาวคลื่นที่ 2,954.24 เซนติเมตร⁻¹ และ 2,921.45 เซนติเมตร⁻¹ บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันกลุ่มแอลเคน และในช่วงความยาวคลื่นที่ 2,727.65 เซนติเมตร⁻¹ และ 2,674.80 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งอยู่ในช่วงของพันธะคู่ (Double bond region) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน แอลคีน ความยาวคลื่นที่ 1,604.57 เซนติเมตร⁻¹ และ 1,460.71 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอะโรมาติก สำหรับในช่วงฟิงเกอร์พริ้นซ์ (Fingerprint region) [48] พบความยาวคลื่นที่ 721.25 เซนติเมตร⁻¹ และ 697.57 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบฮาโลเจน อันได้แก่ สารประกอบคลอไรด์ [49]

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีทั้ง 2 เทคนิค พบว่าสารประกอบอะโรมาติกพบมากที่สุดในการคอนเดนเสท จากการค้นคว้างานวิจัยต่าง ๆ พบว่าสารประกอบอะโรมาติกในกลุ่มปรอทที่อยู่ในคอนเดนเสทที่พบมากที่สุด คือ ปรอทในกลุ่มฟีนิล [23, 50] และมีข้อสังเกตว่า Hg^0

และ Hg(II) เป็นสปีชีส์หลักในแก๊สคอนเดนเสท และปิโตรเลียมเหลว [28, 51] มากไปกว่านั้น Saleh และคณะ [52] รายงานว่ารูปแบบปรอทในลักษณะ อัลคิลเมอร์คิวรีเฮไลด์ มักจะพบปรอทในรูปแบบนี้มากในระหว่างกระบวนการการผลิตปิโตรเลียม และไฮโดรคาร์บอน ซึ่งข้อมูลนี้สอดคล้องกับผลของวิเคราะห์จากเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ซึ่งมีการพบฟิคลอไรด์ (C-Cl) ที่สเปกตรัมที่ 721.25 เซนติเมตร⁻¹ [49] ดังนั้นจึงสรุปเป็นโดยนัยว่า ฟีนิลเมอร์คิวรีคลอไรด์ (C₆H₅HgCl) พบมากที่สุดในตัวอย่างเป็นคอนเดนเสท

ตารางที่ 4-1 ผลวิเคราะห์ชนิด และปริมาณของไฮโดรคาร์บอนในตัวอย่างเป็นคอนเดนเสท

ช่วงไฮโดรคาร์บอน	ปริมาณไฮโดรคาร์บอน (%)
C ₁ - C ₅	1.55
C ₆ - C ₉	48.84
C ₁₀ - C ₁₄	21.98
C ₁₅ - C ₂₀	4.50
อื่น ๆ	23.86

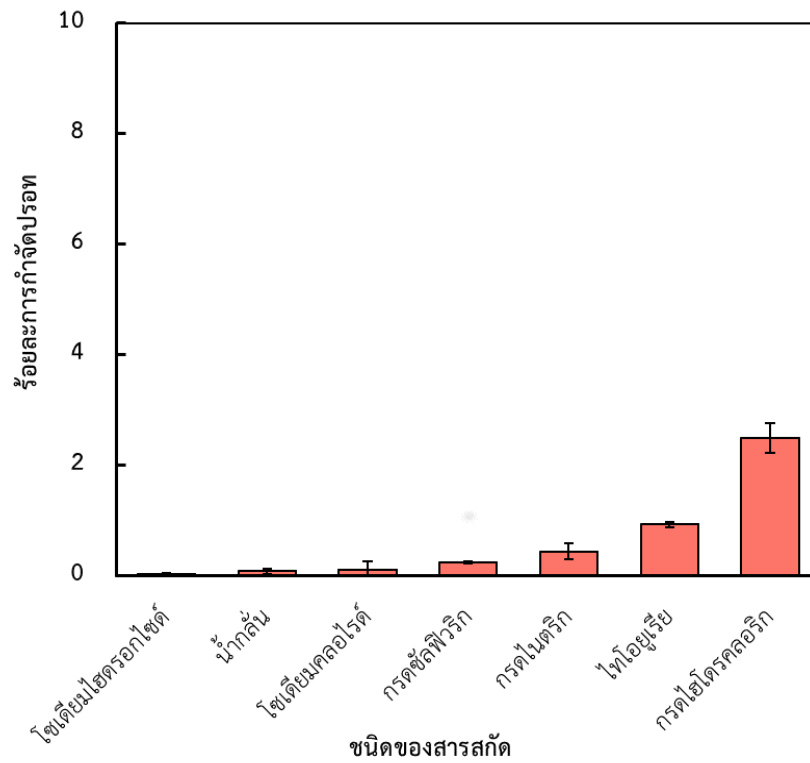


ภาพที่ 4-1 ผล FTIR ของคอนเดนเสทในช่วงความยาวคลื่น 400-3,400 เซนติเมตร⁻¹

4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท และพิจารณาผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

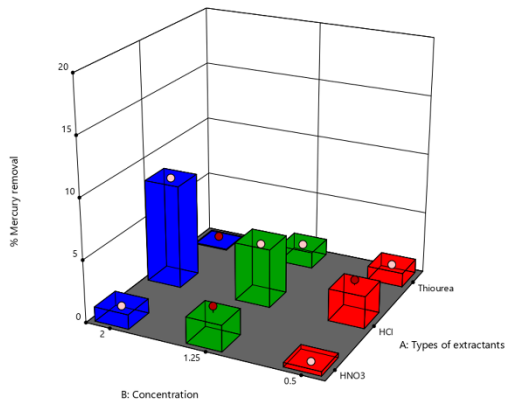
จากการทดลองในการพิจารณาแนวโน้มของสารเบื้องต้นพบว่า กรดไฮโดรคลอริก ไทโอยูเรีย และ กรดไนตริก คือสารสกัด 3 ชนิดที่มีแนวโน้มของประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดที่ดีที่สุดแสดงดังภาพที่ 4-2 แต่ร้อยละการสกัดยังคงไม่ถึงค่าที่เหมาะสมสำหรับโรงกลั่น ดังนั้นจึงนำ 3 ทั้งสามชนิดจากการทดลองมาศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดและพิจารณาผลกระทบของปัจจัยร่วม ได้แก่ ความเข้มข้น และ อุณหภูมิ โดยออกแบบการทดลองด้วยแฟกทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ 3 ปัจจัย 3 ระดับ การเลือกช่วง 3 ระดับพิจารณาจากการทดลองเบื้องต้นแบบกว้าง ๆ และเลือกช่วงระดับที่ไม่มีข้อจำกัดที่สุด ดังนั้นระดับที่ศึกษามีค่าดังนี้ ชนิดของสารสกัด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก ไทโอยูเรีย และ กรดไนตริก ความเข้มข้นของสารสกัด ได้แก่ 0.5 1.25 และ 2 โมลต่อลิตร และ อุณหภูมิ ได้แก่ 303.15 313.15 และ 323.15 รวมทั้งหมด 27 การทดลอง ผลการทดลองพบว่าปัจจัย ชนิดของสารและอุณหภูมิ (AB) และ ชนิดของสารกับความเข้มข้น (AC) มีนัยยะสำคัญต่อร้อยละการกำจัดปรอท โดยพิจารณาจากค่า p-value ($p < 0.05$) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4-2 ค่าความถูกต้องแม่นยำของสมการประเมินโดยค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9877 กราฟ 3 มิติแสดงผลการทดลองระหว่างชนิดของสารและความเข้มข้น (AB) และชนิดของสารและอุณหภูมิ (AC) ต่อร้อยละการสกัดปรอทแสดงดังภาพที่ 4-3

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการสกัดของสารสกัดชนิดเดียวทั้ง 3 ชนิดที่นำมาศึกษาพบว่ายังคงไม่ถึงค่าที่เหมาะสมสำหรับเข้าสู่โรงกลั่นร้อยละการกำจัดปรอทสูงสุดเพียงร้อยละ 13.82 โดยกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน ดังนั้นจึงเลือกสารสกัดชนิดใหม่คือ สารสกัดเสริมฤทธิ์ จากการทบทวนงานวิจัยในหัวข้อ 2.15.1 และทำการทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดโดยศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นและอุณหภูมิต่อไปโดยไม่ใช้วิธีการแฟกทอเรียลเพราะคำนึงถึงทรัพยากรที่มีอยู่เพราะจากผลการทดลองได้ยืนยันแล้วว่า ชนิดของสารและความเข้มข้น และ ชนิดของสารและอุณหภูมิ ส่งผลอย่างมีนัยยะสำคัญต่อร้อยละการกำจัดปรอท ดังจึงศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดดังต่อไปนี้ในหัวข้อ 4.2.1 , 4.2.2, 4.2.3

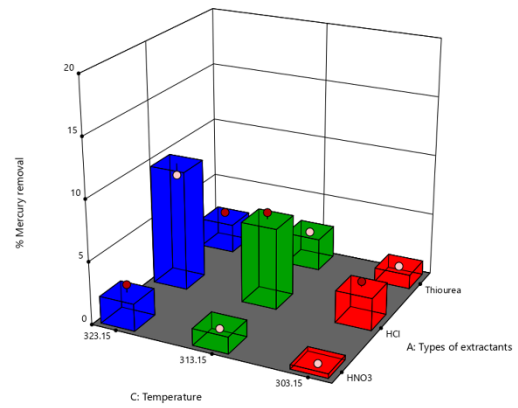


ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของสารสกัดต่อร้อยละการกำจัดปรอทภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: ความเข้มข้นของสารสกัดแต่ละชนิดที่ 0.5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนคอนเดนเสทต่อสารสกัดเท่ากัน (O/A=1) ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เวลา 3,600 วินาที

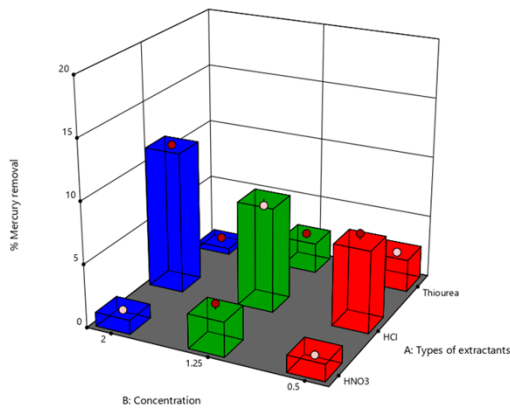
(ก.) AB (303.15 K)



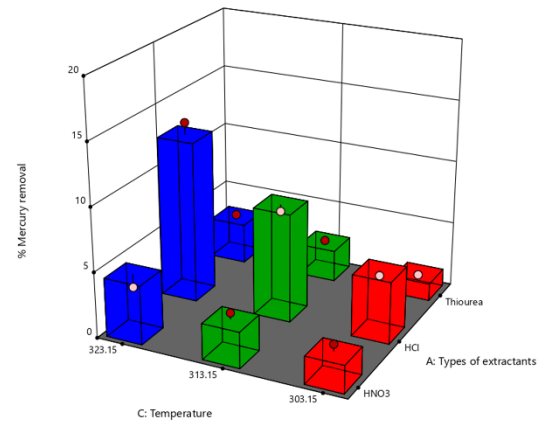
(ง.) AC (0.5 mol/L)



