

การแยกปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยน้ำมันพืชผ่านวิธีการสกัดและนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่น
เหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MERCURY SEPARATION FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY VEGETABLE OIL
EXTRACTION AND RECOVERY VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE
SYSTEM



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	การแยกปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยน้ำมันพืชผ่านวิธีการสกัดและนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง
โดย	น.ส.กัญญาณัฐ ดวงจันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.กริชชาติ ว่องไวลิขิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กษิตศ หนูทอง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ธนพร วรณโชติ)

กัญญาณัฐ ดวงจันทร์ : การแยกปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยน้ำมันพืชผ่านวิธีการสกัดและนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง. (MERCURY SEPARATION FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY VEGETABLE OIL EXTRACTION AND RECOVERY VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.อุรา ปานเจริญ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดและนำกลับปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยน้ำมันพืชซึ่งเป็นสารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เป็นไปตามหลักการและพื้นฐานของวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ผลการศึกษาพบว่าน้ำมันข้าวโพดมีประสิทธิภาพในการสกัดปรอทสูงที่สุด และยังสามารถเลือกสกัดปรอทออกจากไอออนโลหะอื่นที่ปนในน้ำทิ้งสังเคราะห์ได้ดี จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน พบว่า อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ และความเข้มข้นของสารนำกลับ ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับปรอทอย่างมีนัยสำคัญ สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดและนำกลับปรอท ได้แก่ อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 3 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1.2 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ค่าร้อยละการสกัดและนำกลับปรอท 96.14 และ 40.13 ตามลำดับ กลไกการสกัดปรอทเกิดจากการจับกันด้วยพันธะฮาโลเจนของปรอทและกรดไขมันที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอกซิลิก สนับสนุนด้วยการวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโคปีร่วมกับทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น คำนวณค่าพลังงานเอนทาลปีและพลังงานของกิบส์ ได้ -23.71 และ 24.38 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ นอกจากนี้การคำนวณค่าอันดับปฏิกิริยาและค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับปรอทด้วยวิธีอินทิเกรต ซึ่งได้ค่าอันดับปฏิกิริยาเท่ากับ 1 และ 0 ได้ค่าคงที่ปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0262 นาที⁻¹ และ 0.0011 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที ตามลำดับ อีกทั้งวิธีการสกัดปรอทด้วยน้ำมันข้าวโพดโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงประสบความสำเร็จในการลดค่าความเข้มข้นของปรอทให้อยู่ภายใต้ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของประเทศไทย

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370017721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: mercury, Hollow fiber supported liquid membrane, density functional theory, vegetable oil, Response Surface Methodology

Kanyanat Duangchan : MERCURY SEPARATION FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY VEGETABLE OIL EXTRACTION AND RECOVERY VIA HOLLOW FIBER SUPPORTED LIQUID MEMBRANE SYSTEM. Advisor: Prof. URA PANCHAROEN

This work presents the extraction and stripping of mercury from synthetic wastewater by vegetable oils, an environmentally friendly substance, via a hollow fiber supported liquid membrane in accordance with the principle and basis of the solvent extraction method. Results demonstrate that corn oil proved to be the most efficient solvent for mercury extraction, and it can also selectively extract mercury from other metal ions contaminated in synthetic wastewater. The study of the influence of factors affecting the percentage of mercury extraction and recovery using the Box-Behnken experimental design revealed that temperature, pH of the synthetic wastewater, and stripping concentration all significantly. Under optimal conditions, results demonstrate that mercury extraction and stripping percentages reach 96.14% and 40.13%, respectively at temperature 323.15 K, pH 3, 1.2 M of HCl concentration, and 100 ml/min of flow rate. The mechanism of mercury extraction is induced by the formation of halogen bonds between mercury and fatty acids in the carboxylic group, as supported by spectroscopy and density functional theory. The thermodynamic properties of this reaction reveal the calculated standard enthalpy change and the calculated standard Gibb's free energy change: $-23.71 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ and $24.38 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. In addition, extraction and stripping kinetics are found to be of the first order ($k = 0.182 \text{ min}^{-1}$) and zero-order ($k = 0.9244 \text{ L}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), respectively. It is seen that this method has the ability to successfully remove mercury while still remaining below the standard discharge level.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การแยกปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยน้ำมันพืชผ่านวิธีการสกัดและนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง” นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อย่างยิ่งที่สละเวลาคอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำ ทำให้โครงการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. กริชชาติ ว่องไวลิขิต (ประธานกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์) รองศาสตราจารย์ ดร. กษิติศ หนูทอง (กรรมการการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์) และ ดร. ธนพร วรรณโชติ (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการแก้ไขตลอดโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณทุนการศึกษาของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนตลอดการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

ขอขอบพระคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยแยกมวลสาร (Mass separation laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์เครื่องมือ งานวิจัยลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณสมาชิกในหน่วยปฏิบัติการวิจัยแยกมวลสารทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณครอบครัวที่คอยผลักดัน สนับสนุนและเป็นกำลังใจสำคัญในทุกด้านตลอดการศึกษา ส่งผลให้โครงการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาของผู้สนใจต่อไป

กัญญาณัฐ ดวงจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ปรัชญา	5
2.1.1 แหล่งที่พบปรัชญา.....	5
2.1.1.1 แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ	5
2.1.1.2 แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์.....	6
2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรัชญา	7
2.1.3 ประเภทของปรัชญา	8
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานปรัชญาในด้านต่างๆ.....	9
2.1.5 ความเป็นพิษและอันตรายจากปรัชญา.....	11
2.1.6 กระบวนการกำจัดปรัชญา	12

2.2 เทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลว	14
2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พยุงบดด้วยตัวรองรับ	15
2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุบบนตัวรองรับ.....	16
2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงบดด้วยเส้นใยกลาง	17
2.3.1 การคำนวณประสิทธิภาพการสกัดและนำกลับ	19
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พยุงบดด้วยเส้นใยกลาง	20
2.4 ชนิดของสารสกัด	21
2.4.1 สารสกัดชนิดกรด	21
2.4.2 สารสกัดชนิดเบส.....	21
2.4.3 สารสกัดชนิดคอลเลต.....	22
2.5 สารนำกลับ	22
2.6 น้ำมันพืช	23
2.6.1 กรดไขมัน	23
2.6.2 คุณสมบัติของน้ำมันพืช	24
2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการใช้น้ำมันพืชสกัดโลหะหนัก	25
2.7 วิธีการฟื้นผิวตอบสนอง.....	28
2.7.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD).....	31
2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการสกัดและนำกลับไอออนโลหะ	
32	
2.8 ทฤษฎีฟังก์ชันกันนอลความหนาแน่น	33
2.8.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันกันนอลความหนาแน่นเชิงสมบัติโครงสร้าง	35
2.8.2 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันกันนอลความหนาแน่นเชิงออร์บิทัลของโมเลกุล	35
2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาทฤษฎีฟังก์ชันกันนอลความหนาแน่น.....	36
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม.....	37

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	40
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	41
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2.2 เครื่องวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.2.3 การคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	42
3.3 วิธีการทดลอง	42
3.3.1 การเตรียมสารละลายน้ำทิ้งสังเคราะห์.....	42
3.3.2 การสกัดและนำกลับปรอทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	45
3.3.3 การสกัดและการนำกลับปรอทด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	48
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	55
4.1 การศึกษาการสกัดและนำกลับปรอทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	55
4.1.1 ผลการศึกษาชนิดของน้ำมันพืชที่แตกต่างกัน.....	55
4.1.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน.....	57
4.1.3 ผลการศึกษาการสกัดไอออนโลหะอื่นจากน้ำทิ้งสังเคราะห์	58
4.1.4 ผลการศึกษาชนิดของสารนำกลับที่แตกต่างกัน	59
4.1.5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารนำกลับที่แตกต่างกัน	60
4.2 การสกัดและการนำกลับปรอทด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง	61
4.2.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....	61
4.2.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลที่แตกต่างกัน.....	63
4.2.3 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน.....	64
4.2.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยและสภาวะที่ดีที่สุดของการสกัดและนำกลับปรอทโดยใช้การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	66
4.2.5 ผลการศึกษาเวลาในการสกัดและนำกลับปรอท.....	77

4.2.6 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการสกัดและการนำกลับปรอทด้วยน้ำมันพืช	78
4.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสารด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปี.....	79
4.3.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี.....	79
4.3.2 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโคปี	80
4.4 กลไกการสกัดและนำกลับปรอทจากน้ำทิ้งสังเคราะห์.....	81
4.4.1 ผลการคำนวณทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	84
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	85
บรรณานุกรม.....	87
ภาคผนวก ก.....	99
ภาคผนวก ข.....	106
ภาคผนวก ค.....	113
ประวัติผู้เขียน.....	115

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท	7
ตารางที่ 2-2 ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการกำจัดปรอท	12
ตารางที่ 2-3 การแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง	20
ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชแตกต่างกัน [43-45].....	25
ตารางที่ 2-5 ปริมาณกรดไขมันและน้ำมันพืชแต่ละชนิด [46-49]	25
ตารางที่ 2-6 การแยกโลหะหนักด้วยตัวทำละลายที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม	26
ตารางที่ 2-7 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปและตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	27
ตารางที่ 2-8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการสกัดและนำกลับไอออนโลหะ	33
ตารางที่ 2-9 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นในงานวิจัยก่อนหน้า	36
ตารางที่ 3-1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
ตารางที่ 3-2 คุณลักษณะของเครื่องเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใย [5]	42
ตารางที่ 3-3 องค์ประกอบของน้ำทิ้งสังเคราะห์ [6].....	43
ตารางที่ 3-4 ขอบเขตและช่วงของตัวแปรจากการทดลอง	52
ตารางที่ 3-5 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพินที่ผิวตอบสนอง แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน 3 ตัวแปรของการสกัดและนำกลับปรอท	53
ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ	57
ตารางที่ 4-2 ปริมาณกรดไขมันของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ	57
ตารางที่ 4-3 การเปรียบเทียบค่าร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากการทำนายด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจำนวน 3 ตัวแปร	67

ตารางที่ 4-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับการสกัดโปรทด้วยระบบเยื่อแผ่นที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	70
ตารางที่ 4-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับการนำกลับโปรทด้วยระบบเยื่อแผ่นที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	71
ตารางที่ 4-6 ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับที่อันดับการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ.....	78
ตารางที่ 4-7 ความยาวคลื่นของน้ำมันข้าวโพดก่อนสกัดและหลังสกัดโปรท.....	79
ตารางที่ ก-1 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของโปรทในน้ำทิ้งสังเคราะห์ภายหลังการสกัด และร้อยละการสกัดโปรทด้วยชนิดของน้ำมันพืชที่แตกต่างกันด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	99
ตารางที่ ก-2 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของโปรทในน้ำทิ้งสังเคราะห์ภายหลังการสกัด และร้อยละการสกัดโปรทด้วยอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกันด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	99
ตารางที่ ก-3 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของไอออนโลหะในน้ำทิ้งสังเคราะห์ภายหลังการสกัด และร้อยละการไอออนโลหะด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	100
ตารางที่ ก-4 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของโปรทภายหลังการนำกลับ และร้อยละการนำกลับโปรทด้วยชนิดของสารนำกลับที่แตกต่างกันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	100
ตารางที่ ก-5 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของโปรทภายหลังการนำกลับ และร้อยละการนำกลับโปรทด้วยความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	101
ตารางที่ ก-6 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของโปรทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัดและนำกลับโปรทด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	102
ตารางที่ ก-7 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของโปรทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัดและนำกลับโปรทด้วยอัตราการใช้ที่แตกต่างกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	102
ตารางที่ ก-8 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของโปรทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัดและนำกลับโปรทด้วยค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง.....	103
ตารางที่ ก-9 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของโปรทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัดและนำกลับโปรทโดยใช้การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	104

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทด้วยเวลาที่แตกต่างกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง..... 105

ตารางที่ ข-1 การคำนวณการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับปรอทที่อันดับปฏิกิริยาที่ศูนย์ 107

ตารางที่ ข-2 การคำนวณการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับปรอทที่อันดับปฏิกิริยาที่หนึ่ง..... 109

ตารางที่ ข-3 การคำนวณการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับปรอทที่อันดับปฏิกิริยาที่สอง 111



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 ปริมาณปรอทที่พบจากแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ	5
ภาพที่ 2-2 ปริมาณปรอทที่พบจากแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์	6
ภาพที่ 2-3 แผนผังทั่วไปของ กระบวนการขุดเจาะน้ำมันและแก๊ส และกระบวนการกลั่น ซึ่งประกอบด้วยน้ำจากหลุมขุดเจาะและน้ำเสียจากกระบวนการผลิต [4]	7
ภาพที่ 2-4 กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย	14
ภาพที่ 2-5 การแบ่งประเภทของเทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลว	15
ภาพที่ 2-6 การเคลื่อนที่ของสารที่ต้องการแยกในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจากวัฏภาคสารละลายไปสู่วัฏภาคน้ำกลับ	17
ภาพที่ 2-7 มอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง	18
ภาพที่ 2-8 ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารนำกลับของเส้นใยกลวงหนึ่งเส้นภายในเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง	18
ภาพที่ 2-9 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมัน	24
ภาพที่ 2-10 ภาพรวมวิธีการพื้นผิวตอบสนอง	29
ภาพที่ 2-11 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง	30
ภาพที่ 2-12 แบบจำลองการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	32
ภาพที่ 2-13 ระดับของทฤษฎีที่นิยมใช้ในการคำนวณทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น	35
ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้	44
ภาพที่ 3-2 กระบวนการสกัดและนำกลับปรอทจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย	45
ภาพที่ 3-3 กระบวนการสกัดและนำกลับปรอทด้วยเทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (1) วัฏภาคสารละลายป้อน (2) เครื่องสูบ (3) มาตรการวัดอัตราการไหล (4) เครื่องเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (5) วัฏภาคน้ำกลับ	48

ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดปรอทและความเข้มข้นของปรอทหลังกระบวนการสกัดกับชนิดของน้ำมันพืชที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด	56
ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดปรอทและความเข้มข้นของปรอทหลังกระบวนการสกัดกับอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำที่สังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด	58
ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดปรอทกับไอออนโลหะในน้ำที่สังเคราะห์ โดยใช้ไขมันข้าวโพดเป็นสารสกัด ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด	59
ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของร้อยละการนำกลับปรอทกับชนิดของสารนำกลับที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด.....	60
ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ของร้อยละการนำกลับปรอทกับความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด.....	61
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทกับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด.....	63
ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทกับอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด	64
ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทกับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่สังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด	65
ภาพที่ 4-9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าจากการทดลองกับค่าจากการทำนาย (ก) ร้อยละการสกัดปรอท และ (ข) ร้อยละการนำกลับปรอท	68
ภาพที่ 4-10 กราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (ก) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่สังเคราะห์ (X1X2) (ข) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X1X3) และ (ค) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่สังเคราะห์และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X2X3) ที่มีผลต่อร้อยละการสกัด	73
ภาพที่ 4-11 กราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (ก) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่สังเคราะห์ (X1X2) (ข) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X1X3) และ (ค) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่สังเคราะห์และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X2X3) ที่มีผลต่อร้อยละการสกัด	75

ภาพที่ 4-12 ผลการทำนายค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับปรอท รวมทั้งค่าสถานะที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร.....	76
ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทกับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดและนำกลับปรอท.....	77
ภาพที่ 4-14 FTIR ของน้ำมันข้าวโพดก่อนและสกัดปรอท.....	80
ภาพที่ 4-15 UV-vis ของ (ก) น้ำทิ้งสังเคราะห์ก่อนและหลังสกัดปรอท (ข) กรดไฮโดรคลอริกก่อนและหลังนำกลับ	81
ภาพที่ 4-16 กลไกการสกัดสารปรอทด้วยกรดไลโนเลอิกตามทฤษฎีระดับ B3LYP/LANL2DZ.....	83
ภาพที่ ข-1 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการสกัดอันดับที่ศูนย์	108
ภาพที่ ข-2 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการนำกลับอันดับที่ศูนย์.....	108
ภาพที่ ข-3 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการสกัดอันดับที่หนึ่ง.....	110
ภาพที่ ข-4 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของอันดับปฏิกิริยาการนำกลับอันดับที่หนึ่ง.....	110
ภาพที่ ข-5 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการสกัดอันดับที่สอง.....	112
ภาพที่ ข-6 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการนำกลับอันดับที่สอง.....	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาผลกระทบจากโลหะหนักเป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งทั่วโลกมีความตระหนักถึงผลกระทบนี้อย่างมาก พรอทเป็นหนึ่งในโลหะหนักที่มีความเป็นพิษ พบว่ามีการปนเปื้อนทางดิน อากาศ และน้ำ [1] ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน และแก๊สธรรมชาติมีการปนเปื้อนของพรอทในน้ำจากแหล่งปิโตรเลียม (Produced water) [2, 3] ซึ่งองค์ประกอบจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางธรณีวิทยา และพื้นที่ของหลุมขุดเจาะ [4, 5] รายงานงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปริมาณพรอทที่ปนเปื้อนในน้ำจากแหล่งปิโตรเลียมมีค่าในช่วงไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร [6-8] โดยความเข้มข้นพรอทที่พบในน้ำจากแหล่งปิโตรเลียมบริเวณอ่าวไทย พบว่ามีความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร [6] ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญเนื่องจากมีค่าเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมีค่าไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร [9] สารพรอทเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ และระบบนิเวศ โดยความอันตรายขึ้นอยู่กับรูปแบบที่แตกต่างกันของพรอท เช่น พรอทในรูปของสารประกอบอินทรีย์มีความเป็นพิษต่อระบบประสาท พรอทในรูปของสารประกอบอนินทรีย์มีความเป็นอันตรายต่อไต [10] สารพรอทไม่เพียงแต่เป็นอันตรายต่อสุขภาพร่างกาย แต่สามารถส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ที่เกิดจากการกัดกร่อนของพรอทได้ [5]

โดยทั่วไปวิธีการนำน้ำจากแหล่งปิโตรเลียมที่ปนเปื้อนพรอทกลับคืนสู่หลุมขุดเจาะเดิม เรียกว่า re-injection เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการกำจัดน้ำส่วนเกินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก แต่วิธีการนี้อาจไม่เหมาะสมเนื่องจากเพิ่มความเสี่ยงในการรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม [4, 8] วิธีการเบื้องต้นในการกำจัดพรอทที่ปนเปื้อนพบว่ามีหลายวิธี เช่น กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and flocculation) [11] การตกตะกอน (Precipitation) [12] การดูดซับ (Adsorption) [13] และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) [14] จากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่ากำจัดพรอทด้วยวิธีการดูดซับยังคงมีความเข้มข้นของพรอทก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมสูงเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด [15] โดยอีกวิธีการที่เป็นที่สนใจของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีคือ กระบวนการสกัด (Liquid-liquid

extraction, LLE) เนื่องจากความหลากหลายของตัวทำละลาย และประสบผลสำเร็จในการกำจัดสารปนเปื้อนจากน้ำจากแหล่งปิโตรเลียม [16]

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) คือ กระบวนการแยกซึ่งเป็นการถ่ายโอนตัวถูกละลายในตัวทำละลายหนึ่งไปสู่ตัวทำละลายอื่น โดยตัวทำละลายทั้งสองนั้นต้องไม่ละลายด้วยกัน หรือสามารถละลายด้วยกันได้เพียงบางส่วน [17] ข้อดีของการสกัดคือ เป็นวิธีการปฏิบัติที่ง่าย สามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ได้ และให้ประสิทธิภาพการสกัดที่สูง ในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (Hollow fiber supported liquid membrane, HFSLM) ซึ่งประสบความสำเร็จอย่างมากในการกำจัดและนำกลับไอออนโลหะโดยใช้พื้นฐานความรู้ของการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยข้อดี คือ สามารถเกิดกระบวนการสกัดและนำกลับไอออนโลหะได้ในเวลาเดียวกัน ใช้งานได้ดีสำหรับความเข้มข้นต่ำ ใช้พลังงานต่ำ เป็นต้น หลายงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยการใช้สารสกัดที่มีความเป็นกรด (Acidic extractant) [18] เบส (Basic extractant) [19] และซอลเวต (Solvating extractant) [20] ซึ่งละลายในตัวทำละลาย เช่น น้ำมันก๊าด [21] โทลูอีน [10] เฮกเซน [22] ตัวทำละลายที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อจำกัดเนื่องจากความเป็นพิษ และสามารถติดไฟได้ง่าย [23] แนวโน้มในการเลือกใช้สารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นตัวทำละลายจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว น้ำมันพืชเป็นตัวเลือกสำคัญเพื่อใช้ศึกษา งานวิจัยที่ผ่านมา น้ำมันพืชเป็นสารไม่มีขั้ว ประกอบด้วย กลีเซอรอล และกรดไขมัน โดยที่กรดไขมันประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกแบบอะลิฟาติก (Aliphatic carboxylic acids, -COOH) และคาร์บอนจำนวน 2-24 ตัว [24] แม้ว่าความหนืดของน้ำมันพืชจะแสดงถึงข้อจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลายที่เป็นพิษ แต่น้ำมันพืชยังคงเป็นทางเลือกใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ระเหยได้ง่าย มีความเป็นพิษต่ำ มีจุดวาบไฟที่สูงส่งผลให้ติดไฟยาก [25] ในปัจจุบันพบว่าน้ำมันพืชมีประสิทธิภาพที่สูงมากในการกำจัดปรอทโดยไม่ต้องใช้สารสกัด น้ำมันทานตะวันมีความสามารถในการกำจัดปรอทในรูปอนินทรีย์ Hg(I) โดยสกัดได้ 100% ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ดังนั้น การศึกษาการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นทางเลือกใหม่ เพื่อกำจัดโลหะหนักถือเป็นการศึกษาใหม่ และประสบผลสำเร็จในการเลือกใช้สารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาการกำจัดและนำกลับปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยน้ำมันพืชโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายซึ่งเป็นการทดลองเบื้องต้น (Preliminary experiment) ได้แก่ ชนิดของ

น้ำมันพืชที่แตกต่างกัน อัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำที่สังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ชนิดของสารนำกลับที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่สนใจเบื้องต้น เป็นข้อมูลในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัดและนำกลับของปรอทด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่ อัตราการไหลของสารป้อนและสารนำกลับ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่สังเคราะห์ และความเข้มข้นของสารนำกลับ เลือกใช้วิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design, BBD) เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดของการสกัดและนำกลับปรอท และสามารถอธิบายอิทธิพลเดี่ยว และอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่สนใจศึกษา การวิเคราะห์กลไกการสกัดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีที่ได้จากการทดลองร่วมกับทฤษฎีควอนตัม การศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาจากการเปลี่ยนแปลงของพันธะ หรือหมู่ฟังก์ชันด้วย เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform infrared spectroscopy, FT-IR) และเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรสโคปี (Ultraviolet-visible spectroscopy, UV-vis) การศึกษาโครงสร้างและเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic stabilities) โดยใช้ทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น (Density Functional Theory, DFT) การศึกษาจลนศาสตร์ของการสกัด (Kinetics)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัดและนำกลับของปรอทโดยใช้น้ำมันพืชผ่านวิธีการสกัดและนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดปรอทด้วยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ ชนิดของน้ำมันพืช (น้ำมันคาโนลา น้ำมันลินซีด และน้ำมันข้าวโพด) อัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำที่สังเคราะห์ (0.15-1) และการสกัดไอออนโลหะอื่นจากน้ำที่สังเคราะห์

1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการนำกลับปรอทด้วยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ ชนิดของสารนำกลับ (กรดไนตริก กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ และไทโอยูเรีย) และความเข้มข้นของสารนำกลับ (0.5-4 โมลต่อลิตร)

13.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดและนำกลับปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่ อุณหภูมิ (303.15-323.15 เคลวิน) อัตราการไหล (100-400 มิลลิลิตรต่อนาที) และค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (2-10)

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยร่วมและสภาวะที่ดีที่สุดของการสกัดและนำกลับปรอทโดยใช้การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ได้แก่ อุณหภูมิ (303.15-323.15 เคลวิน) ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (2-10) และความเข้มข้นของสารนำกลับ (0.5-1 โมลต่อลิตร)

1.3.5 ศึกษาเวลาในการสกัดและนำกลับปรอท (0-270 นาที)

1.3.6 ศึกษาจลนศาสตร์ของการสกัดและการนำกลับปรอท

1.3.7 ศึกษากลไกการสกัดปรอทด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีร่วมกับทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัดและนำกลับของปรอทโดยใช้น้ำมันพืชผ่านวิธีการสกัดและนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

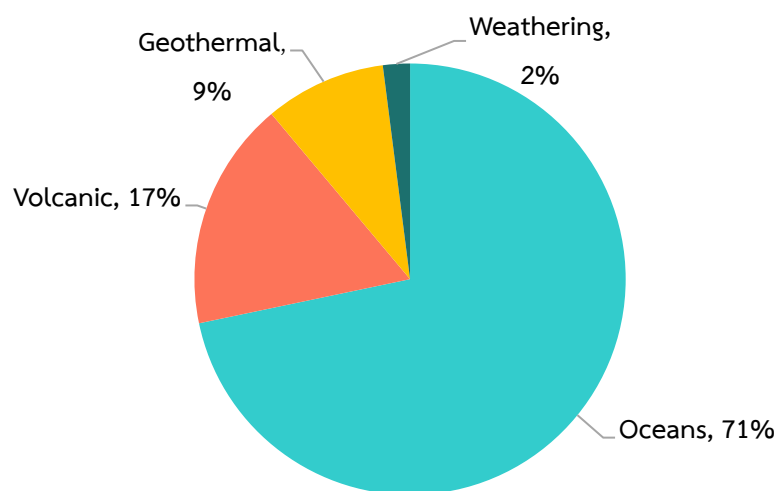
2.1 ปรอท

2.1.1 แหล่งที่พบปรอท

ปรอทเป็นโลหะหนักที่เป็นพิษพบได้ตามธรรมชาติทั่วโลก โดยแหล่งที่พบปรอทสามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ [26]

2.1.1.1 แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ

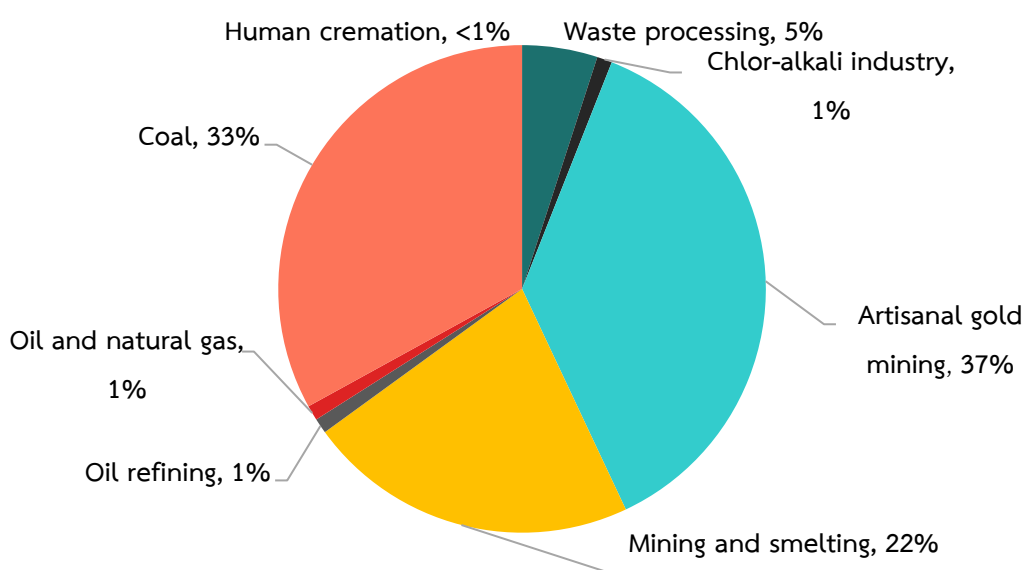
ปรอทที่พบจากแหล่งกำเนิดธรรมชาติโดยไม่รวมถึงปรอทที่เกิดจากกิจกรรมใด ๆ ของมนุษย์ แหล่งที่มาของปรอทตามธรรมชาติ ได้แก่ การระเหยตามธรรมชาติจากพื้นผิวมหาสมุทร (Ocean surfaces, 71%) ภูเขาไฟระเบิด (Volcanic eruptions, 17%) เกิดจากการระเหยออกจากลาวาร้อน และปล่อยสู่บรรยากาศพร้อมกับแก๊สอื่น กิจกรรมความร้อนใต้พิภพ (Geothermal activities, 9%) เช่น น้ำพุร้อน (Hot springs) หรือพุก๊าส (Fumaroles) และการผุกร่อนของแร่ธาตุปรอท (Weathering of mercury-containing minerals, 2%) ซึ่งปริมาณการเกิดปรอทจากกิจกรรมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2-1 การปล่อยสารปรอทสู่บรรยากาศโดยธรรมชาตินั้นมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับการปล่อยปรอททั่วโลกทั้งหมดประมาณปีละ 643 ตัน



ภาพที่ 2-1 ปริมาณปรอทที่พบจากแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ

2.1.1.2 แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์

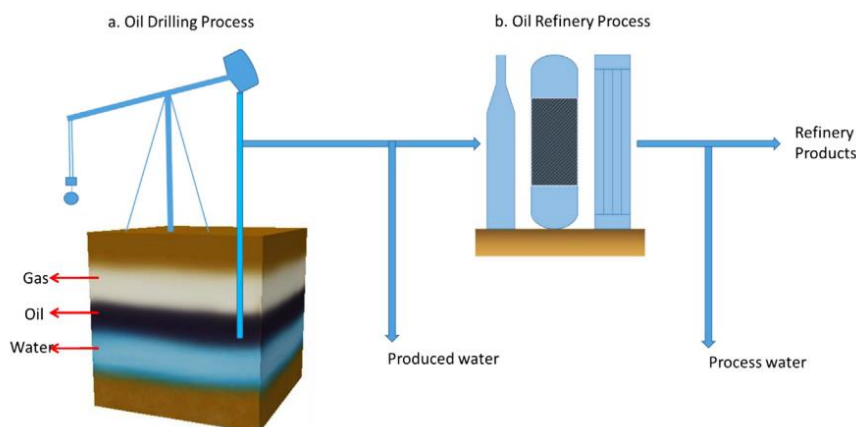
ปรอทที่พบจากแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทแรกพบจากปรอทที่พบโดยการเจือปนมากับเชื้อเพลิง หรือวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการภายในระบบ หรือเป็นผลผลิตพลอยได้ที่ไม่ได้ต้องการ (By-product) แหล่งที่มาหลักของปรอทในชั้นบรรยากาศในหมวดหมู่นี้ ได้แก่ การเผาถ่านหิน (Coal, 33%) และกิจกรรมการขุดและถลุงแร่ (Artisanal gold, 22%) การเผาไหม้จากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ (Combustion of oil and natural gas, 1%) และการกลั่นน้ำมัน (Oil refining, 1%) ประเภทที่สอง ปรอทที่ปล่อยออกมาเนื่องจากการผลิต และกระบวนการอย่างเจตนา แหล่งที่ใหญ่ที่สุดของปรอทในชั้นบรรยากาศ ประเภทนี้คือ การขุดทองคำขนาดเล็ก (Gold mining, 37%) ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต (Disposal or processing of waste, 5%) อุตสาหกรรมผลิตคลอรีนและอัลคาไลน์ (Chlor-alkali industry, 1%) และการเผา (human cremation, 1%) แสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ปริมาณปรอทที่พบจากแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์

โดยในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันจากการขุดเจาะน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ น้ำที่ขึ้นมาพร้อมกับน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ มีชื่อเรียกว่า produced water ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ซึ่งโดยปกติจะมีการเจือปนจากโลหะหนัก เช่น ปรอท และสารหนู เป็นต้น โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าน้ำ

จากแหล่งปิโตรเลียมที่มีแหล่งที่มาจากอ่าวไทยมีค่าความเข้มข้นปรอทสูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน (> 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าอยู่ไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร หากมีการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันจำเป็นต้องมีการกำจัดโลหะหนักที่เป็นพิษออกก่อนเข้าสู่กระบวนการ [4]



ภาพที่ 2-3 แผนผังทั่วไปของ กระบวนการขุดเจาะน้ำมันและแก๊ส และกระบวนการกลั่น ซึ่งประกอบด้วยน้ำจากหลุมขุดเจาะและน้ำเสียจากกระบวนการผลิต [4]

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท แสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปรอท

คุณสมบัติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY	
สัญลักษณ์	Hg	
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)	200.59	กรัมต่อกรัมโมล
ความหนาแน่น (Density) ที่ 20 องศาเซลเซียส	13.546	กรัมต่อมิลลิลิตร
จุดเดือด (Boiling point)	356.9	องศาเซลเซียส
จุดเยือกแข็ง (Freezing point)	-38.87	องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	13.545	
ความสามารถในการละลายในน้ำ (Solubility in water)	ต่ำ	
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of melting)	2.82	แคลอรีต่อกรัม
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent heat of vaporization)	65	แคลอรีต่อกรัม

2.1.3 ประเภทของปรอท

ปรอทสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ได้แก่ รูปของโลหะ (Metallic mercury) รูปของสารประกอบปรอทอนินทรีย์ (Inorganic mercury compound) และรูปของสารประกอบปรอทอินทรีย์ (Organic mercury compound)

2.1.3.1 รูปของโลหะ (Metallic mercury)

ปรอทที่พบในรูปนี้จะเป็นโลหะปรอทที่บริสุทธิ์ ซึ่งไม่รวมตัวกับธาตุใด ๆ โลหะปรอทที่บริสุทธิ์มีสีเงินวาว มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง และไม่สามารถละลายน้ำได้ โดยทั่วไปในธรรมชาติจะไม่ค่อยพบสารปรอทในรูปของโลหะปรอทบริสุทธิ์ แต่จะพบสารปรอทที่อยู่ในรูปของสารประกอบต่าง ๆ หากเก็บโลหะปรอทบริสุทธิ์ไว้ในภาชนะที่ไม่มีฝาปิด ปรอทจะสามารถเกิดการระเหยอย่างช้า ๆ กลายเป็นไอของปรอทเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ การระเหยนี้จะมีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.1.3.2 รูปของสารประกอบปรอทอนินทรีย์ (Inorganic mercury compound)

สารประกอบประเภทนี้สามารถพบได้ในธรรมชาติ ตัวอย่างสารประกอบ เช่น สารประกอบซัลไฟด์ (Mercury (II) sulphide, HgS) สารประกอบออกไซด์ (Mercury (II) oxide, HgO) สารประกอบคลอไรด์ (Mercury (II) chloride, $HgCl_2$) สารประกอบไนเตรด (Mercury(II) nitrate, $Hg(NO_3)_2$) สารประกอบคาร์บอเนต (Mercury (I) carbonate, Hg_2CO_3) เป็นต้น เกลือของปรอทส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นผลึก หรือเป็นผง เกลือของปรอทบางชนิดเมื่อสัมผัสกับแสงจะทำให้มีสีเปลี่ยนไป เช่น HgS ซึ่งเป็นของแข็งสีแดง เมื่อสัมผัสกับแสงจะเปลี่ยนเป็นสีดำ เป็นต้น เกลือของปรอทบางชนิดสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิห้อง เช่น $HgCl_2$ สามารถกลายเป็นไอได้และมีความเสถียรอยู่ในบรรยากาศได้ในระยะเวลาสั้น เกลือของสารปรอทส่วนใหญ่สามารถละลายน้ำได้ และมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าโลหะปรอทที่บริสุทธิ์

2.1.3.3 รูปของสารประกอบปรอทอินทรีย์ (Organic mercury compound)

สารประกอบประเภทนี้เป็นสารประกอบของปรอทที่เกิดจากการรวมตัวของปรอทกับธาตุคาร์บอนและธาตุอื่น ๆ สารประกอบกลุ่มนี้จำแนกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็น สารประกอบกลุ่มแอลคิล (Alkyl organomercury) เช่น สารประกอบเมทิล (Methylmercury, CH_3Hg)

สารประกอบไดเมทิล (Dimethylmercury, $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$) สารประกอบเอทิล (Ethylmercury, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Hg}$) เป็นต้น และกลุ่มที่สองเป็นสารประกอบกลุ่มอะโรมาติก (Aromatic organomercury) เช่น phenylmercuric acetate ($\text{C}_6\text{H}_5\text{HgC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ หรือเรียกย่อว่า PMA) เป็นต้น สารประกอบปรอทอินทรีย์สามารถละลายได้ดีในไขมัน

2.1.4 การประยุกต์ใช้งานปรอทในด้านต่างๆ

ปรอทนำมาใช้งานในหลากหลายด้านและนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยแบ่งเป็น การประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์ วิทยาศาสตร์ การเกษตร การทหาร และอุตสาหกรรมต่างๆ ดังต่อไปนี้ [28]

2.1.4.1 การประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์

ในทางการแพทย์ปรอทเป็นส่วนผสมของยารักษาโรคหลายชนิดใช้ในการอุดฟันปรอทอะมัลกัม (Mercury amalgams) และเป็นองค์ประกอบในเครื่องมือแพทย์ เช่น เครื่องมือที่ใช้วัดความดันโลหิต เนื่องจากปรอทเป็นสารที่มีความหนาแน่นสูงกว่าตะกั่ว จึงนำปรอทมาทำเป็นเครื่องกำบังรังสีแทนการใช้ตะกั่ว ปรอทเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อเชื้อโรค ดังนั้นจึงนำสารประกอบบางชนิดของปรอทมาใช้เป็นยาฆ่าเชื้อได้ เช่น ใช้สาร HgCl_2 และ HgO เป็นยาฆ่าเชื้อ สาร Hg_2Cl_2 ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อรา

2.1.4.2 การประยุกต์ใช้งานด้านวิทยาศาสตร์

ในทางวิทยาศาสตร์ปรอทเป็นหนึ่งในส่วนประกอบของเครื่องมือเทอร์โมมิเตอร์ ใช้ในการวัดอุณหภูมิซึ่งจะใช้โลหะปรอทบริสุทธิ์บรรจุไว้ในขวดแก้ว บารอมิเตอร์ ใช้ในการตรวจวัดความดันบรรยากาศ เป็นต้น ใช้เป็นตัวเร่ง (Catalyst) ในกระบวนการทางเคมี และนำมาใช้ในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ นอกจากนี้ยังใช้ mercury(II) chloride (Hg_2Cl_2) เป็นวัสดุในการทำอิเล็กโทรด (Electrode) อิเล็กโทรดที่ผลิตจาก Hg_2Cl_2 เรียกว่า คาโลเมลอิเล็กโทรด (Calomel electrode) ซึ่งใช้เป็นส่วนสำคัญในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ เช่น อิเล็กโทรดของเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH meter)

2.1.4.3 การประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตร

ในทางการเกษตรปรอทเป็นองค์ประกอบของยากำจัดแมลง และสารเคมีกำจัดเชื้อราในพืช ทำให้สามารถป้องกันกำจัดแมลงและเชื้อราที่เป็นศัตรูพืชได้

2.1.4.4 การประยุกต์ใช้งานด้านการทหาร

ในทางการทหารเป็นองค์ประกอบอย่างหนึ่งในการทำระเบิด

2.1.4.5 การประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ในทางการใช้งานปรอทในอุตสาหกรรม พบว่าปรอทเป็นส่วนประกอบหนึ่งในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์ไฟฟ้า อุตสาหกรรมผลิตคลอรีนและโซดาไฟ อุตสาหกรรมกระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษ และอุตสาหกรรมผลิตสีทาบ้าน เป็นต้น

1) อุตสาหกรรมผลิตเครื่องมือและอุปกรณ์ไฟฟ้า (Electrical industry) ปรอทมักจะถูกใช้ในการผลิตหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ สวิตซ์ไฟฟ้า หรือสวิตซ์อัตโนมัติ สำหรับตู้เย็น ตลอดจนถ่านไฟฟ้านิตต่าง ๆ เครื่องควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ เครื่องทำความร้อน เป็นต้น สำหรับแบตเตอรี่ สารปรอทใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ประเภทหนึ่งที่มีขนาดเล็ก ถูกผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ. 1940 โดยใช้สังกะสี (Zn) เป็นขั้วแอโนด (Anode) ใช้ mercury(II) oxide (HgO) เป็นขั้วแคโทด (Cathode) และใช้สารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์

2) อุตสาหกรรมการผลิตคลอรีนและอัลคาไลน์ (chloralkali industry) ในกระบวนการนี้ส่วนใหญ่ปรอทจะถูกนำมาใช้ในการเตรียมคลอรีนและโซดาไฟ โดยใช้ปรอทเป็นอิเล็กโทรดในเซลล์อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic cell) ของกระบวนการแยกสารละลาย NaCl ด้วยไฟฟ้า ไอระเหยที่ออกมาจากกระบวนการผลิต การระบายอากาศจากห้องผลิตน้ำเสียจากโรงงาน มีโอกาสที่ปรอทจะปะปนออกมา จึงมีการหลีกเลี่ยงการใช้ปรอทโดยใช้ระบบการผลิตอื่น

3) อุตสาหกรรมกระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษ (Paper and pulp industry) สารปรอท ได้ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการเติบโตของเชื้อรา และแบคทีเรียบนเนื้อเยื่อของไม้ในกระบวนการผลิต น้ำเสียที่ออกมาจากอุตสาหกรรมประเภทนี้จึงมักมีส่วนผสมของปรอทเสมอ

4) อุตสาหกรรมผลิตสีทาบ้าน (Paints) สีตกแต่งทั่วไปมักมีส่วนผสมของปรอท โดยใช้สาร HgS เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตสีแดง ดังนั้นปรอทมีโอกาสหลุดออกจากกระบวนการและเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้

2.1.5 ความเป็นพิษและอันตรายจากปรอท

ปรอทเป็นสารที่มีพิษร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิต สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง [27] คือ

2.1.5.1 ทางการหายใจ ปรอทสามารถเข้าร่างกายได้โดยสูดเอาผงหรือไอของสารปรอทเข้าสู่ปอด เนื่องจากสารปรอทสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ง่าย

2.1.5.2 ทางปาก การรับสารปรอทเข้าสู่ร่างกาย มักเกิดขึ้นเนื่องจากการรับประทาน อาหาร น้ำ พืชผักผลไม้ที่มีสารปรอทปนเปื้อนอยู่

2.1.5.3 ทางผิวหนัง การรับสารปรอทเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังเกิดขึ้น เนื่องจากมนุษย์สัมผัสสารปรอทที่มีสภาพเป็นฝุ่นละอองหรือไอระเหย เมื่อสารปรอทซึมเข้าสู่ผิวหนังจะทำให้ผิวหนังเกิดการระคายเคือง มีอาการผื่นแดง คัน บวม และอาจมีอาการถึงเป็นแผลลึกมีหนอง เมื่อร่างกายได้รับสารปรอท ปรอทจะซึมเข้าสู่กระแสเลือด ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย อาการพิษจากสารปรอทสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทดังนี้

1) อาการพิษแบบเรื้อรัง (Chronic poisoning) เกิดขึ้นเมื่อผู้ป่วยได้รับสารปรอทเข้าไปสะสมในร่างกายทีละน้อย ร่างกายจะไม่แสดงพิษจากปรอทโดยทันทีแต่จะแสดงอาการออกมาเมื่อมีปรอทสะสมปริมาณหนึ่ง พิษแบบนี้สารปรอทจะไปทำอันตรายต่อระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system) ทำให้ผู้ป่วยมีอาการเคลื่อนไหวสั่นกระตุก อาการสั่นกระตุกจะเริ่มที่มือก่อนต่อมาจึงเกิดการสั่นกระตุกที่ใบหน้า แขนและขา ส่งผลให้ผู้ป่วยมีบุคลิกภาพเปลี่ยนไป สารปรอทยังทำให้เกิดผลกระทบเกี่ยวกับหลอดเลือด ซึ่งจะทำให้ผู้ป่วยมีอาการร้อน ๆ หนาว ๆ โดยไม่ทราบสาเหตุ นอกจากนี้ยังทำให้ผู้ป่วยพูดจาไม่ชัด พูดลำบาก หูได้ยินไม่ค่อยชัด ฟันหลุดร่วง เหงือกอักเสบ ตาพร่ามัว มีอาการอักเสบเรื้อรังของเยื่อจมูกและตา หน้าซีด น้ำลายไหล ท้องเสียเรื้อรัง คลื่นไส้อาเจียน อาการพิษเรื้อรังที่เกิดกับผิวหนังของผู้ป่วย จะทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนังเรื้อรังและแพ้ง่าย สารปรอทที่เข้าสู่ร่างกายจะสะสมไว้มากที่สุดที่ไต รองลงมาคือตับและสมอง กรณีที่ร่างกายได้รับสารปรอทปริมาณน้อยเข้าสู่ร่างกาย ไตสามารถกำจัดสารปรอทออกทางปัสสาวะได้โดยไม่เป็นอันตราย มีข้อเสนอแนะว่าถ้าในปัสสาวะมีปรอทมากกว่า 0.1-0.5 ไมโครกรัมต่อลิตร ควรไปพบแพทย์เพื่อรักษา

2) อาการพิษแบบเฉียบพลัน (Acute poisoning) เกิดขึ้นเมื่อผู้ป่วยได้รับสารปรอทปริมาณสูงเข้าสู่ร่างกาย เช่น กรณีสูดหายใจเอาไอ หรือฝุ่นของสารปรอทปริมาณสูงเข้าสู่ร่างกาย พิษที่เกิดขึ้นจากสารปรอทจะเกิดขึ้นทันที โดยสารปรอทจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อหลอดลมอย่างมาก ทำให้ไออย่างรุนแรง เจ็บหน้าอก หายใจลำบาก ปวดศีรษะ ต่อมาจะเริ่มมีอาการไข้ และประมาณ 3 วันต่อมาจะเริ่มมีอาการปวดเมื่อย และหากอาการยังรุนแรงต่อไปจะกลายเป็นปอดบวม กรณีที่ผู้ป่วยรับประทานสารปรอทเข้าไปปริมาณมากจะทำให้เกิดอาการปวดท้องและอาเจียน ถ้ามีสารปรอทเข้าถึงลำไส้จะทำให้ปวดตามลำตัว และถ่ายเป็นเลือด อาการพิษแบบเฉียบพลันอาจทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตทันที

2.1.6 กระบวนการกำจัดปรอท

เนื่องจากปรอทมีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมสูง กระทรวงอุตสาหกรรม และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมกำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของปรอท มีค่าไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร นักวิจัยมีการเริ่มหาวิธีในการกำจัดปรอท โดยหลายงานวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันพบว่ากระบวนการกำจัดปรอท ได้แก่ กระบวนการสร้างและรวมตะกอน การตกตะกอน การดูดซับ และการแลกเปลี่ยนไอออน จากตารางที่ 2-2 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของวิธีการกำจัดปรอทในงานวิจัยที่ผ่านมา