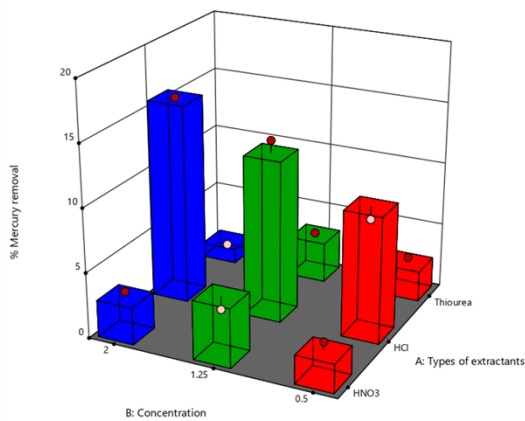
(ข.) AB (313.15 K)



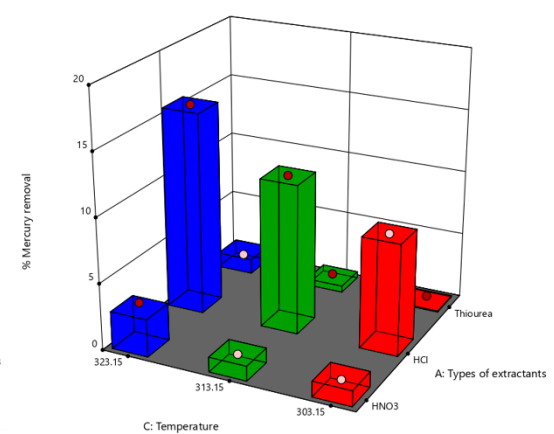
(จ.) AC (1.25 mol/L)



(ค.) AB (313.15 K)



(ฉ.) AC (2.00 mol/L)



ภาพที่ 4-3 กราฟ 3 มิติแสดงผลการทดลองระหว่างชนิดของสารและความเข้มข้น (AB) และชนิดของสารและความอุณหภูมิ (AC) ต่อร้อยละการกำจัดปรอท

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง

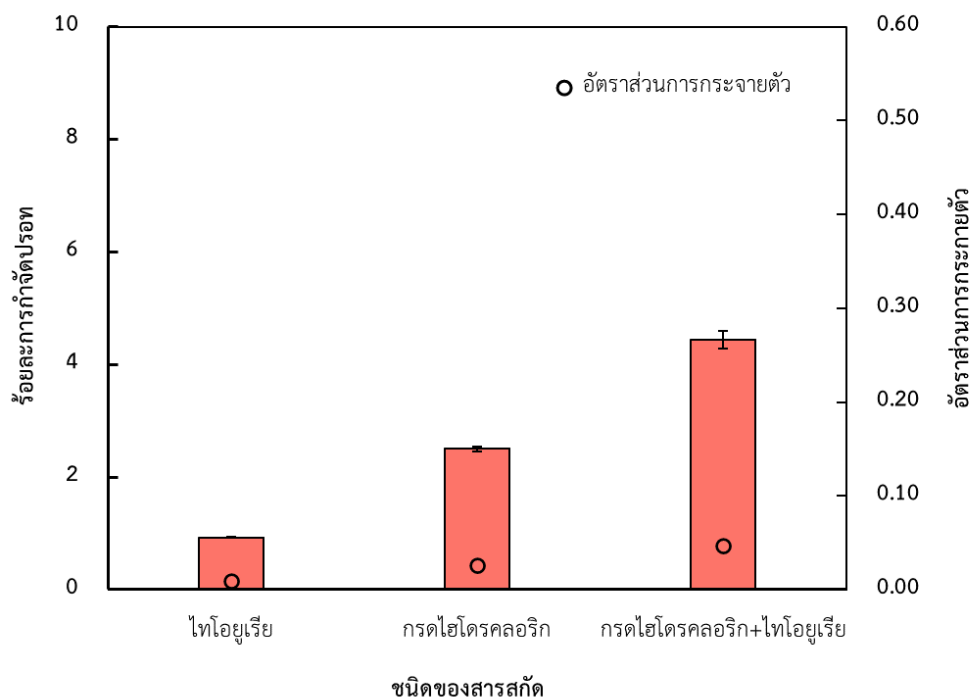
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	470.86	18	26.16	35.62	< 0.0001
A-Types of extractants	315.79	2	157.89	214.99	< 0.0001
B-Concentration	13.59	2	6.79	9.25	0.0083
C-Temperature	59.84	2	29.92	40.74	< 0.0001
AB	45.94	4	11.48	15.64	0.0008
AC	34.19	4	8.55	11.64	0.002
BC	1.52	4	0.3804	0.518	0.7255
Residual	5.88	8	0.7344		
Cor Total	476.73	26			

4.2.1 ผลการศึกษาชนิดของสารสกัดเสริมฤทธิ์ต่อประสิทธิภาพในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

จากการศึกษาข้างต้นพบว่า การใช้สารสกัดเดี่ยวให้ประสิทธิภาพการแยกปรอทที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาค้นคว้าการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยการใช้สารสกัดเสริมฤทธิ์ แต่เนื่องจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกโลหะหนักออกจากคอนเดนเสทอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีน้อยมาก และข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ รวมถึงกลไกต่างๆ ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทยังคงขาดแคลนจึงทดลองเลือกใช้ สารเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ที่ศึกษามาจากงานวิจัยก่อนหน้าที่นำมาใช้สำหรับการนำกลับปรอทออกจากสารสกัดในวัฏภาคน้ำมัน [18, 19]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงนำสารสกัดเสริมฤทธิ์ระหว่างสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียมาประยุกต์ใช้ในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท ในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาดูด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยกำหนดความเข้มข้นของสารสกัดเดี่ยวทั้งสองชนิดที่ 0.5 โมลต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า สารสกัดเสริมฤทธิ์ระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียให้ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดเดี่ยว โดยสามารถกำจัดปรอทได้ร้อยละ 4.5 แสดงในภาพ 4-4 การคำนวณค่าอัตราส่วนการกระจายตัวดังสมการที่ (2.5) จากภาพที่

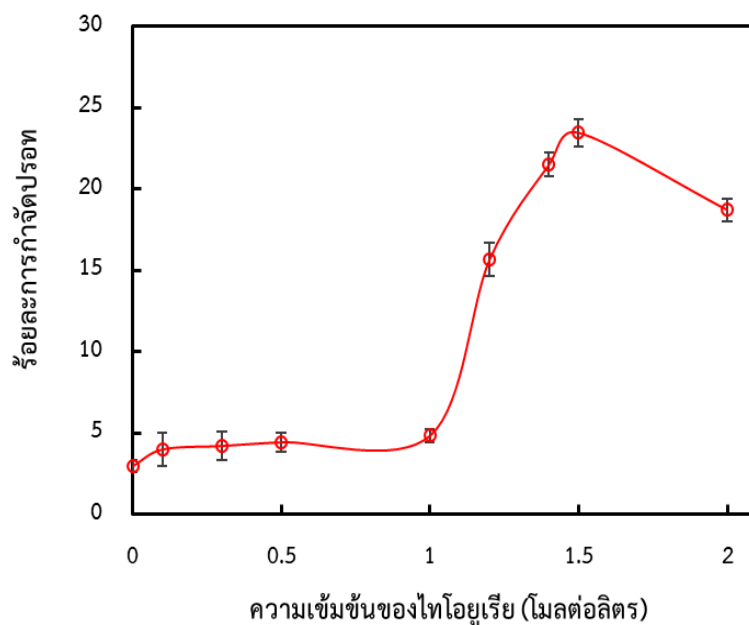
4-4 พบว่าอัตราส่วนของการกระจายตัวของ สารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย (0.0460) > กรดไฮโดรคลอริก (0.0250) > ไทโอยูเรีย (0.0090) อัตราส่วนการกระจายตัวสูงบ่งชี้ว่า ไอออนของปรอทกระจายได้ดีในวัฏภาคสารละลาย (สารสกัด) เมื่อนำค่าเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์ของสารเสริมฤทธิ์ ดังสมการที่ (2.4) พบว่ามีค่ามากกว่า 1 ซึ่งบ่งชี้ถึงผลเสริมฤทธิ์กันของสารสกัด [30, 53] แต่อย่างไรก็ตามร้อยละการกำจัดปรอทยังคงต่ำ และไม่เป็นที่น่าพอใจตามที่ยอมรับได้ของคนเดินเสทก่อนเข้าโรงกลั่น หรืออุตสาหกรรมปิโตรเคมี ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้สารสกัดเสริมฤทธิ์ระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียในการศึกษาตัวแปรอื่นที่มีนัยยะสำคัญต่อไป ได้แก่ ชนิดของสารสกัดและความเข้มข้น (AB) และ ชนิดของสารสกัดและอุณหภูมิ (AC)



ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดปรอทต่อชนิดของสารสกัดเดี่ยวและสารสกัดเสริมฤทธิ์และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว

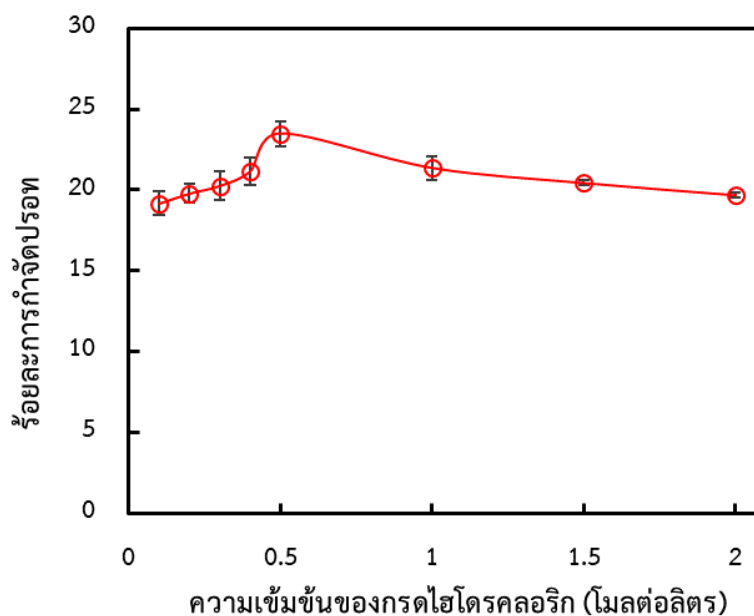
4.2.2 ผลการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดเสริมฤทธิ์ต่อประสิทธิภาพในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

การศึกษาผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารสกัดเสริมฤทธิ์ระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียเรียมศึกษาโดย กำหนดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร และศึกษาหาความเข้มข้นของไทโอยูเรียที่เหมาะสมในช่วงความเข้มข้น 0.1-2 โมลต่อลิตร จากนั้นเมื่อได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของสารละลายไทโอยูเรียจึงนำความเข้มข้นนั้นมาศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดไฮโดรคลอริกต่อไป ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4-5 และ 4-6 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไทโอยูเรีย ร้อยละการกำจัดปรอทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึง 1.5 โมลต่อลิตร และประสิทธิภาพจะลดลงตามหลักของเลอชาตีเย (Le Chatelier's principles) [33, 54] ซึ่งผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็นในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปว่าความเข้มข้นส่งผลต่อร้อยละการกำจัดปรอท ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของสารสกัดเสริมฤทธิ์ระหว่างกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียที่ 0.5 โมลต่อลิตร และ 1.5 โมลต่อลิตร ตามลำดับ ร้อยละการกำจัดปรอทสูงขึ้นถึงร้อยละ 23.48 ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นนี้ในการศึกษาตัวแปรอุณหภูมิต่อไป



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความเข้มข้นของไทโอยูเรียในสารสกัดเสริมฤทธิ์ต่อร้อยละการกำจัดปรอท (ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร) ภายใต้สภาวะการทดลองที่

กำหนด: อัตราส่วนคอนเดนเสทต่อสารสกัดเท่ากัน ($O/A=1$) ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เวลา 3,600 วินาที



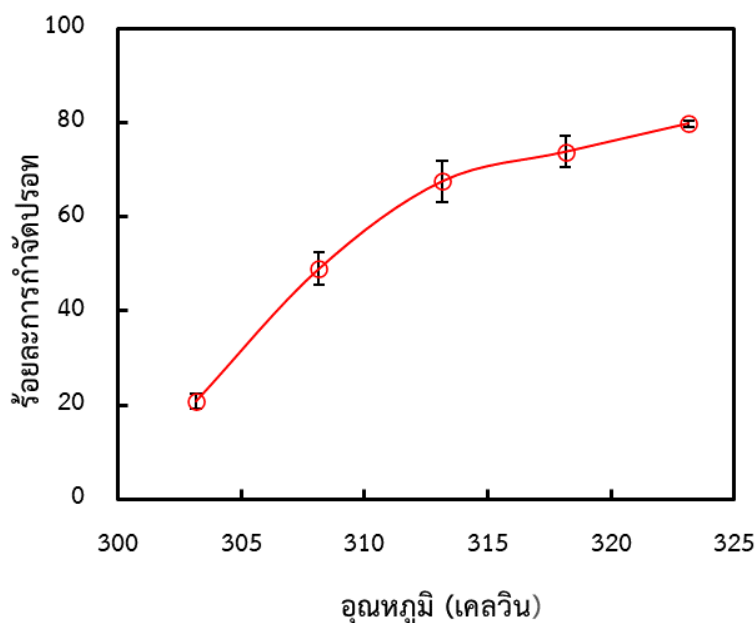
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกในสารสกัดเสริมฤทธิ์ต่อร้อยละการกำจัดปรอท (กำหนดความเข้มข้นไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร) ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: อัตราส่วนคอนเดนเสทต่อสารสกัดเท่ากัน ($O/A=1$) ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เวลา 3,600 วินาที

4.2.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

จากผลการทดลองก่อนหน้านี้พบว่าที่อุณหภูมิห้อง สามารถแยกปรอทได้ร้อยละ 23.48 ซึ่งประสิทธิภาพในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทค่อนข้างต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกปรอทโดยการศึกษาอุณหภูมิของระบบในช่วง 303.15 - 323.15 เคลวิน ผลการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน สามารถแยกปรอทได้สูงสุดถึงร้อยละ 80.60 ดังแสดงในภาพที่ 4-7 ตามหลักของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) [55] ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ 323.15 เคลวิน

การทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทจากการศึกษาเบื้องต้น ด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย คือ สารเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริก

และไทโอยูเรียที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรของกรดไฮโดรคลอริก และ 1.5 โมลต่อลิตรของไทโอยูเรีย ที่ 323.15 เคลวิน



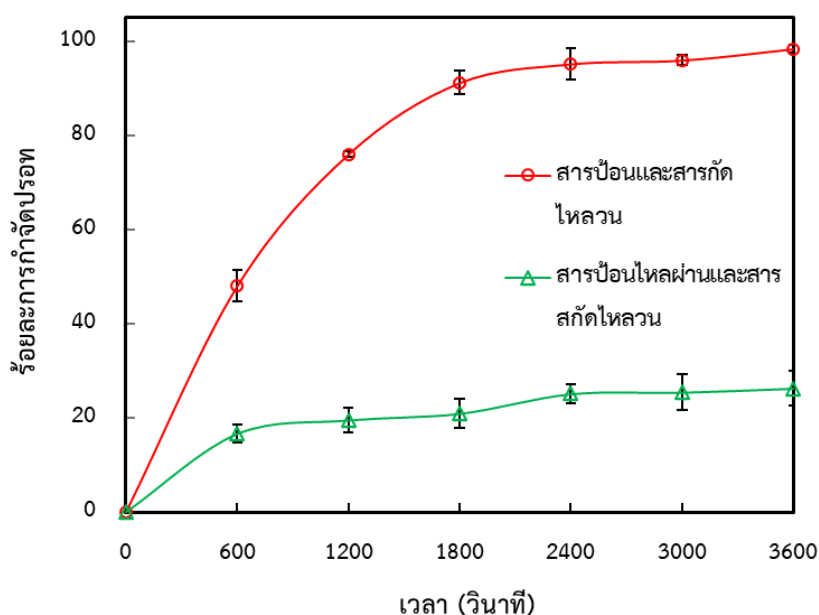
ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อร้อยละการกำจัดปรอท (กำหนดความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรของกรดไฮโดรคลอริกและ 1.5 โมลต่อลิตรของไทโอยูเรีย) ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: อัตราส่วนคอนเดนเสทต่อสารสกัดเท่ากัน ($O/A=1$) ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เวลา 3,600 วินาที

4.3 ผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการแยกปรอทในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

จากสภาวะที่เหมาะสมในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายข้างต้น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดเสริมฤทธิ์ระหว่างกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตรและไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิการที่ 323.15 เคลวิน จากนั้น จึงนำสภาวะที่ดีที่สุดมาศึกษาต่อในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงชนิดคอนแทกเตอร์ โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ รูปแบบการไหล อัตราการไหล ความเสถียรของระบบในรูปแบบระยะเวลาในการแยกปรอท

4.3.1 ผลการศึกษารูปแบบการไหลต่อประสิทธิภาพการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

ผลการทดลองพบว่ารูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวนให้ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทสูงสุด โดยสามารถกำจัดปรอทได้สูงถึงร้อยละ 98.40 ที่เวลา 3,600 วินาที ในขณะที่ลักษณะการไหลในรูปแบบสารป้อนไหลผ่านสารสกัดไหลวนสามารถกำจัดปรอทได้ร้อยละ 26.32 แสดงดังภาพที่ 4-8 เนื่องจากลักษณะการไหลแบบสารป้อนและสารสกัดไหลวนมีเวลาในการสัมผัสกันของสาร (Residence time) มากกว่าลักษณะการไหลในรูปแบบสารป้อนไหลผ่านสารสกัดไหลวน [56]

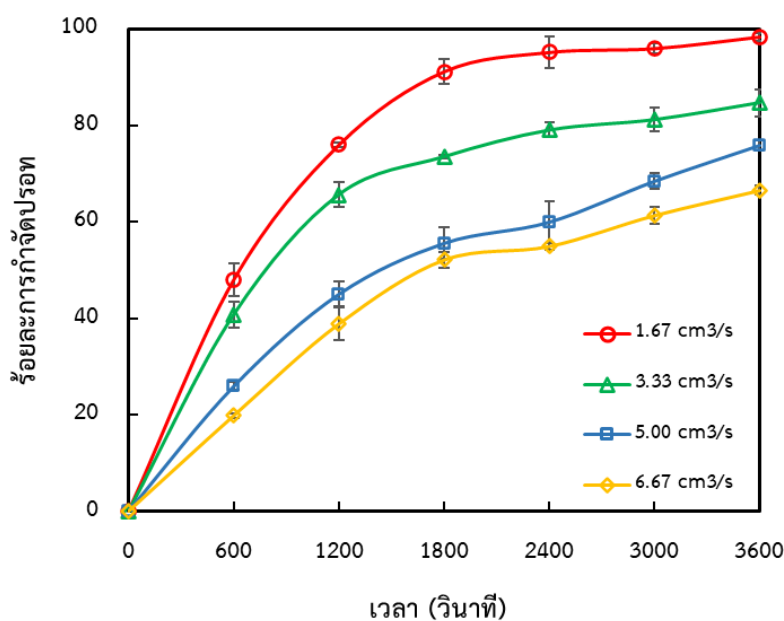


ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลต่อการกำจัดปรอทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: สารสารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียที่ 0.5 และ 1.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิที่ 323.15 เคลวิน อัตราการไหล 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที เวลา 3,600 วินาที

4.3.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลของสารป้อนและสารสกัดต่อประสิทธิภาพการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราการไหล 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทที่สูงที่สุดโดยร้อยละการกำจัดปรอทมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหล

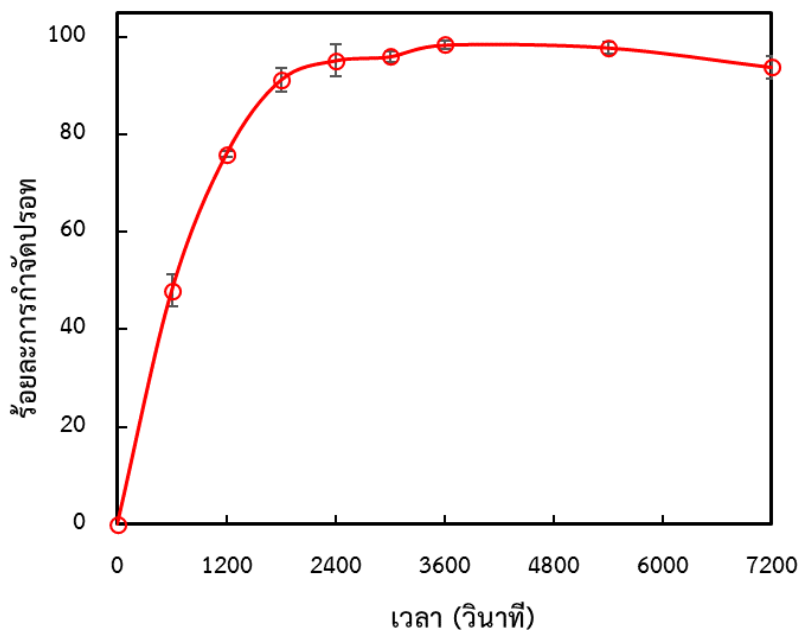
เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-9 เนื่องจากที่อัตราการไหลต่ำ ๆ ทำให้สารป้อนและสารสกัดมีเวลาในการทำปฏิกิริยากันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลายงานวิจัยที่ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อการสกัดไอออนต่างๆในระบบเมมเบรนเทคโนโลยี พบว่าอัตราการไหลที่ดีที่สุดคือ 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที [30, 57]



ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลต่อการกำจัดปรอทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลาง ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: สารสารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียที่ 0.5 และ 1.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิที่ 323.15 เคลวิน ลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวน เวลา 3,600 วินาที

4.3.3 ผลการศึกษาเสถียรภาพของระบบในรูปแบบระยะเวลาต่อประสิทธิภาพการแยกปรอทออกจากเดนเสทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

การศึกษาเสถียรภาพของระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ทำการศึกษาในระยะเวลาการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทช่วง 0-7200 วินาที ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาดำเนินการมากกว่า 5400 วินาที จาก ร้อยละ 97.84 ที่เวลา 5,400 วินาที ลดลงที่ร้อยละ 93.84 ที่เวลา 7,200 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 4-10 ดังนั้นจึงสรุปว่าเสถียรภาพของระบบคงที่จนถึง 5,400 วินาที

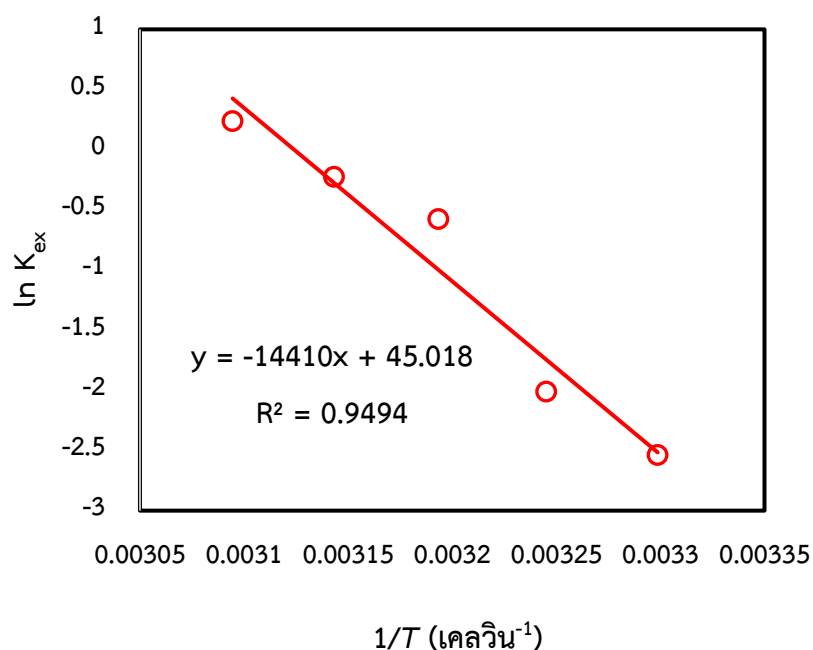


ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพของระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสท ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด: สารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียที่ 0.5 และ 1.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิที่ 323.15 เคลวิน ลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวน เวลา 3,600 วินาที

4.4 ผลการศึกษาตัวแปรของอุณหพลศาสตร์

การคำนวณตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ซึ่งได้แก่ ΔH° , ΔS° และ ΔG° เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาเคมีในการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทที่ช่วง 303.15-323.15 เคลวิน สามารถคำนวณจากสมการที่ (2.2) และ (2.3) ดังภาพที่ 4-11 จากการคำนวณพบว่า ΔH° และ ΔS° มีค่าเท่ากับ 119.80 กิโลจูลต่อโมล และ 0.37 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ ค่า ΔH° มีค่าเป็นบวกบ่งชี้ถึงว่าเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งหมายถึงการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยสารสกัดเสริมฤทธิ์ของ กรดไฮโดรคลอริก และไทโอยูเรียต้องการพลังงานความร้อนเข้ามาในระบบ [58] ค่าบวกของ ΔS° หมายถึงปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ [37] ΔG° ที่อุณหภูมิต่างๆ ถูกคำนวณที่อุณหภูมิ 303.15, 308.15, 313.15, 318.15 และ 323.15 เคลวิน มีค่าดังนี้ 6.34, 4.46, 2.59, 0.72 และ -1.15 กิโลจูลต่อโมล ตามทฤษฎีของอุณหพลศาสตร์ ค่าบวกของ ΔG° ที่ 303.15 – 318.15 เคลวิน บ่งชี้ว่าปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดขึ้นเอง ค่าลบ ΔG° ที่ 323.15 เคลวิน บ่งชี้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเอง มี

ข้อสังเกตว่าการกำจัดปรอทออกจากปิโตรเลียมคอนเดนเสทโดยสารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรียสามารถเกิดขึ้นเองที่อุณหภูมิการที่ 323.15 เคลวิน หรือมากกว่า 323.15 เคลวิน



ภาพที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_{ex}$ และ $1/T$

4.5 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

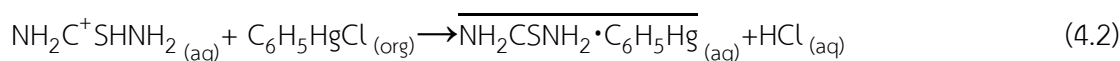
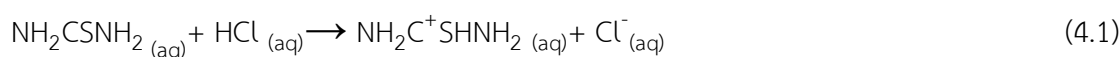
การศึกษาจลนพลศาสตร์การแยกปรอทออกจากคอนเดนเสททำการทดลองเก็บข้อมูลความเข้มข้นของปรอทก่อนและหลังสกัดที่ช่วงเวลา ที่ 60-3,600 วินาที ในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงคอนแทกเตอร์ที่ โดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดเพื่อนำมาเลือกใช้กับแบบจำลองที่เหมาะสม อันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยาของการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเจอร์สามารถหาได้จากการอินทิเกรตระหว่างความเข้มข้นและเวลาที่อธิบายในตารางที่ 4-3 จากผลการศึกษาพบว่า ค่า R-squared (R^2) สูงสุดหมายถึงการกำจัดปรอทเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยา คือ 0.0013 วินาที⁻¹

ตารางที่ 4-3 ผลของอันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยาของการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

อันดับปฏิกิริยา	กราฟเส้นตรง	ค่าคงที่ของ ปฏิกิริยา (k)	หน่วย	R^2
ปฏิกิริยาอันดับที่ศูนย์	$C_0 - C_t$ vs. t	0.00003	มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวินาที	0.7561
ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง	$\ln \frac{C_0}{C_t}$ vs. t	0.00130	วินาที ⁻¹	0.9518
ปฏิกิริยาอันดับที่สอง	$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_0}$ vs. t	0.17373	ลิตรต่อวินาที	0.8309

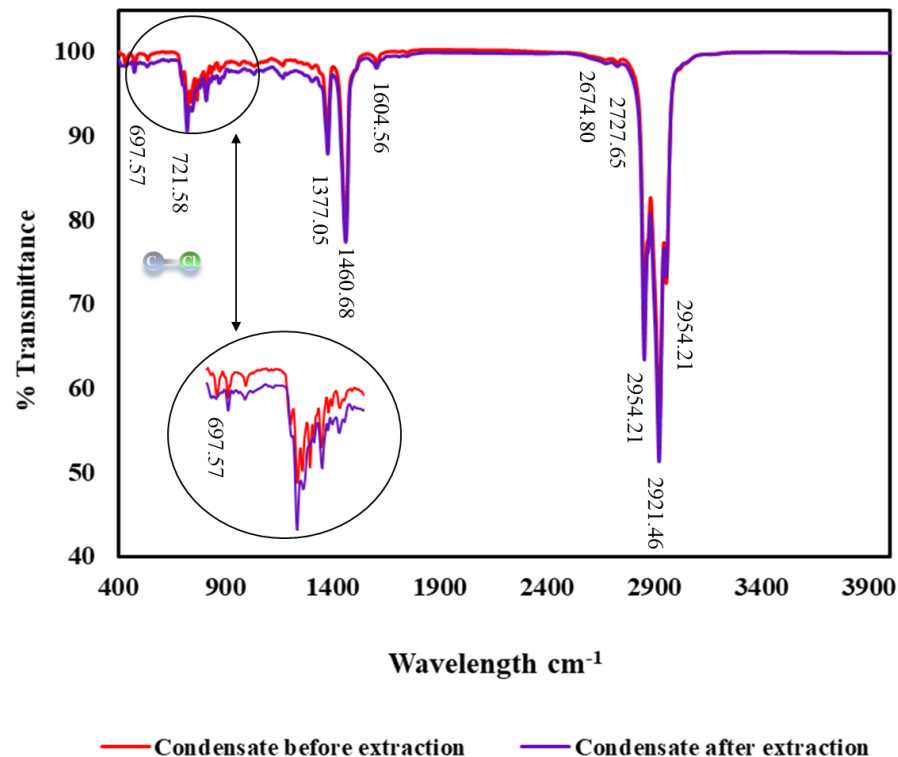
4.6 ผลการศึกษากลไกการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

สมการ (4.1) แสดงปฏิกิริยาเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย โดยไทโอยูเรียจะได้รับโปรตอนจากกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเกิดขึ้นที่ S อะตอมด้วยอัตราส่วนโมล 1:1 [59, 60] ปรอทในคอนเดนเสทอยู่ในรูปฟีนิลเมอร์คิวริคลอไรด์ ดังนั้นจึงอธิบายปฏิกิริยาการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทดังสมการ (4.2) S อะตอมของไทโอยูเรียที่ได้รับโปรตอนทำปฏิกิริยากับฟีนิลเมอร์คิวริคลอไรด์ที่ตำแหน่ง Hg(II) สิ่งนี้สามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy change) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานการแยกตัวของพันธะ พลังงานการแยกตัวของพันธะของ Hg-Cl ต่ำกว่าของ Hg-S [61] ดังนั้นการแยกตัวของ Hg-Cl สามารถแยกออกจากกันได้ง่ายกว่า Hg-S บ่งชี้ว่า S อะตอมของไทโอยูเรียที่ได้รับโปรตอนแข็งแรงและเสถียร โดยสามารถสร้างพันธะกับฟีนิลเมอร์คิวริคลอไรด์ที่ตำแหน่ง Hg(II) ด้วยแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole interaction)



นอกจากนี้กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่กล่าวมาข้างต้นสามารถยืนยันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีโดยเปรียบเทียบสเปกตรัมของคอนเดนเสทก่อน และหลังการกำจัดปรอทแสดงดังภาพที่ 4-12 ผลวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า หลังจากแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