ตารางที่ 2-2 ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการกำจัดปรอท

วิธีการกำจัดปรอท	ข้อดี	ข้อจำกัด	อ้างอิง
กระบวนการสร้างและรวมตะกอน	<ul style="list-style-type: none"> ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทสูง การปฏิบัติการที่ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> ใช้สารตั้งต้นจำนวนมาก ก่อให้เกิดกากตะกอน ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติการสูง 	[28]
การตกตะกอน	<ul style="list-style-type: none"> ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ การปฏิบัติการที่ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> ก่อให้เกิดกากตะกอนจำนวนมาก มีค่าการเลือกจำเพาะของสารต่ำ (Selectivity) 	[29]
การดูดซับ	<ul style="list-style-type: none"> ประสิทธิภาพสูง การปฏิบัติการที่ง่าย ตัวดูดซับสามารถกลับมาใช้ได้ใหม่ 	<ul style="list-style-type: none"> มีความอ่อนไหวต่อสารปนเปื้อน 	[30]
การแลกเปลี่ยนไอออน	<ul style="list-style-type: none"> ใช้เวลาในการปฏิบัติการน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> ต้นทุนสูง 	[31]

วิธีการกำจัดปรอท	ข้อดี	ข้อจำกัด	อ้างอิง
การสกัดด้วยตัวทำละลาย	<ul style="list-style-type: none"> สามารถแยกเรซินออกได้ง่ายด้วยการกรอง สามารถสกัดสารมลพิษอินทรีย์ทั้งหมด การปฏิบัติการที่ง่าย สามารถนำสารกลับมาใช้ใหม่ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> ต้องการการนำกลับมาใช้ใหม่ (regeneration) หรือการกำจัด ใช้สารตั้งต้นจำนวนมาก 	[32]

กระบวนการกำจัดปรอทดังกล่าวพบว่ามีข้อจำกัดหลายด้าน อีกทั้งยังไม่สามารถกำจัดปรอทให้มีความเข้มข้นต่ำกว่าที่มาตรฐานน้ำทิ้งกำหนด แต่จากงานวิจัยการศึกษาการกำจัดปรอทออกจากน้ำทิ้งด้วยกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายพบว่าสามารถให้ประสิทธิภาพการสกัดไอออนโลหะหนักที่สูง และสามารถปฏิบัติการได้ง่าย

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการสกัด (Extraction process) และกระบวนการนำกลับ (Stripping process) กระบวนการทั้งสองนี้ ประกอบด้วยวัฏภาคของสารละลาย 3 วัฏภาค ได้แก่

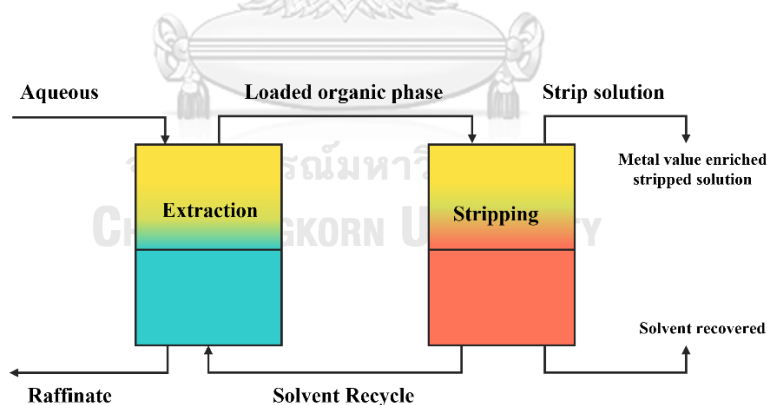
วัฏภาคที่ 1 วัฏภาคสารละลายป้อน (Feed phase หรือ leach liquor) มีองค์ประกอบของสารที่สนใจแยกอยู่ในวัฏภาคนี้ เช่น ไอออนโลหะ

วัฏภาคที่ 2 วัฏภาคสารละลายอินทรีย์ (Organic phase) ซึ่งโดยปกติจะประกอบด้วยสารสกัดที่ใช้สกัดสารที่สนใจแยกและตัวทำละลาย

วัฏภาคที่ 3 วัฏภาคสารละลายนำกลับ (Stripping phase) ประกอบด้วยสารที่ใช้นำกลับซึ่งทำหน้าที่รองรับองค์ประกอบที่ต้องการแยกออกจากวัฏภาคสารละลายอินทรีย์

กลไกการสกัดอาศัยกลไกการถ่ายเทมวล (Mass transfer) โดย ขั้นตอนแรก คือ กระบวนการสกัด เมื่อวัฏภาคสารละลายป้อนที่ประกอบด้วยสารที่ต้องการแยกปนอยู่เจอกับวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ที่ประกอบด้วยสารสกัดและตัวทำละลาย จะเกิดปฏิกิริยาการสกัดขึ้นระหว่างสารที่ต้องการแยกและสารสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complexing agent) ซึ่งอยู่ในวัฏภาคอินทรีย์ และความเข้มข้นของสารที่ต้องการแยกในวัฏภาคสารละลายป้อนจะมีความเข้มข้นลดลง (Raffinate) ขั้นตอนต่อมา คือ กระบวนการนำกลับ เมื่อสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งอยู่ในวัฏภาคอินทรีย์

(Loaded organic phase) เจอกับสารนำกลับจะเกิดการถ่ายเทมวลและปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ส่งผลให้สารที่ต้องการแยกเข้าไปอยู่ในวัฏภาคสารนำกลับ (Stripping solution) และภายหลังจากนั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้โดยนำสารที่ต้องการแยกกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง ส่วนของสารสกัดและตัวทำละลายสามารถนำกลับมาใช้แยกสารที่สนใจได้อีกครั้ง (Solvent recycle) นอกจากนี้พื้นที่ผิวสัมผัสก็เป็นตัวแปรที่สำคัญ อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่อาศัยการเปลี่ยนแปลงภาวะทางเคมี (Chemical condition) นอกจากนี้การปรับปรุงกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยเน้นที่การผลิตสารสกัดชนิดใหม่ ๆ ทำให้กระบวนการนี้ได้รับความสนใจมากขึ้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพของการสกัดถูกจำกัดโดยค่าสัดส่วนระหว่างสารละลายป้อนกับตัวทำละลาย (Feed to solvent ratio) และค่าสัดส่วนการกระจายไอออนโลหะระหว่างวัฏภาคต่าง ๆ (Distribution ratio) รวมถึงพื้นที่ผิวสัมผัสขณะเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ และปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคสารละลายอินทรีย์กับวัฏภาคสารละลายนำกลับ นอกจากนี้กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายแบบพื้นฐานยังประกอบด้วยขั้นตอนหลายขั้นทำให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ อีกทั้งต้องใช้ทั้งสารสกัดและตัวทำละลายในปริมาณมาก ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลวมีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งนำเสนอในหัวข้อถัดไป

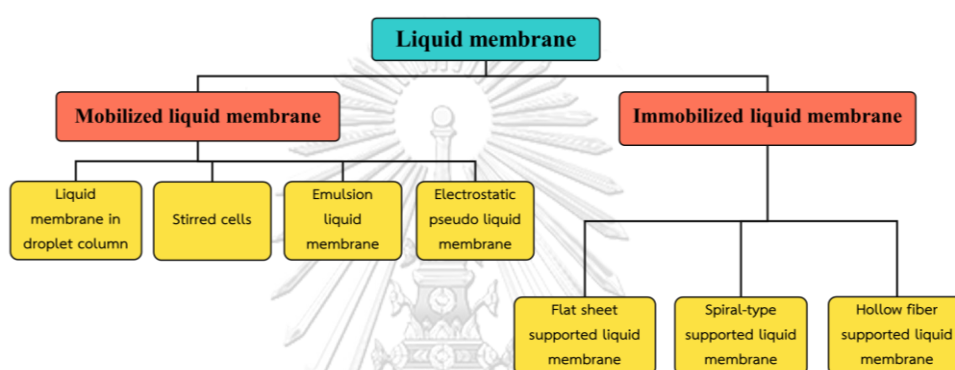


ภาพที่ 2-4 กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

2.2 เทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลว

กระบวนการเยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane process) ประกอบด้วยเยื่อแผ่นเหลวซึ่งเป็นวัฏภาคอินทรีย์มีตำแหน่งอยู่ระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารนำกลับ ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาการสกัดและถ่ายโอนมวลของสารที่ต้องการแยกจากวัฏภาคสารละลายป้อน

ไปสู่วิทยาศาสตร์นำกลับได้ภายในครั้งเดียว นั่นคือสามารถเกิดกระบวนการสกัดและกระบวนการนำกลับได้ในขั้นตอนเดียว สามารถแบ่งประเภทของของเยื่อแผ่นเหลวได้ 2 ประเภท ได้แก่ เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ (Unsupported liquid membrane หรือ mobilized liquid membrane) และเยื่อแผ่นเหลวที่พองบนตัวรองรับ (Supported liquid membrane หรือ immobilized liquid membrane) ดังแสดงในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 การแบ่งประเภทของเทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลว

2.2.1 เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ

เยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ เป็นเยื่อแผ่นเหลวที่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในทุกทิศทาง โดยการเกิดกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวประเภทนี้ ต้องมีการสร้างเยื่อแผ่นเหลวขึ้น อาจมีรูปแบบแตกต่างกัน เช่น รูปแบบชั้นบาง (Lamella) รูปแบบโฟม (Foam) หรือรูปแบบฟิล์ม เป็นต้น ข้อจำกัดของเยื่อแผ่นเหลวที่ไม่พองด้วยตัวรองรับ คืออัตราการถ่ายเทมวลค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสกันน้อย เช่น เยื่อแผ่นเหลวในหอสกัด (Liquid membrane in droplet column) เยื่อแผ่นเหลวแบบปั่นกววน (Stirred cells) ยกเว้น เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion liquid membrane) ที่มีพื้นที่สัมผัสระหว่างวัฏภาคสูง แต่มีข้อจำกัดเรื่องความเสถียรของระบบอิมัลชัน ทำให้ต้องใส่สารลดแรงตึงผิวซึ่งจะมีผลสำคัญต่อสารที่ต้องการแยก และอีกกระบวนการหนึ่งคือ เยื่อแผ่นเหลวเทียมโดยอาศัยสนามไฟฟ้าสถิต (Electrostatic pseudo liquid membrane)

2.2.2 เยื่อแผ่นเหลวที่พองบนตัวรองรับ

เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ เป็นเยื่อแผ่นเหลวที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ วัสดุที่ใช้เป็นเยื่อแผ่นเหลวคือพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนด้านใน แบ่งออกได้ 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) และชนิดไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยวัสดุภาคสารละลายหรือน้ำสามารถเข้าไปภายในรูพรุนและยึดติดอยู่ภายในรูพรุนชนิดชอบน้ำได้ ในทางตรงข้ามวัสดุภาคอินทรีย์หรือน้ำมันสามารถเข้าไปภายในรูพรุนและยึดติดอยู่ภายในรูพรุนชนิดไม่ชอบน้ำได้ด้วยแรงแคปิลลารี (Capillary force) รูปร่างของตัวรองรับที่มีรูพรุนแตกต่างกันหลายแบบ เช่น เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat sheet supported liquid membrane) เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยแผ่นม้วน (Spiral-type supported liquid membrane) และเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง (Hollow fiber supported liquid membrane)

เมื่อเปรียบเทียบเยื่อแผ่นเหลวทั้ง 2 ประเภทพบว่า เยื่อแผ่นเหลวที่พองบนตัวรองรับเป็นกระบวนการจัดเตรียมที่ไม่ยุ่งยาก สารสกัดที่ใช้มีปริมาณน้อยกว่า เนื่องจากสารสกัดจะถูกยึดติดในรูพรุน แต่อาจมีข้อจำกัด คือ การเสื่อมสภาพของเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับ โดยการเคลื่อนที่ของสารที่ต้องการแยกในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจากวัสดุภาคสารละลายป้อนไปสู่วัสดุภาคสารนำกลับ แสดงดังภาพที่ 2-6 แบ่งได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้

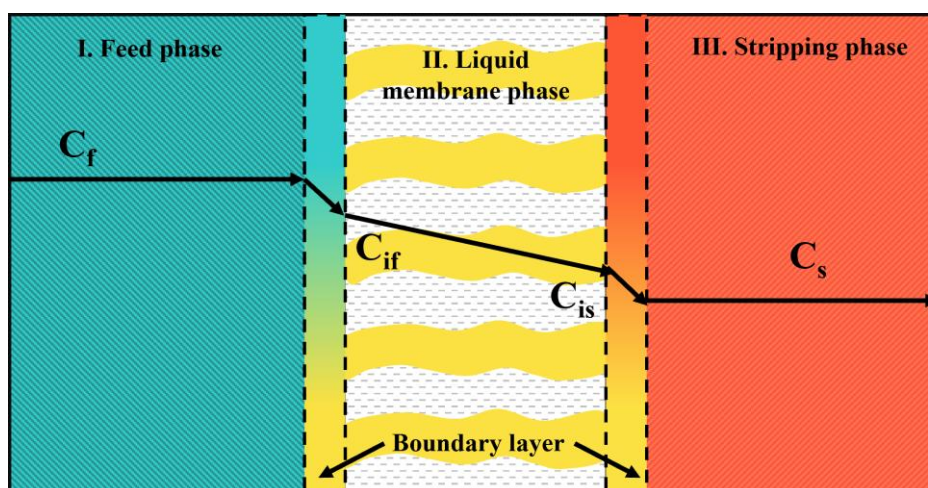
ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ของความเข้มข้นสารที่สนใจแยกผ่านชั้นฟิล์ม (Film layer or boundary layer) ที่อยู่ในวัสดุภาคสารละลายป้อน (Feed phase) ไปยังที่ผิวของเยื่อแผ่นเหลวในวัสดุภาคของเยื่อแผ่นเหลวหรือวัสดุภาคอินทรีย์ (Liquid membrane phase)

ขั้นตอนที่ 2 การเกิดปฏิกิริยาของสารที่สนใจแยกและสารสกัด ที่บริเวณผิวสัมผัสของวัสดุภาคสารละลายป้อนกับวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลว (Feed-membrane interphase) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

ขั้นตอนที่ 3 การแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากผิวสัมผัสของวัสดุภาคสารละลายป้อนกับวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวผ่านไปยังผิวสัมผัสของวัสดุภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัสดุภาคสารนำกลับ (Membrane-strip interphase)

ขั้นตอนที่ 4 การเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อนและสารนำกลับ ที่บริเวณผิวสัมผัสของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารนำกลับเกิด

ขั้นตอนที่ 5 การแพร่ของสารที่สนใจแยกไปยังวัฏภาคสารนำกลับ (Stripping phase) และสารสกัดจะวนกลับไปรับสารที่สนใจแยกอีกครั้ง



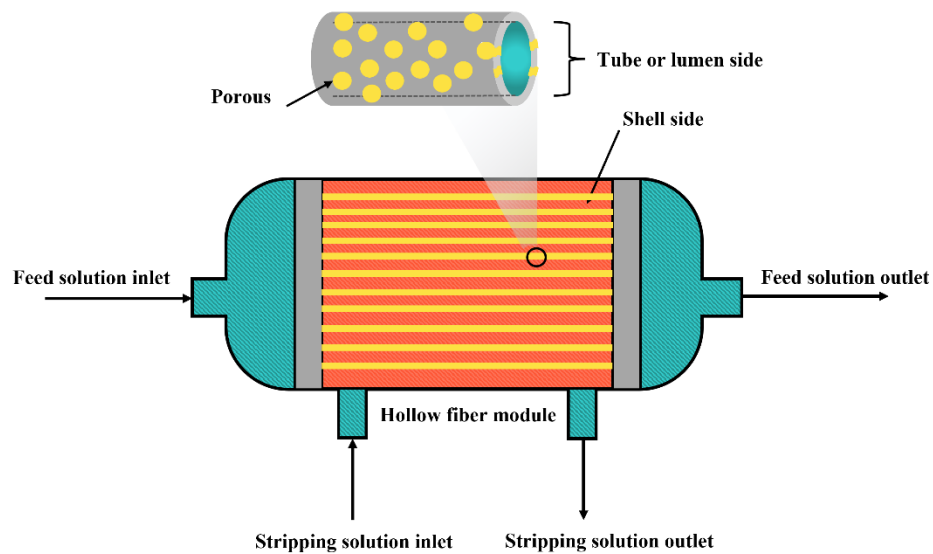
ภาพที่ 2-6 การเคลื่อนที่ของสารที่ต้องการแยกในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวจากวัฏภาคสารละลายป้อนไปสู่วัฏภาคสารนำกลับ

2.3 เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

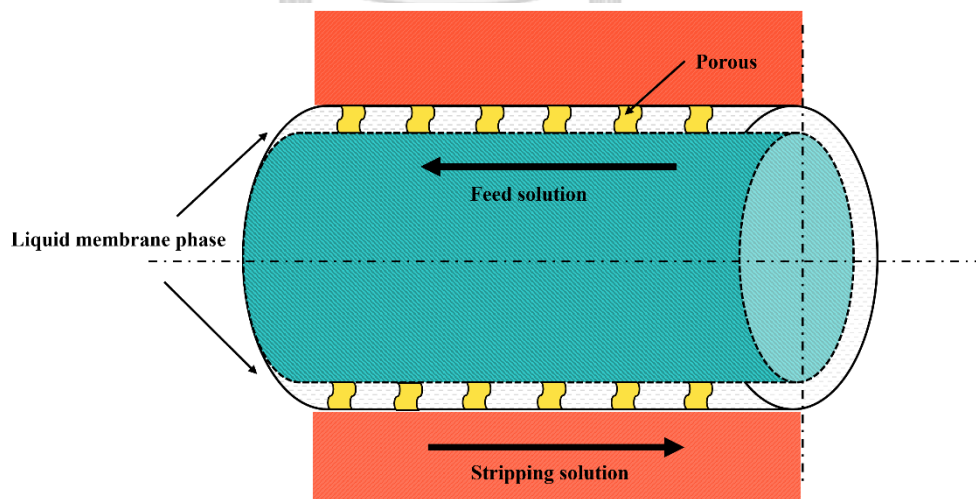
เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ประกอบด้วยเส้นใยกลวงที่มีขนาดเล็กจำนวนมากมัดรวมกันซึ่งวางในแนวขนาน บรรจุอยู่ในมอดูลทรงกระบอกโดยปลายของเส้นใยกลวงถูกยึดด้วยเรซิน แสดงดังภาพที่ 2-7 เมื่อขยายเส้นใยกลวงจะพบว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีรูปร่างทรงกระบอกประกอบด้วยรูพรุนกระจายอยู่ทั่ว ซึ่งมีทั้งชนิดที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ส่วนใหญ่จะเป็นชนิดไม่ชอบน้ำ ดังนั้น วัฏภาคอินทรีย์หรือน้ำมันจะสามารถเคลือบฝังไปในรูพรุนได้ มอดูลเส้นใยกลวงประกอบด้วยทางเข้าและทางออก ของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ สามารถไหลได้ทั้งส่วนภายในท่อ (Tube หรือ lumen side) และส่วนเปลือก (Shell side) ดังแสดงในภาพที่ 2-8

ขั้นตอนการปฏิบัติการด้วยเยื่อเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เริ่มจากเคลือบฝังวัฏภาคอินทรีย์เข้าไปในรูพรุนที่ไม่ชอบน้ำซึ่งอยู่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารนำกลับ เมื่อสารสกัดถูกเคลือบฝังสมบูรณ์ สารละลายป้อนจะถูกป้อนเข้าไปในฝั่งท่อของเส้นใยกลวง

และสารนำกลับจะถูกป้อนเข้าไปในฝั่งเปลือกของมอดูลเส้นใยกลวง ทิศทางการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ ไหลทางเดียวกัน (Co-current) และไหลสวนทางกัน (Counter current) ภายหลังจากนั้นจะเกิดกลไกการสกัดเกิดขึ้น ซึ่งสามารถแยกและนำกลับสารที่สนใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2-7 มอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง



ภาพที่ 2-8 ลักษณะการไหลแบบสวนทางกันของสารละลายป้อนและสารนำกลับของเส้นใยกลวงหนึ่งเส้นภายในเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ข้อดีของการปฏิบัติการด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ได้แก่ ประสิทธิภาพในการแยกที่สูงเนื่องจากมีพื้นที่การถ่ายเทมวลต่อปริมาตรสูง ใช้พลังงานที่ต่ำและใช้การลงทุนที่ต่ำ การปฏิบัติการไม่ซับซ้อน ใช้ปริมาณสารสกัดน้อยแต่ให้ประสิทธิภาพการแยกที่สูง เป็นต้น ถึงแม้ข้อจำกัดเกี่ยวกับเสถียรภาพของระบบเนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวที่เสื่อมสภาพแต่สามารถแก้ไขได้ด้วยการเติมสารอินทรีย์ที่มีสารสกัดละลายอยู่ไปเคลือบฝังรูพรุนใหม่ เทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงจึงเป็นหนึ่งในวิธีที่นิยมสำหรับนักวิจัยอย่างมาก [5, 6, 10, 33-37] ผู้ทำวิจัยจึงสนใจเลือกใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมาใช้ในกระบวนการสกัดต่อไป

2.3.1 การคำนวณประสิทธิภาพการสกัดและนำกลับ

การวิเคราะห์ผลของการสกัด และการนำกลับนำเสนอในรูปแบบของร้อยละการสกัด และการนำกลับ ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

2.3.1.1 ประสิทธิภาพการสกัด

$$\text{ร้อยละการสกัด (\% Extraction)} = \frac{C_{Hg,t} - C_{Hg,i}}{C_{Hg,i}} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยที่ $C_{Hg,i}$ คือ ความเข้มข้นของปรอทเริ่มต้นในวัฏภาคสารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 $C_{Hg,t}$ คือ ความเข้มข้นของปรอทหลังสกัดในวัฏภาคสารละลายป้อน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.3.1.2 ประสิทธิภาพการนำกลับ

$$\text{ร้อยละการนำกลับ (\% Stripping)} = \frac{C_{Hg,s}}{C_{Hg,i}} \times 100 \quad (2.2)$$

โดยที่ $C_{Hg,s}$ คือ ความเข้มข้นของสารปรอทในสารนำกลับหลังนำกลับปรอท (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

จากที่กล่าวมาข้างต้นเทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเป็นที่นิยมในการแยกไอออนโลหะออกจากสารละลาย ตารางที่ 2-3 แสดงงานวิจัยก่อนหน้าที่ศึกษาการแยกไอออนโลหะด้วยเทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ตารางที่ 2-3 การแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ผู้วิจัย	ไอออนโลหะ	สารสกัด	สารนำกลับ	%การสกัด	%การนำกลับ
Pancharoen และคณะ [10]	ปรอท (II)	TOA	0.5 M NaOH	99.80	62.00
Chaturabul และคณะ [5]	ปรอท (II)	Aliquat336	NH_2CSNH_2	97.00	93.00
Sunsandee และคณะ [36]	แพลเลเดียม (II)	Aliquat 336	0.5 M NH_2CSNH_2 + 0.1 M HCl	99.95	88.12
Mohdee และคณะ [37]	นีโอดีเมียม (III)	D2EHPA	0.1 M HNO_3	99.80	78.580
Wongkaew และคณะ [23]	แพลตินัม (IV)	Aliquat 336	0.8 M NH_2CSNH_2 + 1 M HCl	91.41	81.00
Guell และคณะ [38]	โครเมียม (VI)	Aliquat 336	0.5 M HNO_3	92.40	92.40
Suren และคณะ [39]	สารหนู (III)	Aliquat 336	0.5 M NH_2CSNH_2 + 0.5 M HCl	100.00	98.00
Niam และคณะ [40]	นีโอดีเมียม (III)	D2EHPA	2 M HNO_3	58.62	63.13
	ดีสโพรเซียม (III)			98.46	15.21
	เพอร์ซีโอดีเมียม (III)			85.59	56.29
Srirachat และคณะ [41]	นิกเกิล (II)	D2EHPA + TBP	0.5 M HCl	85.70	83.2

2.4 ชนิดของสารสกัด

ชนิดของสารสกัดประกอบด้วย 3 ชนิด ได้แก่ สารสกัดชนิดกรด (Acidic extractant) สารสกัดชนิดเบส (Basic extractant) และสารสกัดชนิดซอลเวต (Solvating extractant) [2, 6] ดังนี้

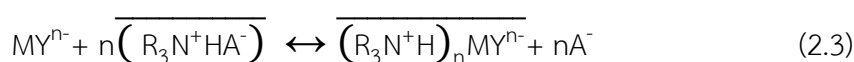
2.4.1 สารสกัดชนิดกรด

สารสกัดชนิดกรดเป็นสารสกัดอินทรีย์ประกอบด้วย สารสกัดประเภทกรด และสารสกัดประเภทคีเลต (Chelate extractant) โดยสารสกัดประเภทกรดประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-\text{COOH}$, $=\text{P}(\text{O})\text{OH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ ส่วนสารสกัดประเภทคีเลตจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวก ซึ่งเมื่อสารสกัดชนิดกรดและคีเลต (RH) เข้าทำปฏิกิริยากับสารที่สนใจ (M^{n+}) จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ($\overline{\text{MR}}_n$) ซึ่งสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารอินทรีย์ ได้สมการการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



2.4.2 สารสกัดชนิดเบส

สารสกัดชนิดเบสเป็นสารสกัดอินทรีย์ที่สามารถทำปฏิกิริยาเป็นเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด (HA) นิยมใช้เอมีน และแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary ammonium halides) โดยในกลุ่มของแอมโมเนียมเฮไลด์สามารถแบ่งเป็น 4 ชนิด ได้แก่ ปฐมภูมิ (RNH_2) ทติภูมิ (R_2NH) ตติภูมิ (R_3N) และจตุภูมิ (R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Anionic species, MY^{n-}) แต่เพื่อให้การแลกเปลี่ยนสามารถเกิดขึ้นได้ เอมีนต้องเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสม ($\text{R}_3\text{N}^+\text{HA}^-$) เพื่อแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนโลหะ (MY^{n-}) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($\overline{(\text{R}_3\text{N}^+\text{H})}_n\text{MY}^{n-}$) แสดงดังสมการ (2.2) และสามารถเกิดปฏิกิริยาการสกัดได้ดังสมการ (2.3) ตามลำดับ ดังนี้

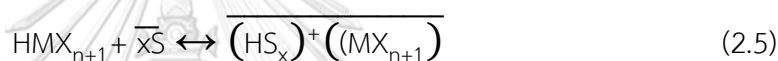


2.4.3 สารสกัดชนิดขอลเวต

สารสกัดชนิดกลาง (S) เป็นสารสกัดอินทรีย์ที่ไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล จึงไม่สามารถถ่ายโปรตอนได้ ไอออนโลหะในสารละลายป้อนจะถูกสกัด และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง (MX_n) ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ($\overline{MX_nS_y}$) ในวัฏภาคสารละลายของน้ำ เช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดเบส ได้สมการการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



หรือ



2.5 สารนำกลับ

การนำกลับไอออนโลหะออกจากวัฏภาคสารอินทรีย์ด้วยสารนำกลับ เป็นหนึ่งในการนำไอออนโลหะกลับมาใช้ได้ใหม่ (Metal recovery) อีกทั้งยังสามารถนำสารสกัดกลับมาใช้ได้ใหม่เช่นกัน (Extractant regeneration) ซึ่งมีความสำคัญในระบบนี้อย่างมาก การศึกษาชนิดของสารนำกลับที่เหมาะสม รวมไปถึงความเข้มข้นที่แตกต่างกันมีผลต่อกระบวนการสกัดและนำกลับของไอออนโลหะ การเลือกสารนำกลับที่เหมาะสมพิจารณาจากสารสกัดที่ใช้ จากงานวิจัยก่อนหน้ามีการศึกษาสารนำกลับหลายชนิด ได้แก่ สารที่เป็น กรด (เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก) เบส (เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์) และกลาง (เช่น น้ำกลั่น โซเดียมคลอไรด์) ยกตัวอย่าง กลไกการนำกลับไอออนโลหะที่มีประจุบวกทำปฏิกิริยากับสารสกัดที่เป็นชนิดกรด เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะที่สูญเสียไฮโดรเจนไอออนไป และเมื่อสารประกอบเชิงซ้อนทำปฏิกิริยากับสารนำกลับที่เป็นกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก ($H^+ Cl^-$) ไฮโดรเจนไอออนจากสารนำกลับจะแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนโลหะ ทำให้ได้ไอออนโลหะที่แยกออกจากวัฏภาคสารอินทรีย์ และได้สารสกัดเดิมกลับมาใช้ได้ใหม่ [42] หรือกลไกการนำกลับไอออนโลหะที่มีประจุลบทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดเบส เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะโดยการแลกเปลี่ยนประจุลบ ดังนั้นการใช้สารนำกลับชนิดที่เป็น

เบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}^+ \text{OH}^-$) ไฮดรอกไซด์ไอออนจากสารนำกลับสามารถแลกเปลี่ยนประจุลบกับสารประกอบเชิงซ้อนได้ [10]

2.6 น้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบที่ เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) เกิดจาก กลีเซอรอล (Glycerol) 1 โมเลกุล ทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน (Fatty acids) 3 โมเลกุล กรดไขมันที่พบในน้ำมันพืช ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนจำนวน 12 ถึง 22 อะตอม ส่วนมากมีจำนวน 16 ถึง 18 อะตอม ประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนพันธะเดี่ยวหรือพันธะคู่

2.6.1 กรดไขมัน

โครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก คือ กรดไขมัน ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group, $-\text{COOH}$) 1 หมู่ ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม ออกซิเจน 2 อะตอม และไฮโดรเจน 1 อะตอม ทำให้มีคุณสมบัติเป็นกรด และส่วนที่สอง คือ ห่วงโซ่คาร์บอน เป็นการยึดเหนี่ยวกันของคาร์บอนอะตอมที่อยู่ติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ กรดไขมันสามารถแบ่งตามพันธะในห่วงโซ่คาร์บอนออกเป็น 2 ชนิด ตัวอย่างโครงสร้างของกรดไขมันแสดงดังภาพที่ 2-9

2.6.1.1 กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) กรดไขมันอิ่มตัว เป็นกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในห่วงโซ่คาร์บอน

2.6.1.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) กรดไขมันไม่อิ่มตัว เป็นกรดไขมันที่ประกอบด้วยพันธะคู่อย่างน้อย 1 พันธะในห่วงโซ่คาร์บอน สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท

1) กรดไขมันไม่อิ่มตัวตำแหน่งเดียว (Monounsaturated fatty acid)

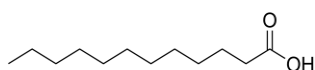
กรดไขมันไม่อิ่มตัวตำแหน่งเดียว เป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่เพียงตำแหน่งเดียวในห่วงโซ่คาร์บอน เช่น กรดโอเลอิก (Oleic acid) ซึ่งมีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม และมีพันธะคู่ 1 พันธะ (C18:1)

2) กรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง (Polyunsaturated fatty acid)

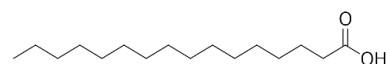
กรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง เป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่ตั้งแต่ 2 ตำแหน่งขึ้นไปในห่วงโซ่คาร์บอน เช่น กรดแอลฟาไลโนเลนิก (α -Linolenic acid) ซึ่งมีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม

และมีพันธะคู่ 3 พันธะ (C18:3) กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) ซึ่งมีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม และมีพันธะคู่ 2 พันธะ (C18:2)

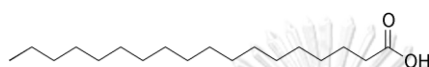
กรดไขมันอิ่มตัว



กรดลอริก (C12:0)



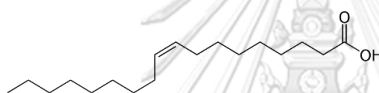
กรดปาล์มมิติก (C16:0)



กรดสเตียริก (C18:0)

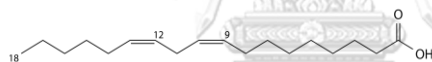
กรดไขมันไม่อิ่มตัว

กรดไขมันไม่อิ่มตัวตำแหน่งเดียว

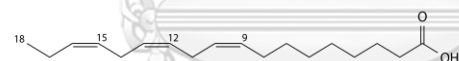


กรดโอเลอิก (C18:1)

กรดไขมันไม่อิ่มตัวหลายตำแหน่ง



กรดไลโนเลอิก (C18:2)



กรดไลโนเลนิก (C18:3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาพที่ 2-9 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมัน

2.6.2 คุณสมบัติของน้ำมันพืช

คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของกรดไขมัน โดยปกติความหนืดของน้ำมันพืชจะมีค่าสูงกว่าน้ำ (>1 เซนติพอยส์) และความหนาแน่นมีค่าต่ำกว่าน้ำ (< 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังนั้น เมื่อผสมกันกับน้ำจึงสามารถแยกกันได้ง่ายด้วยความหนาแน่นที่ต่างกัน จุดวาบไฟสูงส่งผลให้ปลอดภัยในการเก็บและนำไปใช้ คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างน้ำมันพืชเป็นไปตาม ตารางที่ 2-4 และปริมาณกรดไขมันที่แตกต่างกันของตัวอย่างน้ำมันพืช แสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-4 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชแตกต่างชนิดกัน [43-45]

ชนิดของ น้ำมันพืช	คุณสมบัติทางกายภาพ		
	ความหนาแน่น ที่ 22 °C (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนืด ที่ 22 °C (เซนติพอยส์)	แรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและน้ำ (มิลลินิวตันต่อเมตร)
น้ำมันลินสีด	0.935	41.4	49.0
น้ำมันดอกคาโนลา	0.913	63.5	28.5
น้ำมันข้าวโพด	0.915	59.5	33.0

ตารางที่ 2-5 ปริมาณกรดไขมันและน้ำมันพืชแต่ละชนิด [46-49]

ชนิดของ น้ำมันพืช	ปริมาณกรดไขมัน (%)				
	กรดปาล์มมิติก (C16:0)	กรดสเตียริก (C18:0)	กรดโอเลอิก (C18:1)	กรดไลโนเล อิก (C18:2)	กรดไลโนเลนิก (C18:3)
น้ำมันลินสีด	4.9-8.0	2.2-4.5	13.4-19.4	12.3-17.4	39.9-60.4
น้ำมันดอกคาโนลา	3.9-4.1	1.1-1.9	56.1-64.4	20.4-21.0	7.9-9.6
น้ำมันข้าวโพด	6.7-16.5	0.7-6.6	16.2-43.8	39.5-69.5	0.0-3.1

2.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการใช้น้ำมันพืชสกัดโลหะหนัก

การสกัดโลหะหนักในหลายปีที่ผ่านมา พบว่ามีแนวโน้มการใช้น้ำมันพืชซึ่งเป็นสารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นตัวทำละลายที่อยู่ในวัฏภาคของสารอินทรีย์ ตารางที่ 2-6 แสดงถึงการศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยตัวทำละลายน้ำมันพืช ยกตัวอย่างเช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันรำข้าว มีการนำน้ำมันดังกล่าวมาช่วยในการสกัดแทนการใช้สารที่เป็นพิษ และระเหยได้ง่าย เช่น น้ำมันก๊าด และโทลูอีน เป็นต้น ดังนั้นน้ำมันพืชจึงเป็นสารที่น่าสนใจในการศึกษาการสกัดโลหะหนัก เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สารที่ส่งผลเสียต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งน้ำมันพืชไม่ระเหยง่าย มีความเป็นพิษต่ำ มีจุดวาบไฟที่สูงส่งผลให้ติดไฟยาก

ตารางที่ 2-6 การแยกโลหะหนักด้วยตัวทำละลายที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ผู้วิจัย	ไอออนโลหะ	สารสกัด	ตัวทำละลาย	กระบวนการสกัด	ประสิทธิภาพการสกัด (%)
Chakrabarty และคณะ [50]	ปรอท (II)	TOA	น้ำมันมะพร้าว	FSSLM	95
Bjorkegren และคณะ [51]	โครเมียม (VI)	TOMAC	น้ำมันปาล์ม	ELM	97
Wongkaewa และคณะ [23]	แพลตินัม (IV)	Aliquat 336	น้ำมันมะพร้าว	HFSLM	60
			น้ำมันถั่วเหลือง		80
			น้ำมันทานตะวัน		90
Kumara และคณะ [52]	โครเมียม (VI)	TDDA	น้ำมันรำข้าว	ELM	97
Zereshki และคณะ [53]	ทองแดง (II)	D2EHPA	น้ำมันทานตะวัน	ELM	94
Noah และคณะ [54]	โครเมียม (VI)	TOMAC	น้ำมันปาล์ม	ELM	100
Bhatluri และคณะ [55]	แคดเมียม (II)	Aliquat 336	น้ำมันมะพร้าว	BLM	92

โดยกระบวนการ FSSLM คือ เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (Flat sheet supported liquid membrane), ELM คือ เยื่อแผ่นเหลวแบบอิมัลชัน (Emulsion liquid membrane), HFSLM คือ เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลาง และ BLM คือ แผ่นเยื่อเหลว (Bulk liquid membrane, BLM)

Chang และคณะ [56] นำเสนอการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย และในกระบวนการใช้เยื่อแผ่นเหลว (Liquid membrane) เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ยังมี

และเป็นการนำสารกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษากระบวนการการสกัดด้วยตัวทำละลายซึ่งเป็นกระบวนการที่ปฏิบัติการได้ง่าย ให้ประสิทธิภาพสูง ค่า selectivity สูง อีกทั้งยังมีความทนทานสูง และอีกกระบวนการหนึ่งซึ่งสามารถรวมการสกัดและการนำสารกลับมาใช้ได้ในขั้นตอนเดียวคือกระบวนการใช้เยื่อแผ่นเหลว ทำให้ใช้พลังงานในการปฏิบัติการที่น้อยกว่า ศึกษาการเปรียบเทียบตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้สกัดสารที่ต้องการเป็น 2 แบบ ได้แก่ ตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป (เช่น น้ำมันก๊าด เบนซีน คลอโรฟอร์ม) และตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (เช่น น้ำมันพืชที่มีปริมาณกรดไขมันสูง และน้ำมันพืชที่มีปริมาณไตรกลีเซอไรด์สูง) แสดงดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปและตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คุณสมบัติ	ตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป	ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
สูตรโมเลกุล	ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสายสั้น (C1-C12) เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล	ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสายยาว (C8-C24) เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล
น้ำหนักโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุลต่ำ	น้ำหนักโมเลกุลสูง
ความหนืด	ความหนืดต่ำ	ความหนืดสูงอาจส่งผลให้เพิ่มความต้านทานการถ่ายโอนมวลซึ่งอาจทำให้สารที่ต้องการถ่ายโอนจากวัฏภาคหนึ่งไปยังอีกวัฏภาคหนึ่งได้ยาก
ความดันไอ	ค่าความดันไอสูง	ค่าความดันไอต่ำ
จุดวาบไฟ	จุดวาบไฟต่ำ	จุดวาบไฟสูงทำให้มีการติดไฟยาก

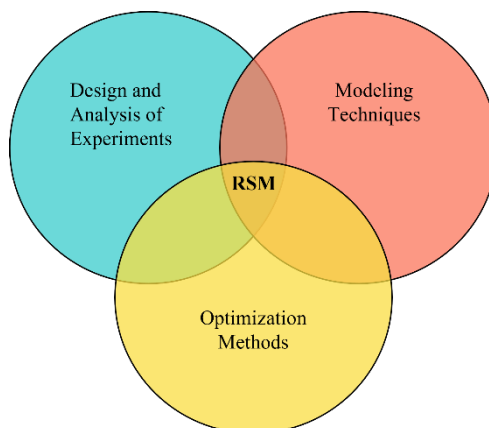
Noah และคณะ [54] ศึกษาการแยกโครเมียม (VI) ความเข้มข้น 42.62 มิลลิกรัมต่อลิตร จากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยวิธีการสกัดด้วยสารสกัด TOMAC ที่ละลายภายในตัวทำละลายน้ำมันพืช ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันข้าวโพด และตัวทำละลายที่มีความเป็นพิษ ได้แก่ น้ำมันก๊าด พบว่าสามารถสกัดโครเมียมออกได้ถึง 100% ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าการใช้ประโยชน์ของทั้งน้ำมันปาล์มและข้าวโพด เป็นทางเลือกสำหรับการสกัดไอออนโลหะในระบบการแยกด้วยเยื่อแผ่นเหลวอิมัลชัน ซึ่งน้ำมันปาล์ม และน้ำมันข้าวโพดมีความหนืดสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันก๊าด ข้อเสียของ

ความหนืดสูงคือเพิ่มความต้านทานการถ่ายเทมวล (Mass transfer resistance) แต่ในกระบวนการ LLE มีเวลาสมดุลที่ 18 ชั่วโมง เนื่องจากความเข้มข้นของโครเมียมไอออนต่ำและเวลาที่ใช้เพียงพอต่อการสกัด จึงสกัดโครเมียมไอออนทั้งหมดได้อย่างมีประสิทธิภาพ สรุปได้ว่าน้ำมันปาล์ม และน้ำมันข้าวโพดมีความหนืดสูงไม่เป็นปัญหาในแง่ของประสิทธิภาพการสกัดในระบบนี้

Bhatluri และคณะ [55] ศึกษาการแยกแคดเมียม (II) ออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีแผ่นเยื่อเหลว โดยใช้สารสกัด Aliquat 336 ละลายในตัวทำละลายที่เป็นน้ำมันพืช ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันเมล็ดทานตะวัน พบว่าน้ำมันมะพร้าวเป็นตัวทำละลายที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดสูงสุด 92.1% โดยใช้เวลา 6 ชั่วโมง อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งผู้วิจัยศึกษาถึงคุณสมบัติเฉพาะของน้ำมันมะพร้าว เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันอื่น น้ำมันมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวสูงที่สุด กรดไขมันเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่เป็นสารสกัดสามารถเข้าเกิดปฏิกิริยากับไอออนโลหะหนักได้

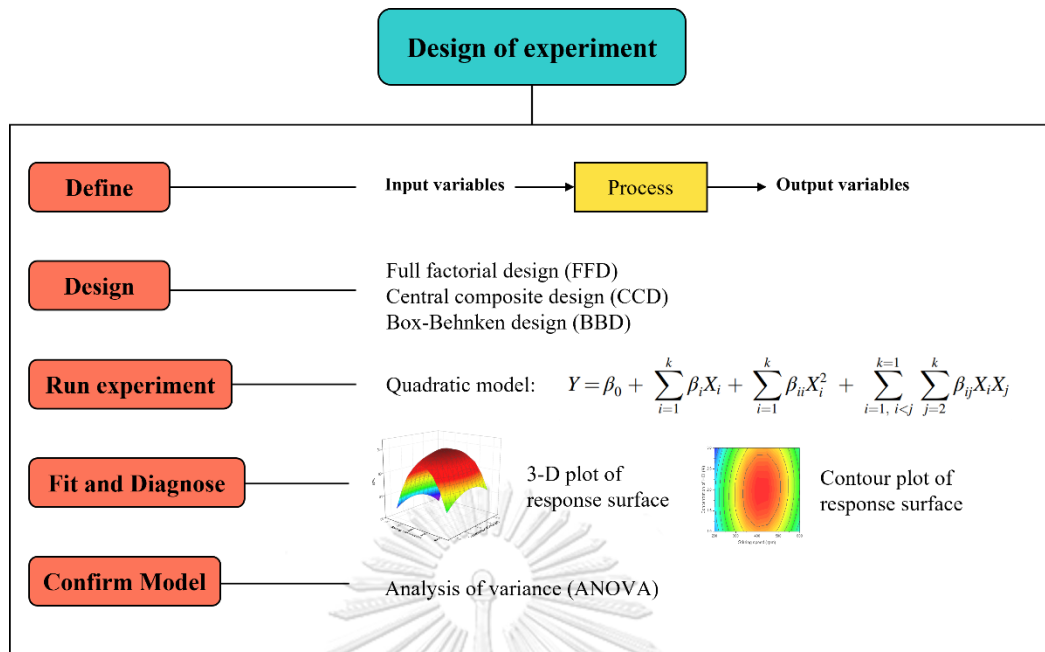
2.7 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) เป็นวิธีการที่รวบรวมการออกแบบการทดลองและสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ (Design and analysis of experiment) อีกทั้งยังใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ (Modeling techniques) และสถิติมาใช้ในการสร้างตัวแบบและวิเคราะห์ปัญหาในกรณีที่ผลตอบสนองมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหรือตัวแปรอิสระหลายตัว เพื่อหาระดับของปัจจัยที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization methods) ดังแสดงตามภาพที่ 2-10 ตัวอย่างของการออกแบบการทดลองประเภทนี้ คือ การออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 3 ระดับ (3-level full factorial design, FFD) การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design, CCD) และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design, BBD) ซึ่งเป็นหนึ่งในการออกแบบการทดลอง (Design of experiment) ข้อดีของการออกแบบประเภทนี้สามารถใช้หาและคาดการณ์ผลลัพธ์ตอบสนองของการศึกษาที่เหมาะสมที่สุดด้วยการรวมกันของปัจจัยนำเข้าต่าง ๆ หาขอบเขตของการรวมแต่ละปัจจัยนำเข้าที่เป็นไปได้เพื่อทำนายผลลัพธ์ตอบสนองที่ยอมรับได้ หรือเพื่อคาดการณ์ประสิทธิภาพของกระบวนการในพื้นที่ผิวตอบสนอง [57]



ภาพที่ 2-10 ภาพรวมวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

โดยขั้นตอนการออกแบบการทดลอง แสดงดังภาพที่ 2-11 เลือกปัจจัยนำเข้า (Input variables) ที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผ่านกระบวนการหนึ่ง (Process) เพื่อให้ได้ปัจจัยตอบสนองที่ต้องการ (Output variables) เลือกวิธีการออกแบบการทดลองซึ่งมีผลต่อจำนวนการทดลองที่ต่างกัน ความเหมาะสมในการเลือกใช้กระบวนการที่ต่างกัน เช่น FFD CCD และ BBD เมื่อทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้สามารถนำเสนอในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ (Quadratic model) เพื่อใช้อธิบายปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อปัจจัยตอบสนอง สามารถนำเสนอในรูปแบบของแผนภาพสามมิติ (3-D plot) และแผนภาพโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง (Contour plot) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) [58]



ภาพที่ 2-11 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

ปัจจุบันการออกแบบการทดลองมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติหลากหลายชนิดที่ช่วยทำให้ การศึกษานั้นง่ายขึ้น เช่น Statistical Analysis Software (SAS), Design-expert® และ Minitab® ฯลฯ ซึ่งโดยทั่วไประดับของปัจจัยนำเข้าจะอยู่ในช่วง 3 ถึง 5 ระดับส่งผลให้กราฟพื้นผิวตอบสนองอยู่ ในรูปแบบของสมการพหุนามกำลังสองหรือสมการควอดราติก และเนื่องจากในทางปฏิบัติมักจะ ไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปรผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้นจึงต้องมื การประมาณรูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวและพบว่านิยมใช้ตัวแบบกำลังสอง (Second order model) เพราะมีความยุ่งยาก และซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น ๆ สามารถแสดง แบบกำลังสองได้ ดังนี้ [59]