ความยาวคลื่นที่ 697.57 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งบ่งชี้ถึงสารประกอบฮาโลเจน (C-Cl) หายไป การหายไปของความถี่ในช่วงนี้บ่งบอกเป็นนัยว่าคลอไรด์ไอออนของฟีนิลเมอร์คิวริคลอไรด์ ถูกปลดปล่อยเป็นผลพลอยได้ (Byproduct) คือ กรดไฮโดรคลอริกในสารสกัด ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (4.2) [49]

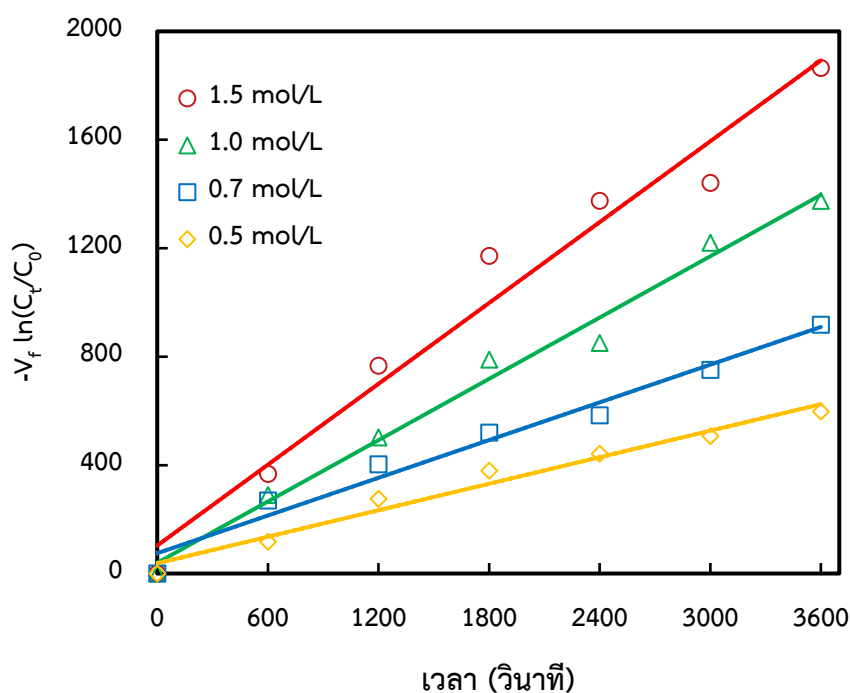


ภาพที่ 4-12 FTIR ของคอนเดนเสทก่อนและหลังแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท

4.7 ผลการคำนวณศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปรอทในสารละลายป้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเมมเบรน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสามารถหาได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังสมการที่ (2.14) ด้วยการวาดกราฟระหว่าง $-V_f \ln(C_f/C_0)$ ดังภาพที่ 4-13 เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (P) ค่าความชันของกราฟจะเท่ากับ $A_f P(\alpha_i/\alpha_i+1)t$ จากการทดลองพบว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านมีค่าดังตารางที่ 4-4 จากนั้นวาดกราฟระหว่าง $1/P$ และ $[Cl^-]/[NH_2CSNH_2]$ แสดงดังภาพที่ 4-14 ค่าความชันและจุดตัดแกน กำหนดเป็น $(r_f/r_{im}) \cdot (1/K_{ex}k_m)$

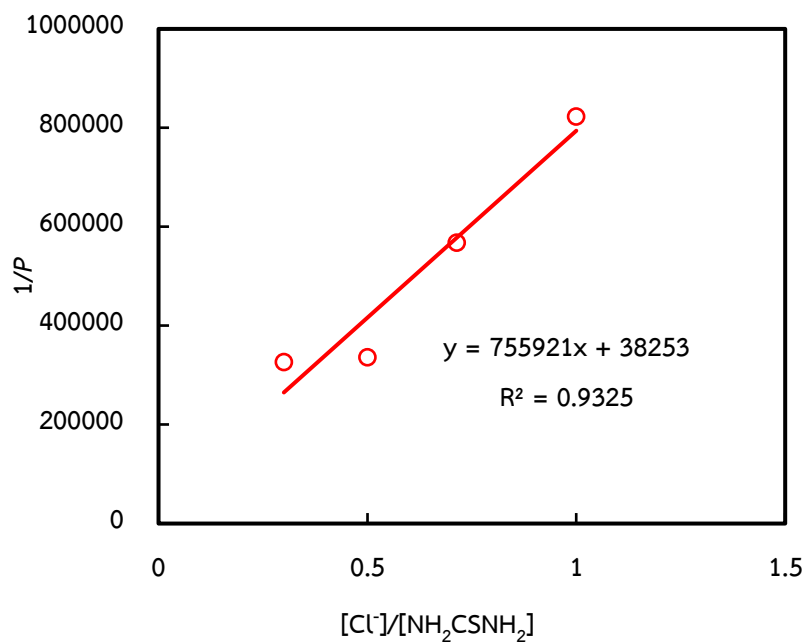
และ r_i/r_0k_s ตามลำดับอ้างอิงจากสมการที่ (2.9) - (2.10) การคำนวณค่า K_{ex} สามารถคำนวณจากนิยามของค่าคงที่ของสมดุลของปฏิกิริยาดังสมการที่ (4.3) และวาดกราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 4-15 ซึ่งค่าของ K_{ex} จะเท่ากับค่าความชัน คือ 0.159 จากการคำนวณพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของโปรทในเมมเบรน (k_m) และในด้านเปลือก (k_s) คือ 7.45×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที และ 2.09×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ จากผลการคำนวณจะเห็นได้ชัดว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในเมมเบรนเป็นขั้นตอนควบคุม เนื่องจาก k_m ต่ำกว่า k_s [34]



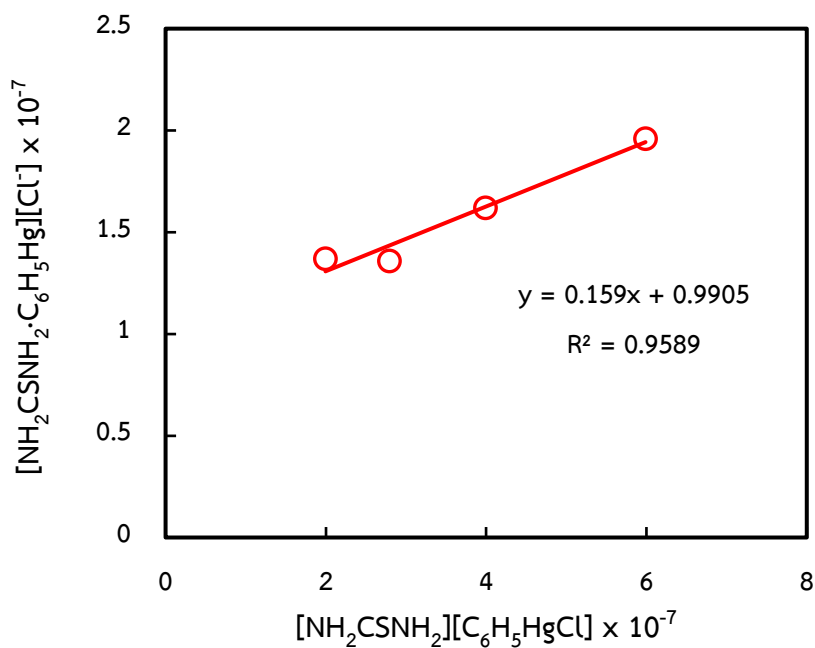
ภาพที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln(C_f/C_0)$ และ เวลา

ตารางที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของโปรทซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของไทโอยูเรียที่ความเข้มข้น 0.5-1.5 โมลต่อลิตรกำหนดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร

$[\text{NH}_2\text{CSNH}_2]$ (โมลต่อลิตร)	0.5	0.7	1.0	1.5
$P \times 10^6$ (เซนติเมตรต่อวินาที)	1.2252	1.7600	2.9779	3.0601



ภาพที่ 4-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $[Cl^-]/[NH_2CSNH_2]$ และ $1/P$

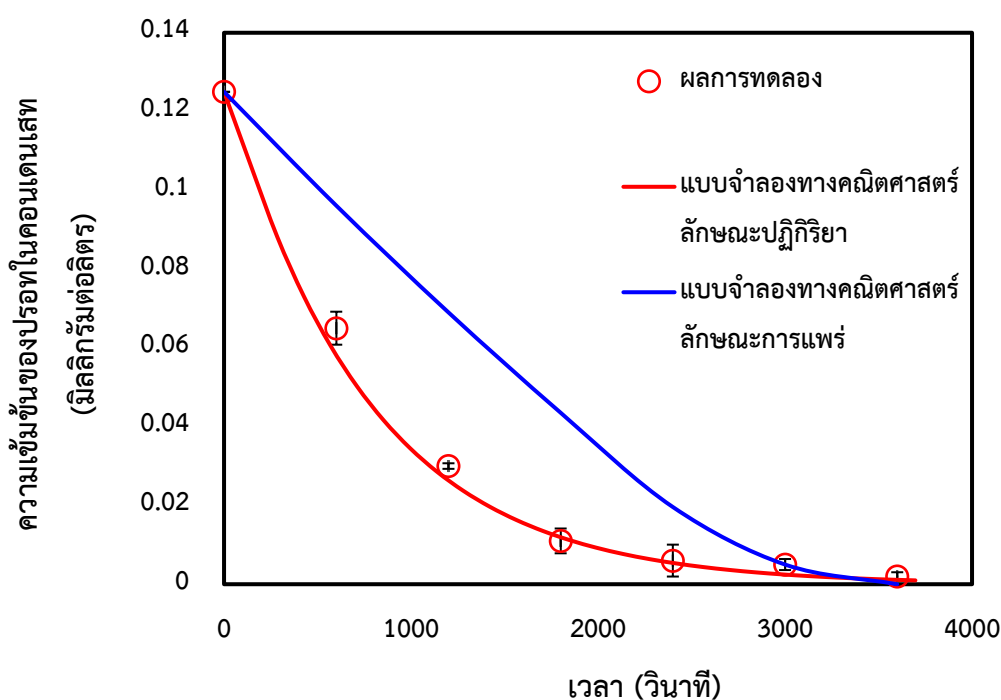


ภาพที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $[NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg][Cl^-]$ และ $[NH_2CSNH_2][C_6H_5HgCl]$

$$K_{ex} = \frac{[NH_2CSNH_2 \cdot C_6H_5Hg][Cl^-]}{[C_6H_5HgCl][NH_2CSNH_2]} \quad (4.3)$$

4.8 ผลการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการแพร่และลักษณะปฏิกิริยาในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการแพร่และลักษณะปฏิกิริยาถูกคำนวณที่เวลาใด ๆ ดังสมการที่ (2.22) และ (2.24) ตามลำดับ ภาพที่ 4-16 แสดงความเข้มข้นของปรอทในสารป้อนคอนเดนเสทที่คำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการแพร่และลักษณะปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับผลการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ณ เวลา ใดๆ ในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ จากผลการคำนวณพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะปฏิกิริยาสอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งบ่งชี้ว่าการถ่ายโอนปรอทออกจากคอนเดนเสทในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ ถูกควบคุมควบคุมด้วยปฏิกิริยา (Reaction controlled) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการแพร่ไม่แม่นยำเพราะละทิ้งการพิจารณาในส่วนของปฏิกิริยา