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (2.6)$$

โดยที่ y คือ ค่าของตัวแปรตอบสนองหรือ ผลที่มาจากการทดลอง
 x คือ ปัจจัยในการทดลอง
 ϵ คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง

กำหนดให้ $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta \quad (2.7)$

สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.8)$$

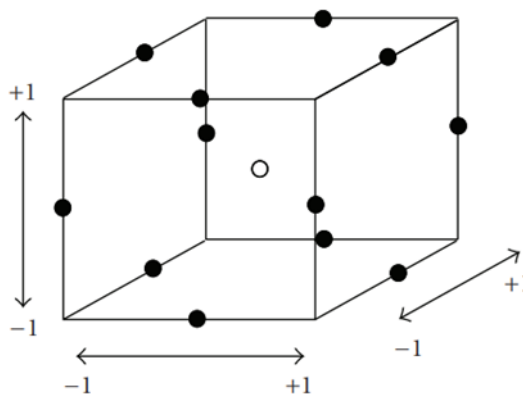
โดยสมการพหุนามกำลังสองแสดง ดังสมการที่ 2.6

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.9)$$

โดยที่	y	คือ	ตัวแปรผลตอบสนอง
	x	คือ	ปัจจัยที่ $i; i=1,2,\dots,k$
	k	คือ	จำนวนปัจจัยทั้งหมด
	β_0	คือ	จุดตัดแกน y
	$\sum_{i=1}^k \beta_i x_i$	คือ	เทอมของอิทธิพลเชิงเส้น
	$\sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2$	คือ	เทอมของอิทธิพลกำลังสอง
	$\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j$	คือ	เทอมของอิทธิพลร่วม

2.7.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD)

เป็นการออกแบบ 3 ระดับสำหรับพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้สร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย เนื่องจากการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ ดังภาพที่ 2-12 ซึ่งการกระทำเช่นนี้มีประโยชน์มากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมเอาปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ



ภาพที่ 2-12 แบบจำลองการออกแบบบ็อกซ์-เบิร์ตเคน

ผลจากการออกแบบประเภทนี้ทำให้จำนวนของการทดลองลดลงเมื่อเทียบกับการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 3 ระดับ และยังคงประสิทธิภาพไว้เหมือนเดิม ข้อดีของการออกแบบประเภทนี้คือ ใช้ระดับของปัจจัยนำเข้าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการออกแบบส่วนประสมกลางที่ใช้ระดับของปัจจัยนำเข้าถึง 5 ระดับ

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการสกัดและนำกลับไอออนโลหะ

งานวิจัยก่อนหน้าที่สนใจใช้วิธีการออกแบบการทดลองและอาศัยข้อมูลเชิงสถิติพบว่า มีหลายงานวิจัย ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกัดและนำกลับไอออนโลหะ แสดงดังตารางที่ 2-8 พบว่างานวิจัยดังกล่าวนิยมใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองโดยเลือกการออกแบบการทดลองที่หลากหลาย อีกทั้งวิธีการออกแบบการทดลองแบบ CCD และ BBD ยังช่วยลดจำนวนการทดลองลง แต่ยังคงได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำ สามารถนำมาใช้คาดการณ์สภาวะที่ดีที่สุดของตัวแปรที่สนใจศึกษาได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจเลือกการใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบ BBD เพื่อได้มาซึ่งการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ อิทธิพลรวมรวมถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการสกัดและนำกลับปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์

ตารางที่ 2-8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการสกัดและนำกลับไอออนโลหะ

ผู้วิจัย	ไอออนโลหะ	สารสกัด/ สารนำกลับ	กระบวนการ การสกัด	จำนวน ตัวแปร	การออกแบบ การทดลอง	R ²
Zereshki และคณะ [53]	ทองแดง (II)	D2EHPA/ HCl	ELM	4	BBD	0.9484
Sujatha และคณะ [60]	ตะกั่ว (II)	D2EHPA/ H ₂ SO ₄	ELM	6	BBD	0.9520
Koonsang และ คณะ [61]	แพลตตินัม (IV)	Aliquat 336/ NH ₂ C ₂ NH ₂ + HCl	HSLM	3	BBD	0.9751
Afolabi และคณะ [62]	ทองแดง (II) ตะกั่ว (II)	เปลือกส้ม	AD	3	CCD	0.9852 0.9433
Mahmoudiani และคณะ [63]	ซีลีเนียม (IV) เทลลูเรียม (IV)	Cyanex 301	SX	3	CCD	0.9913 0.9727
M. Kavisri และคณะ [64]	แคดเมียม (II)	ไคโตซาน	AD	4	CCD	-

2.8 ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น

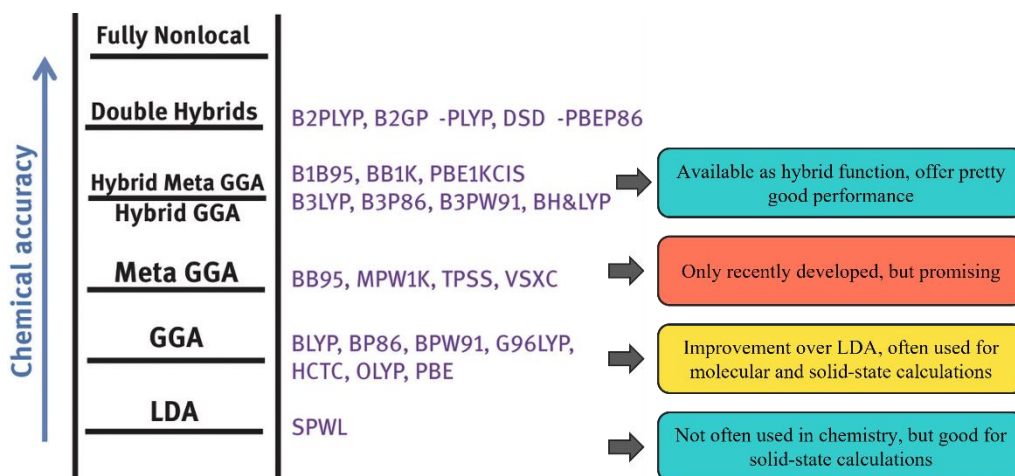
ในยุคนี ค.ศ. 1900 กลศาสตร์ควอนตัมถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในการศึกษาระบบเล็ก ๆ ในระดับอะตอม อย่างไรก็ตาม การใช้กลศาสตร์ควอนตัมกับระบบใหญ่ๆ เช่น ระบบที่มีกลุ่มอิเล็กตรอนในผลึกของแข็ง ยังมีความยุ่งยากในการศึกษา สมการที่ใช้มีความซับซ้อนมากขึ้น และการเข้าถึงคำตอบที่ถูกต้องนั้นยังต้องอาศัยการประมาณเข้ามาเกี่ยวข้อง ไม่สามารถแก้สมการได้โดยตรง ต่อมาในปี ค.ศ.1964 ทฤษฎีความหนาแน่น ได้ถูกนำเสนอขึ้น และมีความเหมาะสมในการอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในผลึกของแข็งได้อย่างดี วิวัฒนาการทางทฤษฎีเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการหาคำตอบของธรรมชาติเพื่อให้มีความรู้ความเข้าใจและนำมาใช้ประโยชน์นำมาซึ่งเทคโนโลยีใหม่ ๆ ในปัจจุบัน [65] ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น มีความเป็นมาโดยในปี ค.ศ.1964 Hohenberg และ

Kohn สามารถพิสูจน์ได้ว่าพลังงานของโมเลกุลที่สถานะพื้น ฟังก์ชันคลื่น และสมบัติอื่นๆ ของโมเลกุล สามารถคำนวณได้จากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สถานะพื้น (Ground state electron probability density) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ 3 ตัวแปร ที่คิดค้นโดย Beck และทฤษฎีของ Lee, Yang และ Parr เป็นดังนี้

$$E = V_{\text{NH}} + H_{\text{CORE}} + V_{\text{ee}} + E_{\text{x}}[\rho] + E_{\text{c}}[\rho] \quad (2.10)$$

โดยที่	V_{NH}	คือ	อันตรกิริยานิวเคลียร์ – นิวเคลียร์
	H_{CORE}	คือ	การคอนทริบิวทางไฟฟ้าเชิงเดี่ยว (Monoelectronic contribution) ต่อพลังงานทั้งหมด รวมทั้งพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและพลังงานที่เกิดจากอันตรกิริยาอิเล็กตรอน-นิวเคลียร์
	V_{ee}	คือ	อันตรกิริยาทางไฟฟ้าสถิตระหว่างอิเล็กตรอน
	$E_{\text{x}}[\rho]$	คือ	พลังงานแลกเปลี่ยน (Exchange energy)
	$E_{\text{c}}[\rho]$	คือ	พลังงานคอร์รีเลชัน (Correlation energy)
	ρ	คือ	ฟังก์ชันความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

ในปัจจุบันทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นได้พัฒนาเป็นระดับของทฤษฎีย่อยต่างๆ เช่น B3LYP B3PW91 MPW1PW91 BHandLYP BP86 BPW91 PW91PW91 และ SVWN5 ร่วมกับ LANL2DZ LANL2MB SDD CEP-4G CEP-31G และ CEP-121G เป็นต้น [66] การเลือกใช้ระดับของทฤษฎีขึ้นอยู่กับนำไปใช้กับข้อมูล โดย B3LYP (Becke, 3-parameter, Lee-Yang-Parr) เป็นฟังก์ชันแบบไฮบริด (hybrid functional) ซึ่งเป็นที่นิยมเนื่องจากให้ค่าความแม่นยำที่สูง ดังแสดงในภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 ระดับของทฤษฎีที่นิยมใช้ในการคำนวณทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น

2.8.1 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นเชิงสมบัติโครงสร้าง

โดยทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นมีประโยชน์ในการหาโครงสร้างที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารสกัดและไอออนที่ต้องการโดยโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีพลังงานต่ำที่สุด จากโครงสร้างที่เป็นไปได้ทั้งหมดของโมเลกุล เมื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสามารถดูค่าพลังงานระหว่างพันธะ ความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อน และสามารถใช้ทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น อีกทั้งผลการคำนวณจากทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นสามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลสเปกโตรสโคปีของการทดลองเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการเกิดปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับ [67, 68]

2.8.2 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นเชิงออร์บิทัลของโมเลกุล

ออร์บิทัลของโมเลกุล เป็นสมบัติหนึ่งที่ใช้อธิบายการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งตำแหน่งของออร์บิทัลของโมเลกุลที่มีพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (Highest Occupied Molecular Orbital, HOMO) และตำแหน่งของออร์บิทัลของโมเลกุลที่มีพลังงานต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO) สามารถใช้ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น เพื่อคำนวณหาโครงสร้างที่เหมาะสมและโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างสารสกัดกับไอออนโลหะต่างๆ สามารถนำโครงสร้างที่เหมาะสมมาคำนวณหาพลังงานการยึดจับระหว่างสารสกัดกับไอออน [68, 69]

2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษาทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นเป็นที่นิยมอย่างมาก ตารางที่ 2-9 เป็นตัวอย่างงานวิจัยที่มีการประยุกต์นำทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นเชิงสมบัติโครงสร้างและเชิงออร์บิทัลของโมเลกุลเพื่อใช้อธิบายการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

ตารางที่ 2-9 การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นในงานวิจัยก่อนหน้า

ผู้วิจัย	ไอออนโลหะ	สารสกัด	ระดับของทฤษฎี	วัตถุประสงค์
Mohdee และคณะ [37]	นีโอติเมียม (III)	D2EHPA	B3LYP/SDD	- ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาและโครงสร้างทางเคมีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับสารสกัด
Coterillo และคณะ [70]	ลิเทียม (I)	- สารสกัดเดี่ยว เช่น กลุ่ม β -diketones และกลุ่ม organophosphates - สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์	B3LYP/def2-SVP	- ศึกษาสารสกัดที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนโลหะ - ศึกษารูปทรงทางเรขาคณิตและระยะห่างระหว่างพันธะของลิเทียมกับสารสกัดชนิดต่างๆ (Bonding distance) - ศึกษาค่าพลังงานของสารประกอบเชิงซ้อนและค่าพลังงานทางอุณหพลศาสตร์ (complexation reaction energies) เช่น ΔE และ ΔG
Prathibha และคณะ [71]	เซอร์โคเนียม (IV)	N,N-di-octyl-2-hydroxyacetamide	BP86-GD3/def2-TZVP	ศึกษารูปทรงทางเรขาคณิตและความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะกับสารสกัด และสารนำกลับ
Xing และคณะ [72]	นีโอติเมียม (III)	[N1,1,8,H][DEHP] [N1,1,10,H][DEHP] [N1,1,12,H][DEHP]	-	- ศึกษาปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างไอออนโลหะที่สนใจกับสารสกัด เปรียบเทียบว่าสารสกัดใดมีปฏิสัมพันธ์กับนีโอติเมียมได้ดีกว่าไอออนโลหะอื่น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม

Pancharoen และคณะ [10] ศึกษาการแยกปรอทในรูปแบบ HgCl_4^{2-} ออกจากน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ใช้สารสกัดหลายชนิด ได้แก่ TOA Aliquat 336 Cyanex 923 ละลายในตัวทำละลายน้ำมันก๊าดและโทลูอีน และใช้สารนำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์ การทดลองใช้รูปแบบการไหลแบบสารป้อนและสารนำกลับไหลผ่าน โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัดและการนำกลับปรอท ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสารนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับ จำนวนรอบในการแยกปรอทเพื่อส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก จากผลการทดลองพบว่า สารสกัด TOA และลายในโทลูอีน มีประสิทธิภาพในการสกัดปรอทมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่นๆที่สนใจทดลอง สภาวะที่ดีที่สุดของการสกัดและนำกลับปรอทออกจากน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม คือ ค่าความเป็นกรดของสารป้อนเป็น 2.5 ความเข้มข้นของสารสกัด 2% โดยปริมาตร ความเข้มข้นของสารนำกลับ 0.5 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที จำนวนรอบในการแยกปรอทเป็น 6 รอบในเวลา 300 นาที ส่งผลให้ร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทเป็น 99.8 และ 62.0 ตามลำดับ

Krirkratthawit และคณะ [23] ศึกษาการแยกแพลทินัม (IV) ออกจากน้ำเสียด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ใช้สารสกัดหลายชนิด ได้แก่ Aliquat 336 LIX84 Cyanex 923 TBP และ TOPO ละลายในตัวทำละลายน้ำมันก๊าด และใช้สารนำกลับกรดไฮโดรคลอริกผสมไทโอยูเรีย การทดลองใช้รูปแบบการไหลแบบสารป้อนและสารนำกลับไหลวน ด้วยอัตราการไหลของสารป้อนสารนำกลับคงที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากการออกแบบการทดลองแบบ Face-centered composite design ศึกษาผลของตัวแปร 3 ปัจจัย ที่ส่งผลต่อระบบ ได้แก่ ความเข้มข้นของแพลทินัม (IV) ความเข้มข้นของสารสกัด และความเข้มข้นของสารนำกลับ จากผลการทดลองพบว่าสารสกัด Aliquat 336 มีประสิทธิภาพในการสกัดแพลทินัม (IV) มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่นๆที่สนใจทดลอง และตัวแปรที่สนใจศึกษาทั้ง 3 ปัจจัยมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการสกัดแพลทินัม (IV) สภาวะที่ดีที่สุดของการสกัดแพลทินัม (IV) ออกจากน้ำเสีย คือ ความเข้มข้นของแพลทินัม (IV) 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของ Aliquat 336 10% โดยปริมาตร และความ

เข้มข้นไทโอยูเรีย 0.8 โมลต่อลิตรผสมกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ร้อยละการสกัดและนำกลับ
ปรอทเป็น 96.0 และ 88.0 ตามลำดับ

Niam และคณะ [40] ศึกษาการแยกธาตุหายาก (Rare earth) ได้แก่ นีโอโดเมียม (Nd) ดิสโพรเซียม (Dy) และเพรซีโอดีเมียม (Pr) ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายและการสกัดด้วยเยื่อแผ่น
เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยใช้สารสกัด D2EHPA ละลายในตัวทำละลายไอโซพาร์-แอล (Isopar-
L) และใช้สารนำกลับกรดไนตริก การทดลองด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ใช้ศึกษาอิทธิพลของค่า
ความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด และสารนำกลับที่เหมาะสม ผลของ
การทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรดของสารละลายป้อนเป็น 2 ความเข้มข้นของ D2EHPA 1 โมลต่อ
ลิตร และสารนำกลับกรดไนตริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เหมาะสมกับการสกัดและนำกลับนีโอโดเมียม
(Nd) ดิสโพรเซียม (Dy) และเพรซีโอดีเมียม (Pr) ในการทดลองการสกัดและนำกลับด้วยเยื่อแผ่นเหลว
ที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ทดลองที่อัตราการไหลของสารละลายป้อน 200-250 มิลลิลิตรต่อนาที และ
อัตราการไหลของสารนำกลับที่ 250-300 มิลลิลิตรต่อนาที นำสภาวะดังกล่าวมาทดลองโดยใช้เวลา
90 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่สมดุลไม่เกิดการสกัดเพิ่มขึ้น ร้อยละการสกัดของดิสโพรเซียม นีโอโดเมียม และ
เพรซีโอดีเมียมเป็น 81.55 83.5 และ 87.93 ตามลำดับ และสามารถนำกลับได้ร้อยละ 63.13 15.21
และ 56.29 ตามลำดับ

Chakrabarty และคณะ [50] ศึกษาการแยกปรอท (II) ออกจากน้ำสังเคราะห์ด้วยเยื่อแผ่น
เหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน (FSSLM) ด้วยสารสกัด TOA ละลายในตัวทำละลายเฮปเทน
1,2-ไดคลอโรอีเทนและน้ำมันมะพร้าวซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีการใช้สาร
นำกลับโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อนำกลับปรอท โดยใช้ปริมาตรของสารละลายป้อนและสารนำกลับ
เท่ากันที่ 140 มิลลิลิตร ความเร็วรอบปั่นกววน 500 รอบต่อนาที ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง
ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด ความเข้มข้นของสาร
นำกลับ เสถียรภาพของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบน และการเปรียบเทียบ
ตัวทำละลายที่ต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า กระบวนการสกัดขึ้นกับค่าความเป็นกรด-เบสของ
สารละลายป้อน โดยค่าความเป็นกรดเป็น 1 ส่งผลให้เกิดการสกัดปรอทสูงที่สุด ความเข้มข้นของสาร
สกัดมีผลเพียงเล็กน้อยในงานวิจัยนี้ ซึ่ง 4% โดยปริมาตรให้ผลดีที่สุด ความเข้มข้นของสารนำกลับ
0.3 โมลต่อลิตร การสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยตัวรองรับแบบแผ่นแบนมีเสถียรภาพนานถึง 98

ข้าวโมง น้ำมันมะพร้าวเป็นตัวทำละลายที่ให้ผลของการสกัดปรอทสูงที่สุดร้อยละ 95 เมื่อเทียบกับตัวทำละลายอื่น อีกทั้งเมื่อใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นตัวทำละลายโดยปราศจากสารสกัดยังให้ผลการสกัดปรอทสูงถึงร้อยละ 91.0

Suren และคณะ [42] ศึกษาการแยกตะกั่ว (II) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ด้วยสารสกัด D2EHPA ละลายในตัวทำละลายโทลูอีน โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการแยกตะกั่ว ได้แก่ ความเข้มข้นของ D2EHPA ชนิดของสารนำกลับ (น้ำกลั่น กรดไนตริก กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก) ความเข้มข้นของสารนำกลับ รูปแบบการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับ อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับ ผลการทดลองพบว่า การสกัดและนำกลับมีประสิทธิภาพมากที่สุดที่ ความเข้มข้นของ D2EHPA เป็น 0.03 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของ HCl เป็น 0.9 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับเท่ากันเป็น 100 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยรูปแบบการไหลแบบสารละลายป้อนไหลผ่านและสารนำกลับไหลวนซึ่งเหมาะสมมากกว่ารูปแบบการไหลแบบไหลผ่านทั้งหมด หรือรูปแบบการไหลแบบไหลวนทั้งหมด เนื่องจากรูปแบบการไหลแบบไหลผ่านทั้งหมดจะต้องใช้ปริมาณสารจำนวนมาก อีกทั้งยังมีเวลาในการเจอกันเพื่อเกิดปฏิกิริยาได้สั้นกว่าจึงส่งผลเกิดการนำกลับกลับที่น้อย

Wongsawa และคณะ [25] ศึกษาการแยกปรอท (I) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัด ได้แก่ ชนิดของน้ำมันพืช ความเข้มข้นของปรอทในสารละลาย ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน ความเร็วรอบปั่นกววน อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการสกัด กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสกัดปรอท ผลการทดลองพบว่าสามารถสกัดปรอทได้สูงที่สุดด้วยน้ำมันทานตะวัน ที่ค่าความเป็นกรดของสารละลายป้อนที่ 3.91 ความเร็วรอบปั่นกววน 400 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการสกัด 10 นาที โดยกลไกการสกัดปรอทเกิดขึ้นจากไอออนปรอทจับกับออกซิเจนที่อยู่ในกรดไขมันด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ ส่งผลให้ได้ร้อยละการสกัดสูงสุดเข้าใกล้ 100

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) เพื่อศึกษาการสกัดสารปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ ด้วยน้ำมันพืชที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นทางเลือกนำไปประยุกต์ใช้การพัฒนางานวิจัยและอุตสาหกรรมต่อไป ขั้นตอนการศึกษามีรายละเอียดของสารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ และวิธีการทดลอง ดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3-1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมดระบุถึงชื่อสารเคมี สูตรโมเลกุล และแหล่งที่มา ของสารแต่ละชนิดโดยแบ่งตามวิภูภาคที่ใช้การทดลองโดยแบ่งเป็น วิภูภาคสารละลาย ป้อน สารอินทรีย์ และสารละลายนำกลับ ตามลำดับ

ตารางที่ 3-1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วิภูภาค	ชื่อสารเคมี	สูตรโมเลกุล	แหล่งที่มา
สารละลายป้อน (Aqueous phase)	สารละลายมาตรฐานปรอท	$Hg(NO_3)_2 \cdot H_2O$	Loba Chemie
	สารละลายมาตรฐานสารหนู	H_3AsO_4	Merck
	สารละลายมาตรฐานเหล็ก	$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	PanReac
	สารละลายมาตรฐานแมกนีเซียม	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	PanReac
	สารละลายมาตรฐานแคลเซียม	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	PanReac
สารอินทรีย์ (Organic phase)	โซเดียมคลอไรด์	NaCl	Loba Chemie
	น้ำมันดอกคาโนลา	-	Ampol food processing
	น้ำมันลินซีด	-	ST Art Material
สารละลายนำกลับ (Stripping phase)	น้ำมันข้าวโพด	-	Sime Darby Oils Morakot
	กรดไนตริก	HNO_3	Merck
	กรดซัลฟิวริก	H_2SO_4	Qrec
	กรดไฮโดรคลอริก	HCl	Qrec
	โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	Loba Chemie
	ไทโอยูเรีย	$(NH_2)_2CS$	Loba Chemie

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องวัดค่ากรด-เบส (pH meter) ยี่ห้อ EuTech รุ่น Instruments pH 700
- 2) เครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน (Hot plate stirrer) ยี่ห้อ Stuart รุ่น UC152D
- 3) เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น AG285
- 4) เทอร์โมมิเตอร์ (Mercury thermometers)
- 5) ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 100 250 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 6) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 25 50 100 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 7) ปิเปตต์ (Pipette) ขนาด 1 5 และ 10 มิลลิลิตร
- 8) กรวยแยกสาร (Separation funnel)
- 9) เครื่องเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย ชุดทดลอง Liqui-Cel[®] Liquid/Liquid Extraction System รุ่น Cat #5 PCM-106 ของบริษัท Hoechst Celanese Corporation มอดูลเส้นใยกลางของ Celgaed[®]-X-30 240 microporous polypropylene hollow fiber คุณสมบัติของเครื่องเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย แสดงดังตารางที่ 3-2

3.2.2 เครื่องวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Varian รุ่น AA240FS
- 2) เครื่องฟลูออริเมตริคฟลูออโรมิเตอร์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One
- 3) เครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Lambda 950

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติของเครื่องเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใย [5]

ลักษณะ	วัสดุ/ค่า	หน่วย
วัสดุที่ใช้ผลิตเส้นใยกลาง	พอลิโพรพิลีน	-
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	240	ไมโครเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	300	ไมโครเมตร
ปริมาณรูพรุน	30	%
ความคดเคี้ยว	2.6	-
ผลต่างแรงดันสูงสุด	4.2	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
พื้นที่ผิว	1.4	ตารางเมตร
พื้นที่ผิวต่อปริมาตร	29.3	ตารางเซนติเมตรต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน	1-60	องศาเซลเซียส
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดเส้นใยกลาง	6.3	เซนติเมตร
ความยาวของชุดเส้นใยกลาง	20.3	เซนติเมตร
ปริมาณเส้นใยกลางทั้งหมด	35,000	เส้น

3.2.3 การคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น ในระดับ B3LYP (Becke three parameters and the nonlocal correlation of Lee-Yang-Parr) รวมถึง LANL2DZ (Los Alamos National Laboratory 2 Double-Zeta)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารละลายน้ำทิ้งสังเคราะห์

งานวิจัยนี้สนใจแก้ปัญหาสารปรอทที่พบได้ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่มีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งกำหนด (>0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากงานวิจัยก่อนหน้า [6] ความเข้มข้นของโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำพบบริเวณอ่าวไทยในประเทศไทย มีค่าเป็นดังตารางที่ 3-3 โดยการเตรียมน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำมันสังเคราะห์ เตรียมจากสารละลายมาตรฐานของไอออนโลหะแต่ละชนิด โดย

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาเจือจางกับน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นเป็นไปตามตารางที่ 3-3 คำนวณปริมาตรที่ต้องการจากสมการ (3.1)

ตารางที่ 3-3 องค์ประกอบของน้ำทิ้งสังเคราะห์ [6]

โลหะ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ปรอท, Hg(II)	0.3
สารหนู, As(III)	4.0
เหล็ก, Fe(III)	0.2
แมกนีเซียม, Mg(II)	2.0
แคลเซียม, Ca(II)	15.2
โซเดียม, Na(I)	100

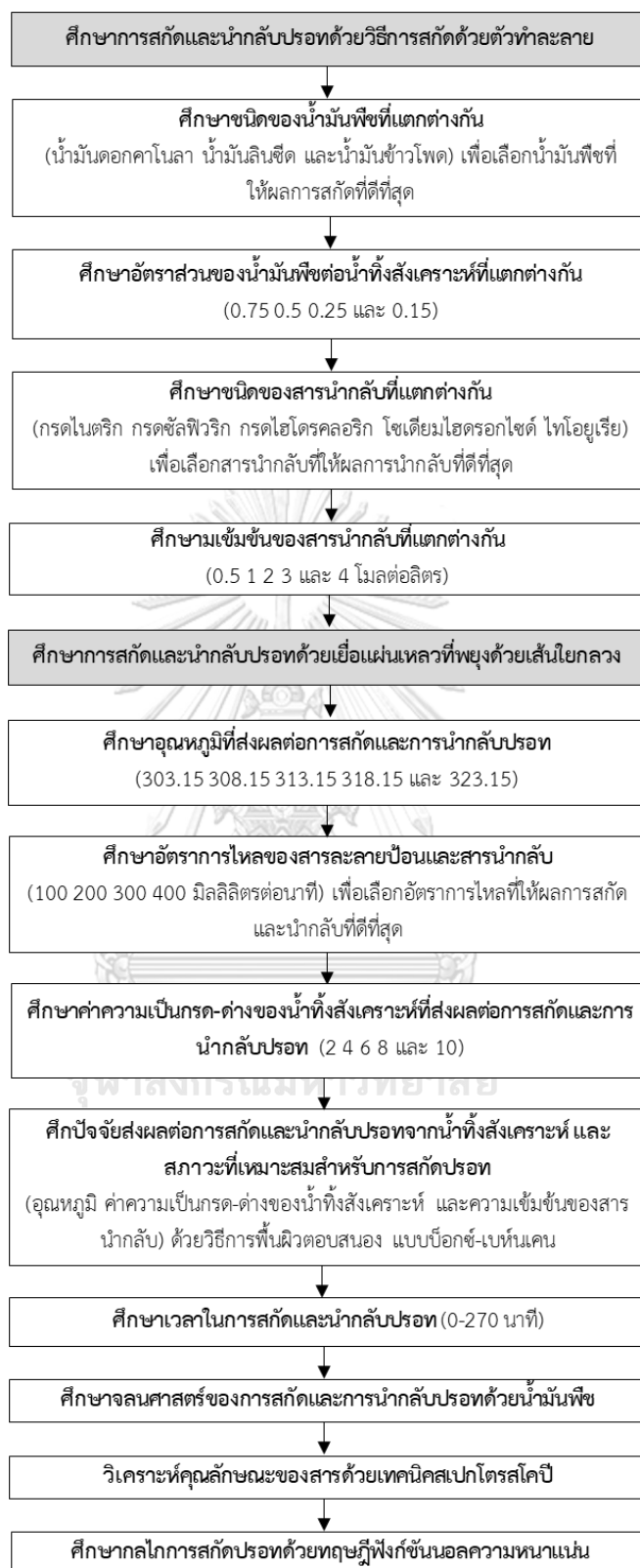
$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (3.1)$$

โดยที่ C_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานของสาร 1000 (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานที่ปิเปตต์ (มิลลิลิตร)

C_2 คือ ความเข้มข้นของสารที่ต้องการ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

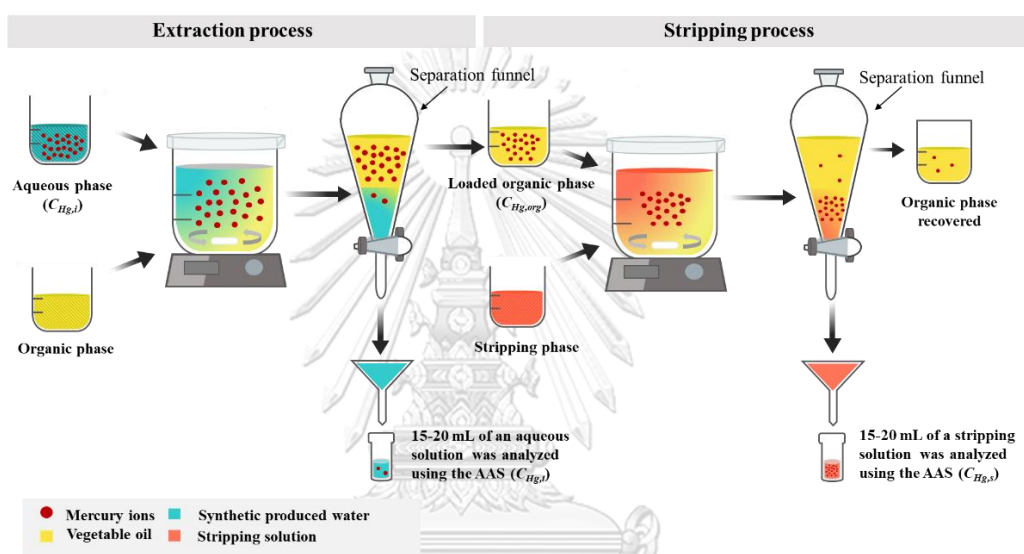
V_2 คือ ปริมาตรของสารที่ต้องการ (มิลลิลิตร)



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้

3.3.2 การสกัดและนำกลับปรอทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

การทดลองการสกัดปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นการทดลองแบบกะ (Batch reaction) ซึ่งเป็นการทดลองในเบื้องต้นเพื่อใช้ศึกษาชนิดของน้ำมันพืชที่ใช้สกัดปรอท อัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ชนิดของสารนำกลับ เพื่อช่วยประหยัดปริมาณสารที่ใช้เพื่อนำผลนี้ไปในการทดลองต่อไปในการสกัดและนำกลับปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยมีขั้นตอนการทดลอง เป็นดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 กระบวนการสกัดและนำกลับปรอทจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

3.3.2.1 ศึกษาชนิดของน้ำมันพืชที่แตกต่างกัน

- 1) วัดค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่เตรียมจากหัวข้อ 3.3.1
- 2) ผสมน้ำทิ้งสังเคราะห์ และสารอินทรีย์ลงในบีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร ในอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์เท่ากัน ($O/A = 1$) ตั้งอยู่บนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ที่ 400 รอบต่อนาที
- 3) ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน
- 4) นำสารทั้งสองออกจากบีกเกอร์ และนำใส่กรวยแยกสาร ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น

5) แยกน้ำทิ้งสังเคราะห์ ซึ่งอยู่ชั้นล่างของกรวยแยกสารออก และวัดค่าความเป็นกรด-เบสหลังการสกัด

6) เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งสังเคราะห์หลังการสกัดปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทคงเหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชั่น สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และวัดค่าความเป็นกรด-เบส หลังสกัด

7) ทำการทดลองหัวข้อที่ 2) ซ้ำ โดยใช้สารอินทรีย์เปลี่ยนเป็น น้ำมันดอกคาโนลาน้ำมันลินซีด และน้ำมันข้าวโพด ตามลำดับ และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งในน้ำมันพืชแต่ละชนิด

3.3.2.2 ศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน

- 1) วัดค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่เตรียมจากหัวข้อ 3.3.1
- 2) ผสมน้ำทิ้งสังเคราะห์ และน้ำมันพืชลงในบีกเกอร์ ขนาด 100 มิลลิลิตร ในอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์เท่ากัน (O/A =1) ตั้งอยู่บนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ที่ 400 รอบต่อนาที
- 3) ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน
- 4) นำสารทั้งสองออกจากบีกเกอร์ และนำใส่กรวยแยกสาร ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น
- 5) แยกน้ำทิ้งสังเคราะห์ ซึ่งอยู่ชั้นล่างของกรวยแยกสารออก และวัดค่าความเป็นกรด-เบสหลังการสกัด
- 6) เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งสังเคราะห์หลังการสกัดปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทคงเหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชั่น สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และวัดค่าความเป็นกรด-เบส หลังสกัด
- 7) ทำการทดลองหัวข้อที่ 2) ซ้ำ โดยใช้อัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์เปลี่ยนเป็น 0.75 0.5 0.25 และ 0.15 ตามลำดับ และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละอัตราส่วน

3.3.2.3 ศึกษาชนิดของสารนำกลับที่แตกต่างกัน

- 1) วัดค่าความเป็นกรด-เบส เริ่มต้นของสารนำกลับ

2) นำน้ำมันพืชหลังสกัดผสมกับกรดไนตริก ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ในอัตราส่วนของสารนำกลับและน้ำมันพืชที่ใช้สกัดแล้วเท่ากันเป็น 1 ตั้งอยู่บนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ที่ 400 รอบต่อนาที

3) ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน

4) นำสารทั้งสองออกจากบีกเกอร์ และนำไปใส่กรวยแยกสาร ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น

5) แยกสารนำกลับกรดไนตริก ออกจากกรวยแยก

6) เก็บตัวอย่างสารนำกลับหลังจากนำกลับปรอทปริมาณ 15-20 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทคงเหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชั่น สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และวัดค่าความเป็นกรด-เบสหลังนำกลับ

7) ทำการทดลองหัวข้อที่ 2) ซ้ำ โดยใช้สารนำกลับเปลี่ยนเป็น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ และไทโอยูเรีย ตามลำดับ และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งในสารนำกลับแต่ละชนิด

3.3.2.4 ศึกษาชนิดของสารนำกลับที่แตกต่างกัน

1) วัดค่าความเป็นกรด-เบส เริ่มต้นของสารนำกลับ

2) นำน้ำมันพืชหลังสกัดผสมกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ในอัตราส่วนของสารนำกลับและน้ำมันพืชที่ใช้สกัดแล้วเท่ากันเป็น 1 ตั้งอยู่บนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ที่ 400 รอบต่อนาที

3) ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน

4) นำสารทั้งสองออกจากบีกเกอร์ และนำไปใส่กรวยแยกสาร ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น

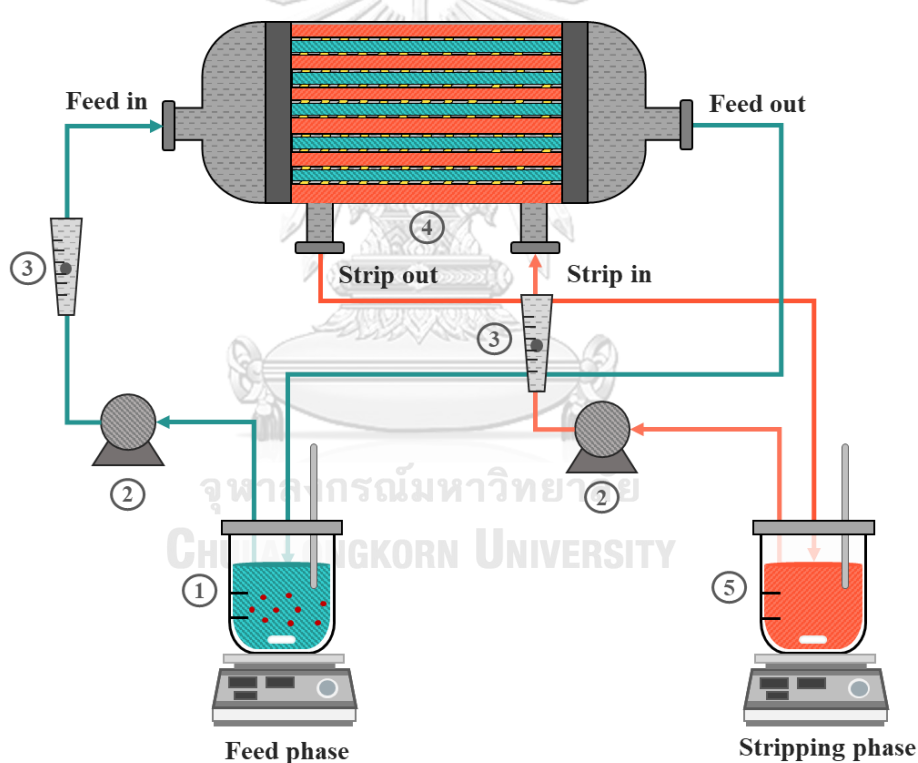
5) แยกสารนำกลับกรดไนตริก ออกจากกรวยแยก

6) เก็บตัวอย่างสารนำกลับหลังจากนำกลับปรอทปริมาณ 15-20 มิลลิลิตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทคงเหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชั่น สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และวัดค่าความเป็นกรด-เบสหลังนำกลับ

7) ทำการทดลองหัวข้อที่ 2) ซ้ำ โดยใช้ความเข้มข้นเปลี่ยนเป็น 1 2 3 และ 4 โมลต่อลิตร ตามลำดับ และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งในสารนำกลับแต่ละชนิด

3.3.3 การสกัดและการนำกลับปรอทด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การทดลองการสกัดปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์และการนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ต่อเนื่องจากการทดลองเบื้องต้นด้วยวิธีการสกัดและนำกลับด้วยตัวทำละลาย โดยการทดลองนี้มีทิศทางการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับแบบไหลสวนทางกัน ใช้รูปแบบการไหลของสารป้อนและสารนำกลับแบบไหลสวนทางกัน (Feed-Strip circulation pattern) [73] โดยมีขั้นตอนการทดลอง เป็นดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 กระบวนการสกัดและนำกลับปรอทด้วยเทคโนโลยีเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง
 (1) ภาชนะสารละลายป้อน (2) เครื่องสูบลม (3) มาตรวัดอัตราการไหล (4) เครื่องเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (5) ภาชนะสารนำกลับ

3.3.3.1 ศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการการสกัดและนำกลับปรอท

- 1) เตรียมน้ำมันพืชที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดปรอทสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.2.1 ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ในปิ๊กเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- 2) ป้อนน้ำมันพืชเข้ามอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยป้อนเข้าทั้งทางท่อและเปลือก หลังจากนั้นปล่อยให้ให้น้ำมันพืชไหลวนเป็นเวลาประมาณ 40 นาที
- 3) เมื่อฝั่งน้ำมันพืชได้ตามเวลาที่กำหนด นำน้ำกลั่นป้อนเข้าทางท่อและเปลือกของมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เพื่อล้างน้ำมันพืชที่ตกค้างออก
- 4) เตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ใช้เป็นสารละลายป้อน ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในปิ๊กเกอร์ 500 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 6
- 5) เตรียมสารนำกลับที่ให้ประสิทธิภาพการนำกลับสูงที่สุดจากหัวข้อ 3.3.2.3 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในปิ๊กเกอร์ 500 มิลลิลิตร ปรับความเข้มข้นของสารนำกลับเป็น 1 โมลต่อลิตร
- 6) ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายป้อนและสารนำกลับที่ 323.15 เคลวินเข้ามอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน รูปแบบการไหลแบบไหลวน อัตราการไหลควบคุมที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที
- 7) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารนำกลับ ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร ที่เวลา 150 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทคงเหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 8) ทำการทดลองหัวข้อที่ 6) ซ้ำ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 308.15 313.15 318.15 และ 323.15 เคลวิน ตามลำดับ

3.3.3.2 ศึกษาอัตราการไหลที่มีผลต่อการการสกัดและนำกลับปรอท

- 1) เตรียมน้ำมันพืชที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดปรอทสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.2.1 ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ในปิ๊กเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
- 2) ป้อนน้ำมันพืชเข้ามอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยป้อนเข้าทั้งทางท่อและเปลือก หลังจากนั้นปล่อยให้ให้น้ำมันพืชไหลวนเป็นเวลาประมาณ 40 นาที
- 3) เมื่อฝั่งน้ำมันพืชได้ตามเวลาที่กำหนด นำน้ำกลั่นป้อนเข้าทางท่อและเปลือกของมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เพื่อล้างน้ำมันพืชที่ตกค้างออก

4) เตรียมน้ำที่สังเคราะห์ใช้เป็นสารละลายป้อน ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ 500 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่สังเคราะห์เป็น 6

5) เตรียมสารนำกลับที่ให้ประสิทธิภาพการนำกลับสูงที่สุดจากหัวข้อ 3.3.2.3 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ 500 มิลลิลิตร ปรับความเข้มข้นของสารนำกลับเป็น 1 โมลต่อลิตร

6) ควบคุมอุณหภูมิที่ประสิทธิภาพการสกัดและนำกลับสูงที่สุดจากหัวข้อ 3.3.3.1 ป้อนสารละลายป้อนและสารนำกลับเข้ามอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทิศทาง การไหลแบบสวนทางกัน รูปแบบการไหลแบบไหลวน อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

7) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารนำกลับ ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร ที่เวลา 120 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทตกเหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

8) ทำการทดลองหัวข้อที่ 6) ซ้ำ โดยใช้อัตราการไหลเปลี่ยนเป็น 200 300 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ

3.3.3.3 ศึกษาค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่สังเคราะห์ที่มีผลต่อการการสกัดและนำกลับปรอท

1) เตรียมน้ำมันพืชที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดปรอทสูงที่สุดจากหัวข้อ 3.3.2.1 ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

2) ป้อนน้ำมันพืชเข้ามอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยป้อนเข้าทั้งทางท่อและเปลือก หลังจากนั้นปล่อยให้ให้น้ำมันพืชไหลวนเป็นเวลาประมาณ 40 นาที

3) เมื่อฝั่งน้ำมันพืชได้ตามเวลาที่กำหนด นำน้ำกลั่นป้อนเข้าทางท่อและเปลือกของมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เพื่อล้างน้ำมันพืชที่ตกค้างออก

4) เตรียมน้ำที่สังเคราะห์ใช้เป็นสารละลายป้อน ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ 500 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำที่สังเคราะห์เป็น 2

5) เตรียมสารนำกลับที่ให้ประสิทธิภาพการนำกลับสูงที่สุดจากหัวข้อ 3.3.2.3 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ 500 มิลลิลิตร ปรับความเข้มข้นของสารนำกลับเป็น 1 โมลต่อลิตร

6) ควบคุมอุณหภูมิที่ประสิทธิภาพการสกัดและนำกลับสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.3.1 ป้อนสารละลายป้อนและสารนำกลับเข้ามอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทิศทางไหลแบบสวนทางกัน รูปแบบการไหลแบบไหลวน อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

7) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารนำกลับ ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร ที่เวลา 150 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทคงเหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชั่น สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

8) ทำการทดลองหัวข้อที่ 6) ซ้ำ โดยเปลี่ยนค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 4 6 8 และ 10 ตามลำดับ

3.3.3.4 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัดและนำกลับปรอทโดยใช้การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

การทดลองเพื่อหาสภาวะที่ได้เปอร์เซ็นต์การสกัดสูงสุด ด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ภายใต้การศึกษา 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ และความเข้มข้นของสารนำกลับ โดยระดับของตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 3-4

1) เตรียมน้ำมันพืชที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดปรอทสูงสุดจากหัวข้อ 3.3.2.1 ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ในปิ๊กเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่ 323.15 เคลวิน เพื่อช่วยลดความหนืดของน้ำมันพืชที่ต้องการฝังในรูพรุน

2) ป้อนน้ำมันพืชเข้ามอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยป้อนเข้าทั้งทางท่อและเปลือก หลังจากนั้นปล่อยให้ น้ำมันพืชไหลวนเป็นเวลาประมาณ 40 นาที

3) เมื่อฝังน้ำมันพืชได้ตามเวลาที่กำหนด นำน้ำกลั่นป้อนเข้าทางท่อและเปลือกของมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง เพื่อล้างน้ำมันพืชที่ตกค้างออก

4) เตรียมน้ำทิ้งสังเคราะห์ใช้เป็นสารละลายป้อน ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในปิ๊กเกอร์ 500 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ตามที่ต้องการศึกษา (2 6 และ 10) ด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์

5) เตรียมสารนำกลับที่ให้ประสิทธิภาพการนำกลับสูงที่สุดจากหัวข้อ 3.3.3.1 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในปิ๊กเกอร์ 500 มิลลิลิตร ปรับความเข้มข้นของสารนำกลับตามที่ต้องการศึกษา (0.5 1 และ 1.5 โมลต่อลิตร)

6) ควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา (303.15 313.15 และ 323.15 เคลวิน) ป้อนสารละลายป้อนและสารนำกลับเข้ามอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน รูปแบบการไหลแบบไหลวน อัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่อนาที

7) เก็บตัวอย่างสารละลายป้อนและสารนำกลับ ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร ที่เวลา 120 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณปรอทคงเหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอบชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

8) ทำการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จำนวน 3 ตัวแปร แบ่งจำนวนการทดลองได้ทั้งหมด 15 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-4 ขอบเขตและช่วงของตัวแปรจากการทดลอง