ภาพที่ 4-16 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของปรอทที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่และปฏิกิริยา

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทด้วยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ ผลการทดลองพบว่าระบบเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์โดยใช้หลักการของการสกัดด้วยตัวทำละลายมีประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทได้สำเร็จ ด้วยสารสกัดเสริมฤทธิ์กันที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ของกรดไฮโดรคลอริกและ 1.5 โมลต่อลิตรของไทโอยูเรีย ที่อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน อุณหภูมิและความเข้มข้นคือตัวแปรสำคัญในการเพิ่มร้อยละการสกัดปรอทออกจากคอนเดนเสทจากการศึกษาปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยในระบบการสกัดด้วยตัวทำละลายเมื่อนำสภาวะที่ดีที่สุดจากระบบการสกัดด้วยตัวทำละลายมาศึกษาในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์พบว่า ลักษณะการไหลด้วยลักษณะการไหลแบบสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน ที่อัตราการไหล 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลิตรที่เวลา 3,600 วินาที ให้ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดปรอทสูงถึง 98.40 ซึ่งถึงค่าที่ยอมรับได้ก่อนจะเข้าสู่โรงกลั่นและโรงงานปิโตรเคมีซึ่งกำหนดว่าควรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการวิเคราะห์รูปแบบของปรอทในคอนเดนเสทด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรด เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมส สเปกโตรเมทรี และเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ยืนยันว่าฟีนิลเมอร์คิวไรด์พบมากที่สุดในคอนเดนเสท ค่าอุณหภูมิศาสตร์ของระบบพบว่า ปฏิกริยาการแยกปรอทออกจากคอนเดนเสทเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน ผันกลับไม่ได้ และปฏิกริยาเกิดขึ้นได้เองที่ 323.15 เคลวิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเมมเบรน (k_f) และด้านเปลือก (k_s) มีค่าเท่ากับ 7.45×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที และ 2.09×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะปฏิกริยาสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะการแพร่

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทดลองในระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ต้องระมัดระวังการไหลข้ามฝั่งของกันและกันระหว่างคอนเดนเสทและสารสกัดต้องควบคุมอัตราการไหลให้คงที่

5.2.2 การวัดความเข้มข้นคอนเดนเสทเริ่มต้นด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอปซอบชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ต้องย่อยตัวอย่างให้อยู่ในกรดที่มีความเข้มข้นสูงก่อนนำไปตรวจทุกครั้งซึ่งต้องใช้ความร้อนและความระมัดระวังสูง

5.2.3 ควรวางแผนการใช้สารป้อนคอนเดนเสทในรอบเดียวกัน เนื่องจากสารป้อนมาจากโรงงานจริงค่าความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ ดังนั้นจึงควรวัดความเข้มข้นของปรอทก่อนทำการทดลองทุกครั้ง



บรรณานุกรม

1. Shafawi, A., *MERCURY SPECIES IN NATURAL GAS CONDENSATE*. 1999, University of Plymouth.
2. Wilhelm, S.M. and N. Bloom, *Mercury in petroleum*. Fuel Processing Technology, 2000. **63**(1): p. 1-27.
3. Liang, Y.X., et al., *Psychological effects of low exposure to mercury vapor: application of a computer-administered neurobehavioral evaluation system*. Environmental research, 1993. **60**(2): p. 320-327.
4. Díez, S., *Human health effects of methylmercury exposure*. Reviews of Environmental contamination and Toxicology, 2008. **198**: p. 111-132.
5. Bernhoft, R.A., *Mercury toxicity and treatment: a review of the literature*. Journal of Environmental and Public health, 2012. **2012**: p. 1-10.
6. Wang, J., et al., *Ionic mercury captured by H₂S sulfurized biochar in liquid hydrocarbons: Mechanism and stability evaluation*. Fuel, 2020. **278**: p. 118413.
7. Chalkidis, A., et al., *Mercury in natural gas streams: a review of materials and processes for abatement and remediation*. Journal of hazardous materials, 2020. **382**: p. 121036.
8. de Jesus, A., et al., *Determination of mercury in naphtha and petroleum condensate by photochemical vapor generation atomic absorption spectrometry*. Microchemical Journal, 2013. **110**: p. 227-232.
9. Sainal, M.R., et al., *Mercury removal system for upstream application: experience in treating mercury from raw condensate*, in *E&P Environmental and Safety Conference*. 2007: Gaveston, Texas, USA
10. Porter, M.C., *Handbook of industrial membrane technology*. 1989, Fairview: Noyes.
11. Rout, P. and K. Sarangi, *A comparative study on extraction of Mo(VI) using both solvent extraction and hollow fiber membrane technique*. Hydrometallurgy, 2013. **133**: p. 149-155.

12. Sangtumrong, S., et al., *Purely separation of mixture of mercury and arsenic via hollow fiber supported liquid membrane*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2007. **13**(5): p. 751-756.
13. Chakrabarty, K., P. Saha, and A.K. Ghoshal, *Simultaneous separation of mercury and lignosulfonate from aqueous solution using supported liquid membrane*. Journal of Membrane Science, 2010. **346**(1): p. 37-44.
14. Minhas, F.T., S. Memon, and M. Bhangar, *Transport of Hg(II) through bulk liquid membrane containing calix [4] arene thioalkyl derivative as a carrier*. Desalination, 2010. **262**(1-3): p. 215-220.
15. Chaturabul, S., et al., *Separation of mercury(II) from petroleum produced water via hollow fiber supported liquid membrane and mass transfer modeling*. Chemical Engineering Journal, 2015. **265**: p. 34-46.
16. Sribudda, D., et al., *Separation of mercury and arsenic from produced water via hollow fiber contactor: Kinetic and mass transfer analysis*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2016. **33**(1): p. 197-206.
17. Hamzah, B., S. Rahmawati, and R. Hardani, *Application of benzoyl-acetone as a cation carrier in mercury(II) extraction by using liquid membrane emulsion technique*. Key Engineering Materials, 2019. **811**: p. 80-85.
18. Meera, R., T. Francis, and M. Reddy, *Studies on the liquid-liquid extraction of mercury(II) from acidic chloride solutions using Cyanex 923*. Hydrometallurgy, 2001. **61**(2): p. 97-103.
19. Traiwongsa, N., et al., *Mechanisms of mercury ions separation by non-toxic organic liquid membrane via DFT, thermodynamics, kinetics and mass transfer model*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2023. **117**: p. 522-537.
20. Shafawi, A., et al., *Preliminary evaluation of adsorbent-based mercury removal systems for gas condensate*. Analytica Chimica Acta, 2000. **415**(1-2): p. 21-32.
21. Report, P.O. *Business Value Chain*. 2021 [cited 2023 26]; Available from: <https://www.pttgcgroup.com/en/about-gc/our-company/business-value-chain>.
22. Boening, D.W., *Ecological effects, transport, and fate of mercury: a general review*. Chemosphere, 2000. **40**(12): p. 1335-1351.

23. Shafawi, A., et al., *Determination of total mercury in hydrocarbons and natural gas condensate by atomic fluorescence spectrometry*. Analyst, 1999. **124**(2): p. 185-189.
24. Zulaikhah, S.T., J. Wahyuwibowo, and A.A. Pratama, *Mercury and its effect on human health: a review of the literature*. Int J Public Health, 2020. **9**: p. 103-114.
25. Saleh, T.A., *Characterization, determination and elimination technologies for sulfur from petroleum: Toward cleaner fuel and a safe environment*. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2020. **25**: p. e00080.
26. Díez, S., *Human health effects of methylmercury exposure*. Reviews of environmental contamination and toxicology, 2009: p. 111-132.
27. Bernhoft, R.A., *Mercury toxicity and treatment: a review of the literature*. Journal of environmental and public health, 2012. **2012**.
28. Bouyssiere, B., et al., *Speciation analysis for mercury in gas condensates by capillary gas chromatography with inductively coupled plasma mass spectrometric detection*. Journal of Chromatography A, 2002. **976**(1-2): p. 431-439.
29. Kocherginsky, N., Q. Yang, and L. Seelam, *Recent advances in supported liquid membrane technology*. Separation and Purification technology, 2007. **53**(2): p. 171-177.
30. Suren, S., et al., *The elimination of trace arsenic via hollow fiber supported liquid membrane: experiment and mathematical model*. Scientific Reports, 2021. **11**(1): p. 11790.
31. รามกุล, ป., การสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่มีเส้นใยกลางรองรับ. 2559: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
32. Rydberg, J., *Solvent extraction principles and practice, revised and expanded*. 2004: CRC press.
33. Lothongkum, A.W., et al., *Simultaneous removal of arsenic and mercury from natural-gas-co-produced water from the Gulf of Thailand using synergistic extractant via HFSLM*. Journal of membrane science, 2011. **369**(1-2): p. 350-358.
34. Mohdee, V., et al., *Synergistic interplay between Aliquat 336 and organophosphorus extractants towards non-dispersive extraction of arsenic from*

- petroleum produced water via hollow fiber membrane contactor*. Separation and purification technology, 2022. **286**: p. 120431.
35. Cheng, C.-S., *Theory of factorial design: Single-and multi-stratum experiments*. 2013: CRC Press.
 36. Juang, R.-S. and H.-C. Kao, *Extraction separation of Co (II)/Ni (II) from concentrated HCl solutions in rotating disc and hollow-fiber membrane contactors*. Separation and purification technology, 2005. **42**(1): p. 65-73.
 37. Koretsky, M.D., *Engineering and Chemical Thermodynamics*. second ed. ed. 2004, New York: John Wiley & Sons.
 38. Pirom, T., et al., *The effect of temperature on mass transfer and thermodynamic parameters in the removal of amoxicillin via hollow fiber supported liquid membrane*. Chemical Engineering Journal, 2015. **265**: p. 75-83.
 39. Mohdee, V., V. Parasuk, and U. Pancharoen, *Synergistic effect of Thiourea and HCl on palladium(II) recovery: An investigation on chemical structures and thermodynamic stability via DFT*. Arabian Journal of Chemistry, 2021. **14**(7): p. 103196.
 40. Danesi, P.R., *A simplified model for the coupled transport of metal ions through hollow-fiber supported liquid membranes*. Journal of membrane science, 1984. **20**(3): p. 231-248.
 41. Yadav, K.K., D. Singh, and V. Kain, *Separation of terbium from aqueous phase employing hollow fibre supported liquid membrane with EHEHPA as carrier*. Separation Science and Technology, 2019. **54**(9): p. 1521-1532.
 42. Wilke, C. and P. Chang, *Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions*. AIChE journal, 1955. **1**(2): p. 264-270.
 43. Wongsawa, T., et al., *High-efficiency HFSLM for silver-ion pertraction from pharmaceutical wastewater and mass-transport models*. Chemical Engineering Research and Design, 2014. **92**(11): p. 2681-2693.
 44. Bird, R.B., W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, second ed. ed. 2002, , New York: John Wiley & Sons