รหัส (code)	ตัวแปร	หน่วย	ระดับ (level)		
			-1	0	1
X1	อุณหภูมิ	เคลวิน	303.15	313.15	323.15
X2	ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้ง สังเคราะห์	-	2	6	10
X3	ความเข้มข้นของสารนำกลับ	มิลลิกรัมต่อลิตร	0.5	1	1.5

ตารางที่ 3-5 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพินที่ผิวตอบสนอง แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน 3 ตัวแปรของการสกัดและนำกลับปรอท

ลำดับ การทดลอง	ระดับ			สภาวะการทดลอง		
	X1	X2	X3	X1	X2	X3
1	-1	-1	0	303.15	2	1
2	+1	-1	0	323.15	2	1
3	-1	+1	0	303.15	10	1
4	+1	+1	0	323.15	10	1
5	-1	0	-1	303.15	6	0.5
6	+1	0	-1	323.15	6	0.5
7	-1	0	+1	303.15	6	1.5
8	+1	0	+1	323.15	6	1.5
9	0	-1	-1	313.15	2	0.5
10	0	+1	-1	313.15	10	0.5
11	0	-1	+1	313.15	2	1.5
12	0	+1	+1	313.15	10	1.5
13	0	0	0	313.15	6	1
14	0	0	0	313.15	6	1
15	0	0	0	313.15	6	1

3.3.3.5 ศึกษาเวลาในการสกัดและนำกลับปรอท

ทำการทดลองโดยเลือกสภาวะของตัวแปรอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ ความเข้มข้นของสารนำกลับด้วยค่าที่เหมาะสมที่สุดจากหัวข้อ 3.3.3.4 ด้วยการออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน เก็บตัวอย่างสารที่ขาออกจากสายของสารละลายป้อนและสายของสารนำกลับที่เวลา 0-270 นาที

3.3.3.6 ศึกษาจลนศาสตร์ของการสกัดและการนำกลับปรอทด้วยน้ำมันพืช

จากหัวข้อ 3.3.3.5 จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปรอทหลังสกัดและหลังนำกลับ และเวลาในการสกัด นำมาสร้างกราฟเส้นตรงเพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่อันดับของการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ

3.3.3.7 วิเคราะห์คุณลักษณะของสารด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี

1) การวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันพืชก่อนและหลังสกัด สารนำกลับก่อนและหลังนำกลับปรอท ในช่วงความยาวคลื่นที่ 3500-400 เซนติเมตร⁻¹ เพื่อใช้เปรียบเทียบพันธะและหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปของการทดลองการสกัด และการนำกลับปรอท

2) การวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพีคของค่าการดูดกลืนแสงของน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำมันสังเคราะห์ก่อนและหลังสกัด สารนำกลับก่อนและหลังนำกลับปรอท ในช่วงความยาวคลื่นที่ 200 – 800 นาโนเมตร⁻¹ เพื่อใช้ในการตรวจสอบกลไกการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันพืช และสารนำกลับ กับรูปแบบของปรอทที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

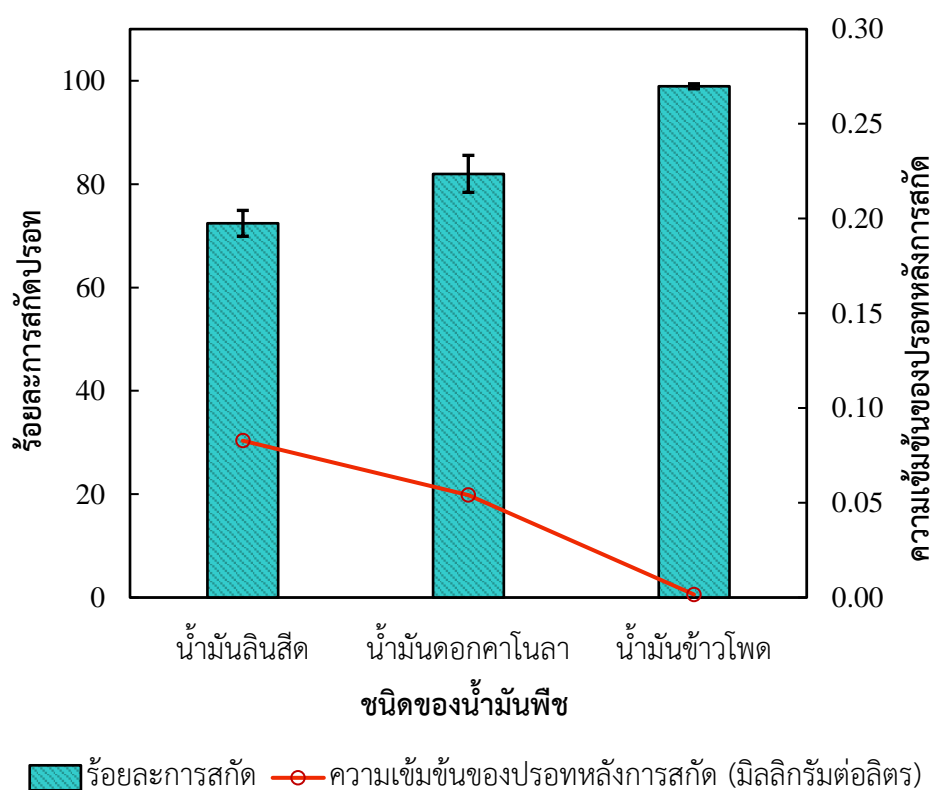
4.1 การศึกษาการสกัดและนำกลับปรอทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

4.1.1 ผลการศึกษาชนิดของน้ำมันพืชที่แตกต่างกัน

จากการทดลองการสกัดปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยใช้น้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันคาโนลา น้ำมันลินซีด และน้ำมันข้าวโพด ด้วยกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย ภายใต้สภาวะการทดลอง ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ เริ่มต้นเป็น 4 อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 400 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 1 ผลการทดลองแสดงดัง ภาพที่ 4-1 พบว่าร้อยละการสกัดปรอท เรียงจากมากไปน้อย ดังนี้ น้ำมันข้าวโพด (99.4%) น้ำมันคาโนลา (82.0%) และน้ำมันลินซีด (72.4%) น้ำมันข้าวโพดสามารถสกัดปรอทได้มากที่สุด และความเข้มข้นของปรอทหลังจากกระบวนการสกัดพบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอยู่ภายใต้ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม และกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ดังนั้น น้ำมันข้าวโพดมีความเหมาะสมในการเลือกเป็นสารที่ใช้สกัดปรอทในการทดลองถัดไป

ประสิทธิภาพการสกัดปรอทด้วยน้ำมันพืช สามารถอธิบายด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของน้ำมันแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 4-1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืช พบว่าความหนาแน่นของน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.913-0.935 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อพิจารณาความหนืดของน้ำมันพืชพบว่ามีค่าสูง เนื่องจากสายโซ่ยาวของกรดไขมัน จากงานวิจัยของ [74] พบว่าภายใต้สภาวะทดลอง ความหนืดที่แตกต่างกันของน้ำมันพืชไม่ได้เป็นอุปสรรคต่อกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย แรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมัน (interfacial tension) ที่มีค่าต่ำจะส่งผลให้วัฏภาคอินทรีย์มีการกระจายตัวในวัฏภาคสารละลายเป็นหยดน้ำมันขนาดเล็ก ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวระหว่างวัฏภาคเพิ่มสูงขึ้น [75-77] เนื่องจากเมื่อพื้นที่ผิวระหว่างวัฏภาคเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคเพิ่มสูงขึ้น [78] ดังนั้น แรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมันของน้ำมันคาโนลา (28.5 mN/m) และน้ำมันข้าวโพด (33.0 mN/m) ที่มีค่าต่ำจะสนับสนุนการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคของตัวถูกละลายได้ดีกว่าน้ำมันลินซีด (49.0 mN/m) ส่งผลให้ร้อยละ

การสกัดปรอทน้ำมันคาโนลา และน้ำมันข้าวโพดมีค่าสูงกว่าน้ำมันลินสีด [55] ถึงแม้ว่าคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันคาโนลาและน้ำมันข้าวโพดนั้นคล้ายคลึงกัน แต่มีปริมาณของกรดไขมันที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4-2 จากงานวิจัยของ Bhatluri และคณะ [55] รายงานว่ากรดไขมันซึ่งปราศจากสารสกัด สามารถกำจัดโลหะหนักได้ ซึ่งร้อยละการสกัดของปรอทที่สูงที่สุดด้วยน้ำมันข้าวโพดอาจเนื่องจากปริมาณกรดไขมันที่สูงที่สุดในน้ำมันข้าวโพดเป็นส่วนสำคัญ ดังนั้น กรดไลโนเลอิกมีส่วนสำคัญในการสกัดปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wongsawa และคณะ [25]



ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดปรอทและความเข้มข้นของปรอทหลังกระบวนการสกัดกับชนิดของน้ำมันพืชที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ

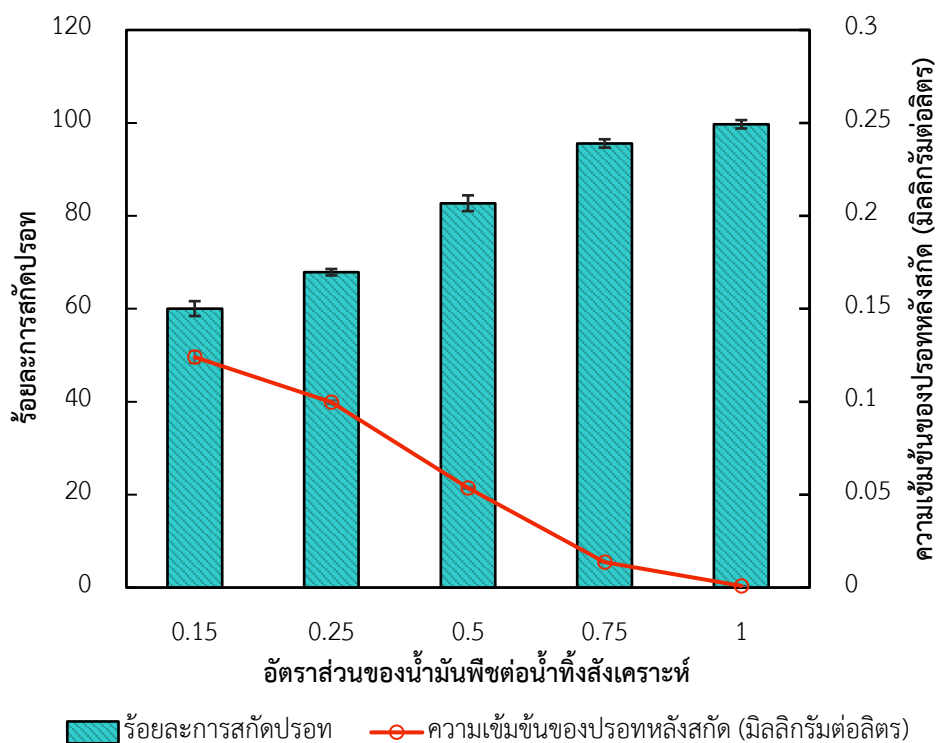
น้ำมันพืช	คุณสมบัติทางกายภาพ			อ้างอิง
	ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 22 °C (g/cm ³)	ความหนืด ที่อุณหภูมิ 22 °C (mPa.s)	แรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมัน (mN/m)	
น้ำมันลินซีด	0.935	41.4	49.0	[43]
น้ำมันคาโนลา	0.913	63.5	28.5	[44]
น้ำมันข้าวโพด	0.915	59.5	33.0	[45]

ตารางที่ 4-2 ปริมาณกรดไขมันของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ

น้ำมันพืช	ปริมาณกรดไขมัน (%)					อ้างอิง
	กรดปาล์มมิติก (C16:0)	กรดสเตียริก (C18:0)	กรดโอเลอิก (C18:1)	กรดไลโนเลอิก (C18:2)	กรดไลโนเลนิก (C18:3)	
น้ำมันลินซีด	4.9–8.0	2.2–4.5	13.4–19.4	12.3–17.4	39.9–60.4	[46]
น้ำมันคาโนลา	3.9-4.1	1.1-1.9	56.1-64.4	20.4-21.0	7.9-9.6	[47, 48]
น้ำมันข้าวโพด	6.7–16.5	0.7–6.6	16.2–43.8	39.5–69.5	0.0–3.1	[49]

4.1.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำที่สังเคราะห์ที่แตกต่างกัน

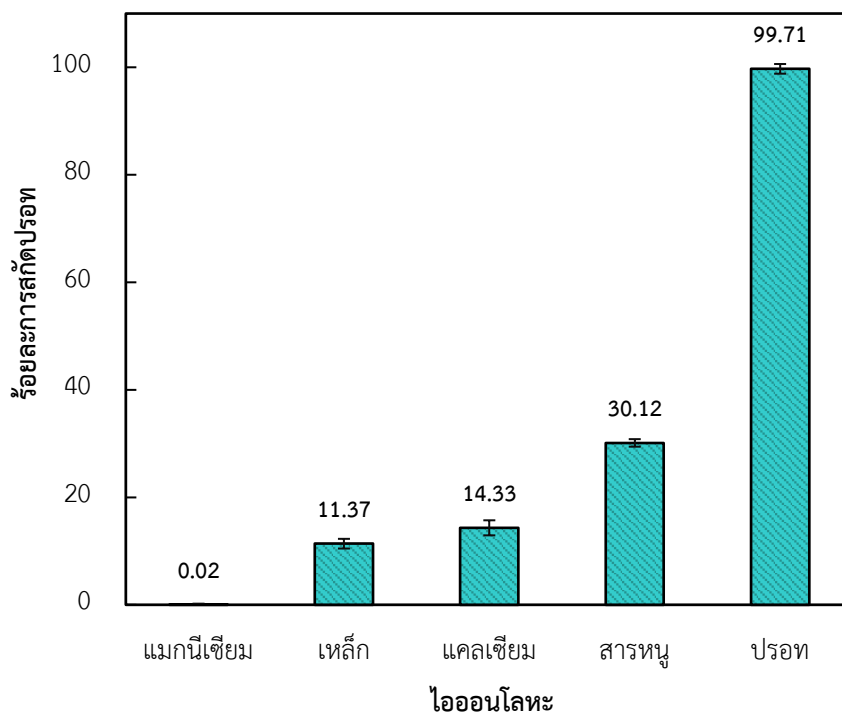
จากการทดลองการสกัดปรอทออกจากน้ำที่สังเคราะห์โดยอัตราส่วนของน้ำมันข้าวโพดต่อน้ำที่สังเคราะห์ศึกษาในช่วง 0.15-1 ภายใต้สภาวะการทดลอง ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดของน้ำที่สังเคราะห์เป็น 4 อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 400 รอบต่อนาที จากภาพที่ 4-2 พบว่าเมื่ออัตราส่วน O/A เพิ่มขึ้นจาก 0.15 เป็น 1 ประสิทธิภาพการสกัดปรอทเพิ่มขึ้นจาก 58.7% เป็น 99.7% เมื่ออัตราส่วน O/A สูงขึ้น ปริมาณน้ำมันข้าวโพดอิสระในวัฏภาคอินทรีย์จะเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสกัดสารปรอทได้อย่างเพียงพอ [79] อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราส่วน O/A < 1 ความเข้มข้นของปรอทหลังการสกัดพบว่ามีค่าสูงกว่าขีดจำกัดการปล่อยมาตรฐาน (> 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร) ดังนั้น อัตราส่วน O/A ที่ 1 ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองในอนาคต



ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดปรอทและความเข้มข้นของปรอทหลังกระบวนการสกัดกับอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำที่สังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

4.1.3 ผลการศึกษาการสกัดไอออนโลหะอื่นจากน้ำที่สังเคราะห์

จากการทดลองการสกัดปรอทและไอออนอื่นออกจากน้ำที่สังเคราะห์ ภายใต้สภาวะการทดลอง ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดของน้ำที่สังเคราะห์เป็น 4 อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 400 รอบต่อนาที อัตราส่วนของน้ำมันข้าวโพดต่อน้ำที่สังเคราะห์เป็น 1 จากภาพที่ 4-3 ผลการทดลองพบว่าร้อยละการสกัดเรียงจากมากไปน้อยเป็นดังนี้ ปรอท > สารหนู > แคลเซียม > เหล็ก > แมกนีเซียม เนื่องจากค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) ของปรอทและสารหนูมีค่าใกล้เคียงกัน (2 และ 2.18 ตามลำดับ) แต่จะมีค่าสูงมากกว่าไอออนโลหะอื่น ๆ ส่งผลให้ปรอทและสารหนูสามารถเข้าจับกับโมเลกุลในน้ำมันข้าวโพดได้ง่ายกว่า นอกจากนั้นขนาดธาตุของสารหนูที่มีขนาดใหญ่กว่าปรอทยังทำให้ต้องใช้พลังงานในการจับกับโมเลกุลในน้ำมันข้าวโพดที่สูงกว่าปรอท ทำให้เกิดการสกัดปรอทได้สูงที่สุด [25]

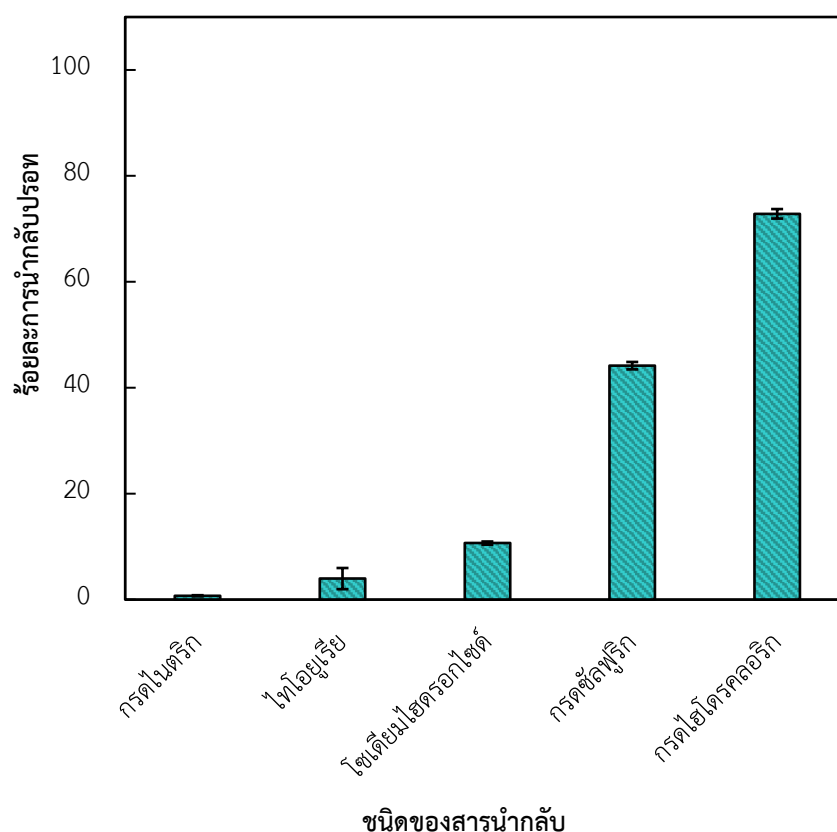


ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดโปรทกับไอออนโลหะในน้ำที่สังเคราะห์ โดยใช้น้ำมันข้าวโพดเป็นสารสกัด ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

4.1.4 ผลการศึกษาชนิดของสารนำกลับที่แตกต่างกัน

จากการทดลองการนำกลับโปรทออกจากวัฏภาคอินทรีย์เพื่อศึกษาชนิดของสารนำกลับ ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไทโอยูเรีย และกรดไนตริก ภายใต้สภาวะการทดลอง ความเข้มข้นของสารนำกลับ 1 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่น กวน 400 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของสารนำกลับต่อน้ำมันข้าวโพดเป็น 1 เวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดัง ภาพที่ 4-4 พบว่าสารนำกลับกลุ่มกรดสามารถนำกลับโปรทได้ดีกว่าสารอื่นๆ เนื่องจากมีงานวิจัยที่รายงานว่าสารนำกลับที่เป็นกรดสามารถนำกลับโลหะไอออนบวกได้มีประสิทธิภาพสูง เพราะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวก [42] กรดไฮโดรคลอริกให้ร้อยละการนำกลับโปรทสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดตัวอื่น ๆ เนื่องจากมีไฮโดรเจนไอออนสูงจึงสามารถจับกับโปรทได้สูง สามารถอธิบายด้วยค่า pK_a ซึ่งบ่งชี้ถึงการแตกตัวของไฮโดรเจนไอออนได้ เมื่อค่า pK_a ยิ่งน้อย แสดงว่ามีการแตกตัวของไฮโดรเจนไอออนสูง และความแรงของกรดมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่า pK_a

ตามลำดับได้ดังนี้ กรดไนตริก (-1.64) > กรดซัลฟูริก (-3.00) > กรดไฮโดรคลอริก (-6.30) ดังนั้น กรดไฮโดรคลอริกมีความเป็นกรดที่แรงกว่ากรดซัลฟูริก และกรดไนตริก ผลลัพธ์เหล่านี้พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suren และคณะ [42] จึงเลือกใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารนำกลับในการทดลองต่อไป

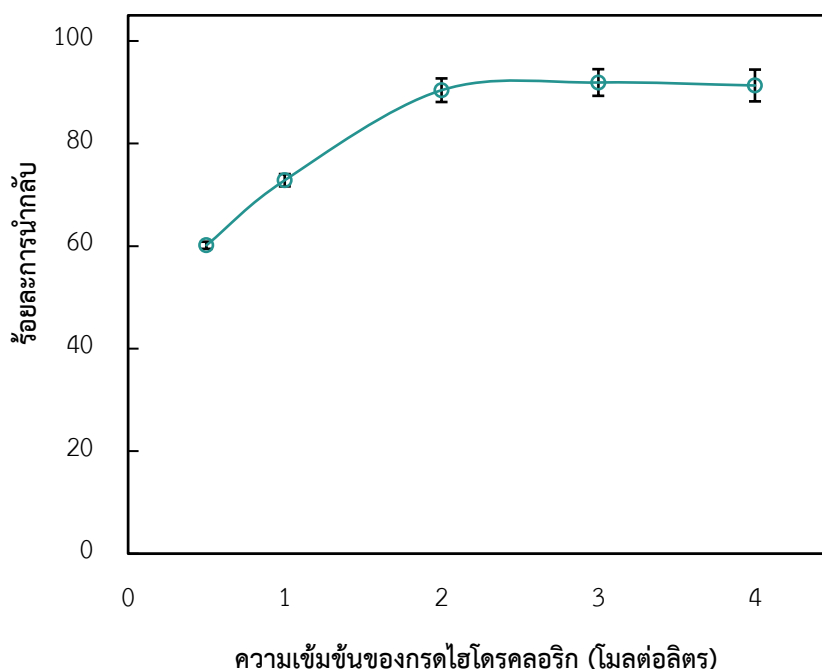


ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ของร้อยละการนำกลับปรอทกับชนิดของสารนำกลับที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

4.1.5 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารนำกลับที่แตกต่างกัน

จากการทดลองการนำกลับปรอทออกจากวัฏภาคอินทรีย์เพื่อศึกษาความเข้มข้นของสารกรดไฮโดรคลอริกที่ 0.5 1.0 2.0 3.0 และ 4.0 โมลต่อลิตร ภายใต้สภาวะการทดลอง อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 400 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของสารนำกลับต่อน้ำมันข้าวโพดเป็น 1 เวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดัง ภาพที่ 4-5 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นจาก 0.5-2 โมลต่อลิตร ส่งผลให้มีร้อยละการนำกลับปรอทสูงขึ้นจาก 60.8% เป็น