45. Pancharoen, U., T. Wongsawa, and A.W. Lothongkum, *A reaction flux model for extraction of Cu(II) with LIX84I in HFSLM*. Separation Science and Technology, 2011. **46**(14): p. 2183-2190.
46. Ambare, D., et al., *Non-dispersive solvent extraction of neodymium using a hollow fiber contactor: Mass transfer and modeling studies*. Journal of membrane science, 2013. **446**: p. 106-112.
47. Szarka, S., et al., *GC and GC-MS studies on the essential oil and thiophenes from Tagetes patula L.* Chromatographia, 2006. **63**: p. S67-S73.
48. Nandiyanto, A.B.D., R. Oktiani, and R. Ragadhita, *How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material*. Indonesian Journal of Science and Technology, 2019. **4**(1): p. 97-118.
49. Devi, D.R. and G.R. Battu, *Qualitative phytochemical screening and FTIR spectroscopic analysis of Grewia tilifolia (VAHL) Leaf Extracts*. International Journal of Current Pharmaceutical Research, 2019. **11**: p. 100-107.
50. Heyward, M. and R. Hurle, *Determination of the recovery of dimethylmercury and diphenylmercury extracted from organic solvents and a liquid condensate with bromine water using cold vapour atomic absorption spectrometry*. Analytical Communications, 1997. **34**(10): p. 279-282.
51. Gaulier, F., et al., *Mercury speciation in liquid petroleum products: Comparison between on-site approach and lab measurement using size exclusion chromatography with high resolution inductively coupled plasma mass spectrometric detection (SEC-ICP-HR MS)*. Fuel Processing Technology, 2015. **131**: p. 254-261.
52. Saleh, T.A., et al., *Analytical methods for mercury speciation, detection, and measurement in water, oil, and gas*. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2020. **132**: p. 116016.
53. Luo, F., D. Li, and P. Wei, *Synergistic extraction of zinc(II) and cadmium(II) with mixtures of primary amine N1923 and neutral organophosphorous derivatives*. Hydrometallurgy, 2004. **73**(1-2): p. 31-40.

54. Stas, J. and H. Alsawaf, *Liquid-liquid extraction of hydrochloric acid from aqueous solutions by Tri-n-dodecylamine and Tri-n-octylamine/diluents*. Period. Polytech. Chem. Eng., 2016. **60**(2): p. 130-135.
55. Levenspiel, O., *Chemical Reaction Engineering*. third ed. ed. 1999, New York: John Wiley & Sons.
56. Suren, S., et al., *Uphill transport and mathematical model of Pb(II) from dilute synthetic lead-containing solutions across hollow fiber supported liquid membrane*. Chemical engineering journal, 2012. **191**: p. 503-511.
57. Wongkaew, K., et al., *Mass transfer resistance and response surface methodology for separation of platinum(IV) across hollow fiber supported liquid membrane*. Journal of Industrial and Engineering chemistry, 2016. **42**: p. 23-35.
58. Smith, J.M., et al., *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. eight ed. ed. 1949, New York: McGraw-Hill
59. Mohdee, V., et al., *Synergistic strippants of Pd(II) ions in the presence of chloride medium from wastewater of electroless plating process via solvating system: Kinetics and thermodynamics study*. Separation Science and Technology, 2019. **54**(17): p. 2971-2982.
60. Schiessl, W.C., et al., *Experimental and theoretical approaches to the protonation of thiourea: A convenient nucleophile in coordination chemistry revisited*. Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, 2005. **631**(13-14): p. 2812-2819.
61. Cottrell, T.L., *The Strengths of Chemical Bonds*. second ed. ed. 1958, Butterworth, London.

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลความเข้มข้นของปรอทในสารสกัดภายหลังการสกัด และร้อยละการกำจัด
ปรอทด้วยชนิดของสารสกัดที่แตกต่างกันด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ชนิดของสารสกัด	ความเข้มข้นของปรอทใน สารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัดปรอท
โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.0013	0.06
น้ำกลั่น	0.0025	0.10
โซเดียมคลอไรด์	0.0027	0.11
กรดซัลฟิวริก	0.0064	0.26
กรดไนตริก	0.0109	0.45
ไทโอยูเรีย	0.0227	0.94
กรดไฮโดรคลอริก	0.0640	2.66

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้น 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของทุกสารสกัด ที่
0.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 600 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของ
คอนเดนเสทต่อสารสกัดเป็น 1

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลดิบของร้อยละการกำจัดปรอทด้วยการออกแบบวิธีการแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

การทดลองที่	ตัวแปร			ร้อยละการกำจัดปรอท
	ความเข้มข้น (โมลต่อลิตร)	อุณหภูมิ (เคลวิน)	ชนิดของสาร	
1	0.5	303.15	กรดไฮโดรคลอริก	3.143
2	1.25	303.15	กรดไฮโดรคลอริก	7.339
3	2	303.15	กรดไฮโดรคลอริก	9.054
4	0.5	313.15	กรดไฮโดรคลอริก	4.536
5	1.25	313.15	กรดไฮโดรคลอริก	8.107
6	2	313.15	กรดไฮโดรคลอริก	13.821
7	0.5	323.15	กรดไฮโดรคลอริก	0.049
8	1.25	323.15	กรดไฮโดรคลอริก	0.066
9	2	323.15	กรดไฮโดรคลอริก	0.089
10	0.5	303.15	กรดไนตริก	1.036
11	1.25	303.15	กรดไนตริก	2.518
12	2	303.15	กรดไนตริก	2.786
13	0.5	313.15	กรดไนตริก	1.035
14	1.25	313.15	กรดไนตริก	2.589
15	2	313.15	กรดไนตริก	3.339
16	0.5	323.15	กรดไนตริก	0.393
17	1.25	323.15	กรดไนตริก	0.643
18	2	323.15	กรดไนตริก	0.750
19	0.5	303.15	ไทโอยูเรีย	0.071
20	1.25	303.15	ไทโอยูเรีย	1.035
21	2	303.15	ไทโอยูเรีย	2.929
22	0.5	313.15	ไทโอยูเรีย	2.750
23	1.25	313.15	ไทโอยูเรีย	3.350
24	2	313.15	ไทโอยูเรีย	3.645
25	0.5	323.15	ไทโอยูเรีย	0.964

26	1.25	323.15	ไทโอยูเรีย	1.036
27	2	323.15	ไทโอยูเรีย	3.339

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลความเข้มข้นของปรอทในสารสกัดภายหลังการสกัด และร้อยละการกำจัดปรอทด้วยสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ที่ไทโอยูเรียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ความเข้มข้นของไทโอยูเรีย (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของปรอทในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัดปรอท
0.1	0.0962	4.01
0.3	0.1013	4.22
0.5	0.1067	4.45
1	0.1164	4.85
1.2	0.3763	15.68
1.4	0.5165	21.52
1.5	0.5376	23.48
2	0.4497	18.74

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้น 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร กำหนดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกคงที่ ที่ 0.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 600 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของคอนเดนเสทต่อสารสกัดเป็น 1

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลความเข้มข้นของปรอทในสารสกัดภายหลังการสกัด และร้อยละการกำจัดปรอทด้วยสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ที่กรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นของปรอทในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัดปรอท
0.1	0.3834	19.17
0.2	0.4747	19.78
0.3	0.4862	20.26
0.4	0.4296	21.15
0.5	0.5376	23.48
1	0.5126	21.36
1.5	0.4905	20.44
2	0.4725	19.69

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้น 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร กำหนดความเข้มข้นของไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 600 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของคอนเดนเสทต่อสารสกัดเป็น 1

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในสารสกัดภายหลังการสกัด และร้อยละการกำจัดปรอทด้วยสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความเข้มข้นของปรอทในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัดปรอท
303.15	0.5376	22.4
308.15	1.2364	51.52
313.15	1.8100	75.42
318.15	1.8528	77.20
323.15	1.9344	80.60

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทเริ่มต้น 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร และไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร ความเร็วรอบปั่นกววน 600 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของคอนเดนเสทต่อสารสกัดเป็น 1

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัดปรอทด้วยเวลาที่แตกต่างกันโดยเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในรูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวน

เวลา (วินาที)	ความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสท (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของปรอทในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัดปรอท
0	0.1250	0.0000	0.00
600	0.0650	0.0600	48.00
1200	0.0300	0.0950	76.00
1800	0.0110	0.1140	91.20
2400	0.0060	0.1190	95.20
3000	0.0050	0.1200	96.00
3600	0.0020	0.1230	98.40

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทในคอนเดนเสท 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือ สารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร และไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนและสารสกัดไหลวน อัตราการไหลของน้ำสารป้อนและสารสกัดที่ 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัดปรอทด้วยเวลาที่แตกต่างกันโดยเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ในรูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน

เวลา (วินาที)	ความเข้มข้นของ ปรอทในคอนเดน เสท (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของปรอท ในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด ปรอท
0	0.1250	0.0000	0.00
600	0.0950	0.0190	16.67
1200	0.0917	0.0223	19.56
1800	0.0901	0.0239	20.96
2400	0.0853	0.0286	25.15
3000	0.0849	0.0290	25.47
3600	0.0839	0.0300	26.32

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทในคอนเดนเสท 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือ สารสกัดเสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร และไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน อัตราการไหลของน้ำสารป้อนและสารสกัดที่ 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด
ปรอทด้วยอัตราการไหล 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

อัตราการไหล 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที			
เวลา (วินาที)	ความเข้มข้นของ ปรอทในคอนเดน เสท (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของปรอท ในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด ปรอท
0	0.1250	0.0000	0.00
600	0.0950	0.0190	48.00
1200	0.0917	0.0223	76.00
1800	0.0901	0.0239	91.20
2400	0.0853	0.0286	95.20
3000	0.0849	0.0290	96.00
3600	0.0839	0.0300	98.40

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทในคอนเดนเสท 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือ สารสกัด
เสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร
และไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน
อุณหภูมิตั้งที่ 323.15 เคลวิน

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด
ปรอทด้วยอัตราการไหล 3.33 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

อัตราการไหล 3.33 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที			
เวลา (วินาที)	ความเข้มข้นของ ปรอทในคอนเดน เสท (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของปรอท ในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด ปรอท
0	0.1250	0.0000	0.00
600	0.0650	0.0510	40.80
1200	0.0300	0.0821	65.68
1800	0.0110	0.0919	73.52
2400	0.0060	0.0988	79.04
3000	0.0050	0.1015	81.20
3600	0.0020	0.1059	84.72

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทในคอนเดนเสท 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือ สารสกัด
เสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร
และไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน
อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด
ปรอทด้วยอัตราการไหล 5.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

อัตราการไหล 5.00 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที			
เวลา (วินาที)	ความเข้มข้นของ ปรอทในคอนเดน เสท (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของปรอท ในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด ปรอท
0	0.1250	0.0000	0.0
600	0.0650	0.0324	25.92
1200	0.0300	0.0563	45.04
1800	0.0110	0.0695	55.60
2400	0.0060	0.0750	60.00
3000	0.0050	0.0856	68.48
3600	0.0020	0.0949	75.92

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทในคอนเดนเสท 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือ สารสกัด
เสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร
และไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน
อุณหภูมิตั้งที่ 323.15 เคลวิน

ตารางที่ ก-11 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด
ปรอทด้วยอัตราการไหล 6.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที

อัตราการไหล 6.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที			
เวลา (วินาที)	ความเข้มข้นของ ปรอทในคอนเดน เสท (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของปรอท ในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด ปรอท
0	0.1250	0.0000	0.00
600	0.0650	0.0248	19.84
1200	0.0300	0.0486	38.88
1800	0.0110	0.0652	52.16
2400	0.0060	0.0687	54.96
3000	0.0050	0.0767	61.36
3600	0.0020	0.0832	66.56

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทในคอนเดนเสท 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือ สารสกัด
เสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร
และไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน
อุณหภูมิตั้งที่ 323.15 เคลวิน

ตารางที่ ก-12 ข้อมูลความเข้มข้นของปรอทในคอนเดนเสทและสารสกัด และร้อยละการกำจัด
ปรอทด้วยอัตราการไหลที่เวลา 0-7,200 วินาที

เวลา (วินาที)	ความเข้มข้นของ ปรอทในคอนเดน เสท (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ความเข้มข้นของปรอท ในสารสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด ปรอท
0	0.1250	0.0000	0.00
600	0.0650	0.0600	48.00
1200	0.0300	0.0950	76.00
1800	0.0110	0.1140	91.20
2400	0.0060	0.1190	95.20
3000	0.0050	0.1200	96.00
3600	0.0020	0.1230	98.40
5400	0.0020	0.1223	97.84
7200	0.0020	0.1173	93.84

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอทในคอนเดนเสท 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือ สารสกัด
เสริมฤทธิ์ของกรดไฮโดรคลอริกและไทโอยูเรีย ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 โมลต่อลิตร
และไทโอยูเรียที่ 1.5 โมลต่อลิตร รูปแบบการไหลลักษณะสารป้อนไหลผ่านและสารสกัดไหลวน อัตรา
การไหล 1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณข้อมูล

1) การคำนวณร้อยละการกำจัดของปรอท

$$\text{ร้อยละการกำจัด (\% Removal)} = \frac{C_{\text{Hg,t}}}{C_{\text{Hg,i}}} \times 100$$

สถานะที่ใช้ทดลอง : จากตารางที่ ก-1 ความเข้มข้นปรอทในคอนเดนเสท 2.40 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 600 รอบต่อนาที ความเร็วรอบปั่นกววน 600 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของคอนเดนเสทต่อสารสกัดเป็น 1

ความเข้มข้นของสารปรอทเริ่มต้นในคอนเดนเสท ($C_{\text{Hg,i}}$) = 2.40 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารปรอทหลังสกัดในวัฏภาคสารละลาย ($C_{\text{Hg,t}}$) = 0.0640 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการกำจัดปรอท (\% Removal)} &= \frac{0.0640}{2.4} \times 100 \\ &= 0.027 \end{aligned}$$

2) การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปรอทในสารละลายป้อน (k_p) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในเมมเบรน (k_m) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก (k_s)

จากสมการที่ (2.6) วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-V_f \ln \frac{C_t}{C_0}$ กับ เวลา ที่ทุกความเข้มข้น 0.5 0.7 1.5 2 โมลต่อลิตรของไทโอยูเรีย กำหนดให้กรดไฮโดรคลอริกคงที่ที่ 0.5 โมลต่อลิตร จะได้ค่าความชันเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่า สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ยกตัวอย่างที่ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

$$-V_f \ln \frac{C_t}{C_0} = A_E P \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_i + 1} \right) t$$

$$\text{โดยที่ } \alpha_i = \frac{Q}{P L E \pi N r_i}$$

แทนสมการที่ (2.6) และจัดรูปใหม่จะได้ดังนี้

$$\alpha_i = \frac{2.813 \times 10^{-4}}{P} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

จากสมการที่ (2.6) ค่าความชันมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านดังนี้

$$\text{slope} = A_E P \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_{i+1}} \right)$$

เมื่อแทนค่าความชันและ $\alpha_i = \frac{2.813 \times 10^{-4}}{P}$ เข้าไปในสมการนี้ จะสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่านออกมาได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.063×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที

เมื่อ	ค่าความชัน	=	29.826
	Q	=	1.67 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที
	L	=	ความยาวของโมดูล (เซนติเมตร)
	ϵ	=	0.3
	π	=	3.146
	N	=	35,000 เส้น
	r_i	=	0.012 เซนติเมตร
	A_E	=	14,000 ตารางเซนติเมตร

คำนวณลักษณะนี้ต่อที่ ความเข้มข้น 0.7 1.5 2 โมลต่อลิตร จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านแต่ละความเข้มข้นสำหรับใช้ในการคำนวณคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของปรอทในเมมเบรน (k_m) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นเปลือก (k_s) ตามสมการที่ (2.7) ดังนี้

$$\frac{1}{P} = \frac{r_i}{r_{lm} P_m} + \frac{r_i}{r_0 k_s}$$

โดยที่ $r_{lm} = \frac{r_0 - r_i}{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)}$

จัดรูปความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเยื่อแผ่นเหลวดังนี้

$$P_m = Dk_m$$

$$K_{\text{ex}} = \frac{[\text{NH}_2\text{CS}^+\text{NH}_2 \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}] [\text{Cl}^-]}{[\text{C}_6\text{H}_5\text{HgCl}] [\text{NH}_2\text{CSNH}_2]}$$

ใช้นิยามของสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในการจัดรูปใหม่ดังนี้

$$P_m = Dk_m$$

$$P_m = K_{\text{ex}} \frac{[\text{NH}_2\text{CSNH}_2]}{[\text{Cl}^-]} k_m$$

ใช้ความสัมพันธ์นี้แทนในสมการที่ (2.7) ดังนี้

$$\frac{1}{P} = \frac{r_i}{r_{\text{lm}} K_{\text{ex}} \frac{[\text{NH}_2\text{CSNH}_2]}{[\text{Cl}^-]} k_m} + \frac{r_i}{r_0 k_s}$$

เมื่อ $r_i = 0.012$ เซนติเมตร

$r_0 = 0.015$ เซนติเมตร

$r_{\text{lm}} = 0.0134$ เซนติเมตร

$K_{\text{ex}} = 0.159$

วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/P$ และ $[\text{Cl}^-]/[\text{NH}_2\text{CSNH}_2]$ นำค่าความชันและจุดตัดแกน y ใช้สำหรับการคำนวณค่า k_m และ k_s จะได้ค่าเท่ากับ 7.45×10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที และ 2.09×10^{-5} เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

2) การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการแพร่และลักษณะปฏิกิริยาในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะการแพร่ในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ ใช้สมการที่ (2.22) ในการคำนวณ ณ ที่เวลาใดๆ ดังนี้

$$[C_6H_5HgCl]_t = \frac{R_s [C_6H_5HgCl]_0 + R_m [C_6H_5HgCl]_0 + R_m \overline{[NH_2CS^+NH_2 \cdot C_6H_5Hg]}}{R_s} \\ \times \exp\left(\frac{-A_E}{V_f} \frac{1}{2R_m}\right) - R_m \frac{[C_6H_5HgCl]_0 \overline{[NH_2CS^+NH_2 \cdot C_6H_5Hg]}}{R_s}$$

โดยที่ R_m หรือ $(1/k_m)$ = 1.34×10^4 วินาทีต่อเซนติเมตร

R_s หรือ $(1/k_s)$ = 4,781.63 วินาทีต่อเซนติเมตร

V_f = 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

A_E = 14,000 ตารางเซนติเมตร

$[C_6H_5HgCl]_0$ = 0.125 มิลลิกรัมต่อลิตร

$\overline{[NH_2CS^+NH_2 \cdot C_6H_5Hg]}$ = ความเข้มข้นของปรอทเชิงซ้อนในสารสกัด ณ เวลาต่างๆ

จากการทดลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลักษณะปฏิกิริยาในการกำจัดปรอทออกจากคอนเดนเสทโดยระบบเมมเบรนเส้นใยกลวงแบบคอนแทกเตอร์ ใช้สมการที่ (2.24) เนื่องจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การแยกปรอทออกจากคอนเดนเสท พบว่า เป็นปฏิกิริยา อันดับที่ 1 การคำนวณ ณ ที่เวลาใดๆ ดังนี้

กรณีปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง ณ เวลาใด ๆ (First-order reaction, $n = 1$)

$$\bar{C}_{A(L,t)} = e^{-\alpha} \bar{C}_{A(0,t-\tau_0)}$$

เมื่อ $\alpha = \frac{k_A L}{Q}$

$$\bar{C}_{A(L,t)} = C_{A(L,t)} - C_{A(L,0)},$$

$$\bar{C}_{A(0,t-\tau_0)} = C_{A(0,t-\tau_0)} - C_{A(0,0)},$$

และ $\tau_0 = \frac{LA_c}{Q}$

การคำนวณจะคำนวณตามค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาผ่านค่า τ_0 ในการทดลองนี้ค่า τ_0 มีค่าเท่ากับ 2.37 ดังนั้นขั้นตอนการคำนวณดังนี้จนครบ 60 นาที

$$t = 2.37$$

$$C_{A(L, 2.73)} = e^{-\alpha} (C_{A(0, 0)} - C_{A(0, 0)}) + C_{A(L, 0)}$$

$$t = 4.74$$

$$C_{A(L, 4.74)} = e^{-\alpha} (C_{A(0, 2.73)} - C_{A(0, 0)}) + C_{A(L, 0)}$$

$$t = 7.11$$

$$C_{A(L, 7.11)} = e^{-\alpha} (C_{A(0, 4.74)} - C_{A(0, 0)}) + C_{A(L, 0)}$$

$$t = n + 2.73 \dots \dots \dots \text{จนเข้าใกล้ 60 นาที}$$

ภาคผนวก ค**ผลงานตีพิมพ์**

ชื่อบทความ New upstream solution for mercury removal from petroleum condensate via HFMC: thermodynamics, kinetics, DFT and mass transport, Poolkaew et al., Hydrometallurgy (Ranking: T1, I.F. 4.217)

วันที่ตีพิมพ์



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรัญญา พูลแก้ว
วัน เดือน ปี เกิด	30 เมษายน 2541
สถานที่เกิด	โรงพยาบาล พระนั่งเกล้า
วุฒิการศึกษา	2553-2559 ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชลประทานวิทยา จังหวัดนนทบุรี 2559-2563 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2563-ปัจจุบัน เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	11/692 ถนน จรัญสนิทวงศ์ 1 แขวง วัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพมหานคร10600