91.2% อธิบายด้วยทฤษฎีของ Le Chatelier เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถนำกลับปรอทได้เพิ่มขึ้น เมื่อปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ซึ่งได้เป็นปรอทกลับมาเพิ่มขึ้น [33] อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มจาก 2-4 โมลต่อลิตร พบว่าร้อยละการนำกลับของปรอทไม่ได้มีผลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล ดังนั้น ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่ไม่เกิน 1.5 โมลต่อลิตร นำมาใช้ในการทดลองในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงต่อไป เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายของโมดูลเส้นใยกลวงเนื่องจากความเป็นกรดที่สูง



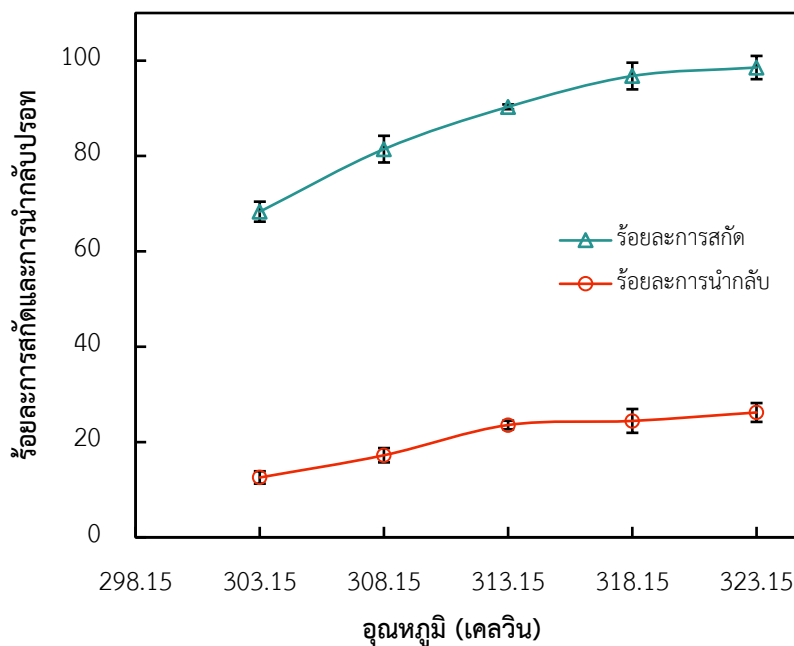
ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ของร้อยละการนำกลับปรอทกับความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

4.2 การสกัดและการนำกลับปรอทด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

4.2.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

การทดลองนี้ศึกษาอุณหภูมิที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทที่แตกต่างกัน โดยใช้สารในวัฏภาคอินทรีย์ คือ น้ำมันข้าวโพด ซึ่งให้ผลการสกัดสูงที่สุดจากการทดลองก่อนหน้านี้

หัวข้อ 4.1.1 และสารที่ใช้ในวัฏภาคสารนำกลับ คือ กรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ซึ่งให้ผลการสกัดสูงที่สุดจากการทดลองก่อนหน้า หัวข้อ 4.1.3 ช่วงของอุณหภูมิที่สนใจศึกษา ได้แก่ 303.15 308.15 313.15 318.15 และ 323.15 เคลวิน ตามลำดับ โดยควบคุมให้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับมีค่าเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที จากภาพที่ 4-6 ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 303.15 ถึง 323.15 เคลวิน พบว่าร้อยละการสกัดปรอทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 68.32 เป็น 98.56 และร้อยละการนำกลับปรอทจาก 12.67 เป็น 26.33 เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดของน้ำมันข้าวโพดลดลง เมื่อความหนืดลดลงส่งผลให้การแพร่ของไอออนปรอทจากวัฏภาคสารละลายป้อนไปสู่วัฏภาคสารอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของปรอทได้มากขึ้น ทำให้มีร้อยละการสกัดปรอทสูงขึ้น และเกิดการแพร่ของสารประกอบเชิงซ้อนจากวัฏภาคอินทรีย์ไปสู่วัฏภาคสารนำกลับได้มากขึ้น ทำให้มีร้อยละการนำกลับปรอทสูงขึ้นเช่นกัน [23] นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิยังส่งผลต่อจลนศาสตร์เคมี (Chemical kinetics) นั่นคือ อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาสูงขึ้นจากทฤษฎีของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) เมื่อปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดได้มากขึ้นจะส่งผลให้การสกัดและนำกลับปรอทได้สูงขึ้นเช่นกัน และเนื่องจากข้อจำกัดของอุณหภูมิที่สูงอาจส่งผลให้เป็นอันตรายต่อเสียใยในมอดูลเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ดังนั้นอุณหภูมิที่ 323.15 เคลวินจึงเหมาะสมกับระบบ และเลือกเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่อไป

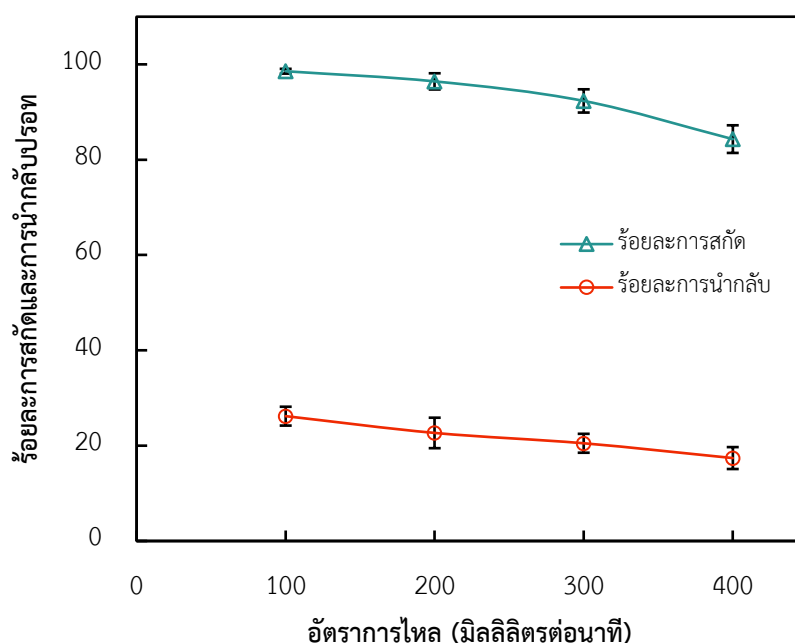


ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทกับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

4.2.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลที่แตกต่างกัน

การทดลองนี้ศึกษาอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับที่แตกต่างกัน โดยใช้สารในวัฏภาคอินทรีย์ คือ น้ำมันข้าวโพด และสารที่ใช้ในวัฏภาคสารนำกลับ คือ กรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ช่วงของอัตราการไหลที่สนใจศึกษา ได้แก่ 100 200 300 และ 400 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 323.15 เคลวิน และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับมีค่าเท่ากัน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันพืชหลุดออกจากรูพรุนหลุดเนื่องจากความดันที่แตกต่างกัน ซึ่งการควบคุมอัตราการไหลของสารทั้งสองฝั่งให้เท่ากันสนับสนุนด้วยงานวิจัยก่อนหน้าหลายงานวิจัย [5, 8, 38] จากภาพที่ 4-7 ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็น 400 มิลลิลิตรต่อนาที ร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทมีปริมาณลดลงจากร้อยละการสกัด 98.56 ลดลงเหลือ 84.32 และร้อยละการนำกลับ 26.19 ลดลงเหลือ 17.40 เนื่องจากอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับยังมีค่าสูง จะส่งผลให้มีเวลาที่น้ำมันข้าวโพดเจอกับปรอทน้อย ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของปรอทลดลงและเกิดปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับได้น้อย [42] นอกจากนั้นการ

ใช้อัตราการไหลที่สูงขึ้นยังส่งผลให้เกิดแรงเฉือนที่บริเวณผิวสัมผัสรอยต่อระหว่างสารละลายป้อนและน้ำมันข้าวโพด และรอยต่อระหว่างน้ำมันข้าวโพดและสารนำกลับได้สูง อาจส่งผลให้น้ำมันข้าวโพดที่ฝังในรูพรุนหลุดออกได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแรงเฉือนไปทำลายแรงเคลปติลาริชของน้ำมันข้าวโพดที่ยึดกับรูพรุนไว้ [80] ดังนั้น อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีจึงเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองต่อไป

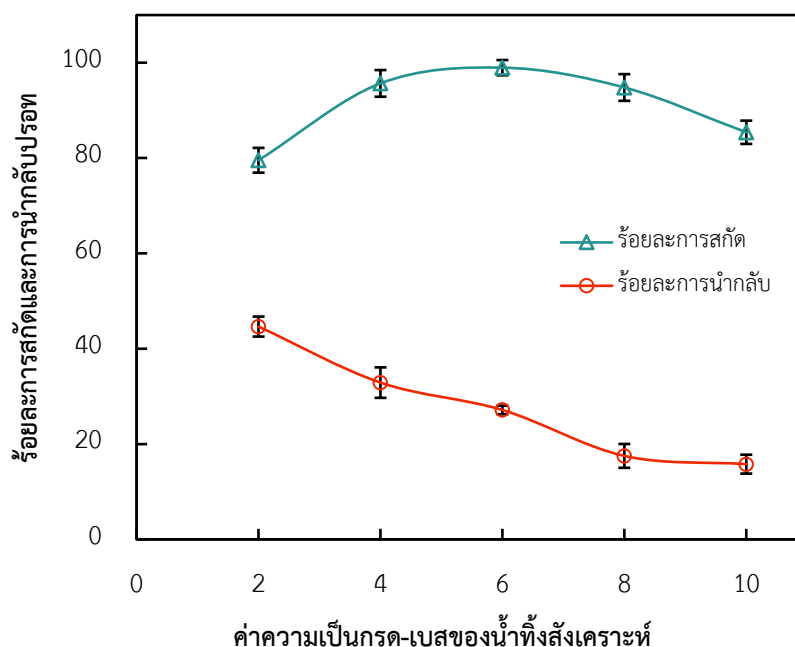


ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทกับอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

4.2.3 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน

การทดลองนี้ศึกษาค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทที่แตกต่างกัน โดยใช้สารในวัฏภาคอินทรีย์ คือ น้ำมันข้าวโพด และสารที่ใช้ในวัฏภาคสารนำกลับ คือ กรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ช่วงของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่สนใจศึกษา ได้แก่ 2 4 6 8 และ 10 ตามลำดับ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 323.15 เคลวิน และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับมีค่าเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที จากภาพที่ 4-8 ผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 6 ส่งผลให้

ร้อยละการสกัดเพิ่มสูงขึ้น จาก 79.53 เป็น 98.96 หลังจากนั้นในช่วงของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจาก 6 ถึง 10 ส่งผลให้ร้อยละการสกัดลดลง เนื่องจากแผนภาพแสดงรูปแบบของปรอทที่ค่าความเป็นกรด-เบสต่าง ๆ พบว่าที่ค่า 2-7 ปรอทจะอยู่ในรูปแบบของ $HgCl_2$ ซึ่งเป็นปรอทในรูปของเกลือคลอไรด์ แต่ที่ค่าความเป็นเบส 7 ขึ้นไป ปรอทจะอยู่ในรูปแบบของ $Hg(OH)_2$ ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถตกตะกอนได้ อาจขัดขวางการสกัดปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยน้ำมันข้าวโพด [81] นอกจากนี้ สารที่มีขี้จะสามารถละลายได้ดีในสารที่มีขี้ด้วยกัน และในทางตรงกันข้ามสารที่ไม่มีขี้จะสามารถละลายได้ดีในสารที่ไม่มีขี้เช่นเดียวกัน ดังนั้น อีกนัยหนึ่งที่ค่าความเป็นกรดสูง จะมีปริมาณไฮโดรเจนไอออนสูง (H^+) และที่ค่าความเป็นเบสสูง จะมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนสูง (OH^-) สูง ซึ่งแสดงถึงความมีขี้ที่สูง ทำให้ถูกสกัดด้วยน้ำมันข้าวโพดได้ยากเนื่องจากน้ำมันข้าวโพดเป็นสารไม่มีขี้ [82] เมื่อมีความเป็นกรดสูงที่ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ต่ำจะส่งผลให้มีความแตกต่างของไฮโดรเจนไอออนสูงส่งผลให้มีการถ่ายโอนมวลไปยังภูมิภาคของสารนำกลับได้มากจึงส่งผลให้มีร้อยละการนำกลับที่สูง



ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดและก็นำกลับปรอทกับค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่กำหนด

4.2.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยและสถานะที่ดีที่สุดของการสกัดและนำกลับปรอท

โดยใช้การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

จากการทดลองการสกัดและนำกลับปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสกัดปรอท 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของสารละลายป้อนและสารนำกลับ (303.15-323.15 เคลวิน, X1) ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (2-10, X2) และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (0.5-1.5, X3) โดยอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับคงที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ออกแบบการทดลองด้วยวิธีพินผิวการตอบสนองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ด้วยโปรแกรม Design-expert ซึ่งทำการทดลองทั้งหมดจำนวน 15 การทดลอง ผลการทดลองการสกัดและนำกลับปรอท และผลการทำนายค่าการสกัดและนำกลับปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4-3 สมการกำลังสองแสดงดังสมการที่ (4.1) - (4.2) เพื่อใช้อธิบายปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อปัจจัยตอบสนอง ได้แก่ ร้อยละการสกัด (%E) และร้อยละการนำกลับปรอท (%S) จากน้ำทิ้งสังเคราะห์

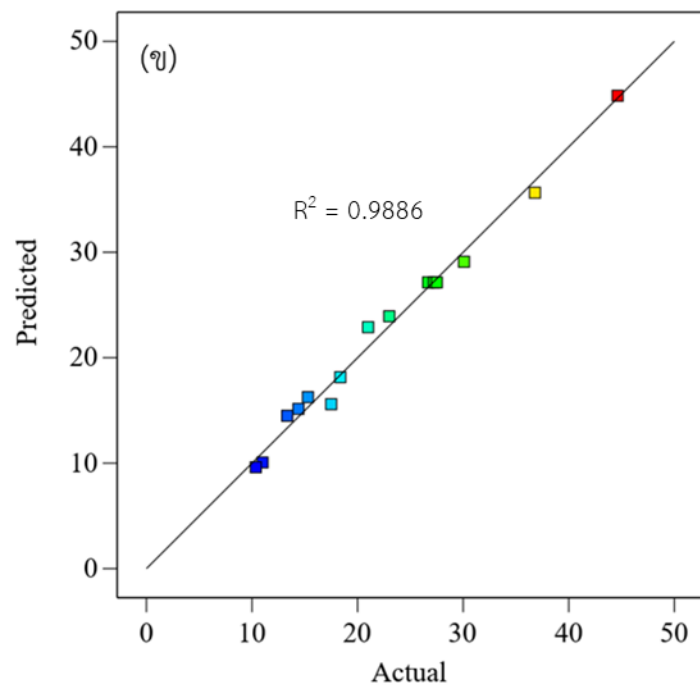
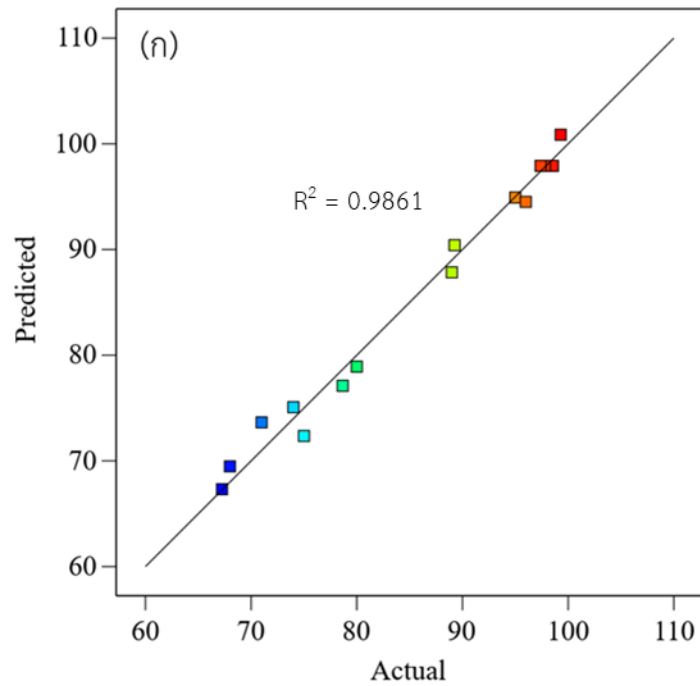
$$\begin{aligned} \%E = & -56 + 4.56X_1 + 7.98X_2 + 29.7X_3 - 0.0561X_1^2 - 0.9471X_2^2 \\ & - 13.02X_3^2 + 0.0989X_1X_2 + 1.244X_2X_3 - 0.014X_1X_3 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \%S = & -115 + 5.41X_1 + 1.9X_2 + 45.9X_3 - 0.05588X_1^2 + 0.225X_2^2 \\ & - 28.34X_3^2 - 0.1531X_1X_2 + 0.462X_2X_3 - 0.596X_1X_3 \end{aligned} \quad (4.2)$$

จากตารางที่ 4-3 เมื่อนำข้อมูลค่าการทดลอง (Actual) และค่าการทำนาย (Predicted) ที่คำนวณจากสมการที่ (4.1) และ (4.2) ของการนำกลับและการสกัดปรอท ตามลำดับ มาแสดงการเปรียบเทียบในรูปแบบของกราฟเชิงเส้น แสดงดังภาพที่ 4-9 พบว่าข้อมูลการทดลองเกาะกลุ่มกับค่าการทำนาย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยการตัดสินใจ (R^2) ของร้อยละสกัดปรอทและนำกลับปรอท เป็น 0.9861 และ 0.9886 ตามลำดับ จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่โปรแกรมคำนวณมีความแม่นยำ [61]

ตารางที่ 4-3 การเปรียบเทียบค่าร้อยละการสกัดและนำกลับโปรทระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากการทำนายด้วยการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนจำนวน 3 ตัวแปร

ลำดับ การ ทดลอง	สภาวะการทดลอง			%E		%S	
	X1	X2	X3	ค่าจากการ ทดลอง	ค่าจากการ ทำนาย	ค่าจากการ ทดลอง	ค่าจากการ ทำนาย
1	303.15	2	1	67.3	67.2	21.0	22.8
2	323.15	2	1	75.1	72.3	44.6	44.8
3	303.15	10	1	71.3	73.8	18.4	18.1
4	323.15	10	1	95.0	94.7	17.5	15.6
5	303.15	6	0.5	78.7	77.0	11.0	10.0
6	323.15	6	0.5	89.3	90.2	14.4	15.1
7	303.15	6	1.5	89.0	87.7	10.4	9.6
8	323.15	6	1.5	99.3	100.0	23.0	23.9
9	313.15	2	0.5	68.0	69.3	30.1	29.1
10	313.15	10	0.5	80.1	78.8	13.3	14.5
11	313.15	2	1.5	74.0	74.9	36.8	35.6
12	313.15	10	1.5	96.0	94.4	15.3	16.2
13	313.15	6	1	98.6	97.7	26.7	27.3
14	313.15	6	1	97.8	97.7	27.9	27.3
15	313.15	6	1	97.4	97.7	27.5	27.3



ภาพที่ 4-9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าจากการทดลองกับค่าจากการทำนาย (ก) ร้อยละการสกัดปรอท และ (ข) ร้อยละการนำกลับปรอท

4.2.4.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและนัยสำคัญของตัวแปรปัจจัย

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ด้วยโปรแกรม Minitab 21 แสดงค่าทางสถิติเพื่อหาผลกระทบของตัวแปรที่สนใจศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและสร้างสมการเชิงถดถอย (Regression equation) เพื่อได้มาซึ่งค่าตัวแปรต่างๆที่ส่งผลให้ได้รับร้อยละการสกัดและการนำกลับปรอทสูงสุด ที่ระดับความน่าเชื่อถือร้อยละ 95 ตารางที่ 4-4 แสดงค่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการสกัดปรอทและตารางที่ 4-5 แสดงค่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการนำกลับปรอท

จากตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลร้อยละการสกัดปรอทแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความน่าเชื่อถือร้อยละ 95 เมื่อพิจารณานัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละตัวแปรที่ส่งผลต่อปัจจัยตอบสนอง ด้วยค่า p-value น้อยกว่า 0.05 พบว่าอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ (X1) ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (X2) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X3) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (X1X2) และอิทธิพลกำลังสองของอุณหภูมิ (X1X1) อิทธิพลกำลังสองค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน (X2X2) พิจารณาค่า Lack-of-Fit ซึ่งมีค่า p-value เท่ากับ 0.055 ($p\text{-value} > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการถดถอยนี้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

จากตารางที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลร้อยละการนำกลับปรอทแสดงให้เห็นว่าแสดงให้เห็นว่าที่ระดับความน่าเชื่อถือร้อยละ 95 เมื่อพิจารณานัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละตัวแปรที่ส่งผลต่อปัจจัยตอบสนอง ด้วยค่า p-value น้อยกว่า 0.05 พบว่าอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ (X1) ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (X2) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X3) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (X1X2) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X1X3) และอิทธิพลกำลังสองของอุณหภูมิ (X1X1) อิทธิพลกำลังสองของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (X2X2) อิทธิพลกำลังสองของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X3X3) พิจารณาค่า Lack-of-Fit ซึ่งมีค่า p-value เท่ากับ 0.073 ($p\text{-value} > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการถดถอยนี้มีความเหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 4-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับการสกัดโปรตีนด้วยระบบเยื่อแผ่นที่พองด้วยเส้นใยกลวง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	2013.94	223.771	39.50	0.000
Linear	3	987.50	329.165	58.11	0.000
X1	1	343.39	343.387	60.62	0.001
X2	1	420.21	420.206	74.18	0.000
X3	1	223.90	223.902	39.53	0.001
Square	3	939.02	313.007	55.26	0.000
X1*X1	1	117.85	117.851	20.81	0.006
X2*X2	1	852.27	852.268	150.46	0.000
X3*X3	1	40.08	40.079	7.08	0.045
2-Way Interaction	3	87.42	29.140	5.14	0.055
X1*X2	1	62.65	62.649	11.06	0.021
X1*X3	1	0.02	0.021	0.00	0.954
X2 *X3	1	24.75	24.751	4.37	0.091
Error	5	28.32	5.665		
Lack-of-Fit	3	27.28	9.094	17.49	0.055
Pure Error	2	1.04	0.520		
Total	14	2042.26			

หมายเหตุ X1 คือ อุณหภูมิ (เคลวิน), X2 คือ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ และ X3 คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)

ตารางที่ 4-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับการนำกลับปรอทด้วยระบบเยื่อแผ่นที่ พยุงด้วยเส้นใยกลวง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	1333.70	148.189	47.97	0.000
Linear	3	800.97	266.991	86.43	0.000
X1	1	188.27	188.267	60.94	0.001
X2	1	578.08	578.082	187.13	0.000
X3	1	34.62	34.625	11.21	0.020
Square	3	355.62	118.539	38.37	0.001
X1*X1	1	115.31	115.314	37.33	0.002
X2*X2	1	47.87	47.871	15.50	0.011
X3*X3	1	185.34	185.337	59.99	0.001
2-Way Interaction	3	177.11	59.037	19.11	0.004
X1*X2	1	150.09	150.091	48.58	0.001
X1*X3	1	21.34	21.344	6.91	0.047
X2*X3	1	5.67	5.674	1.84	0.233
Error	5	15.45	3.089		
Lack-of-Fit	3	14.69	4.895	12.88	0.073
Pure Error	2	0.76	0.380		
Total	14	1349.15			

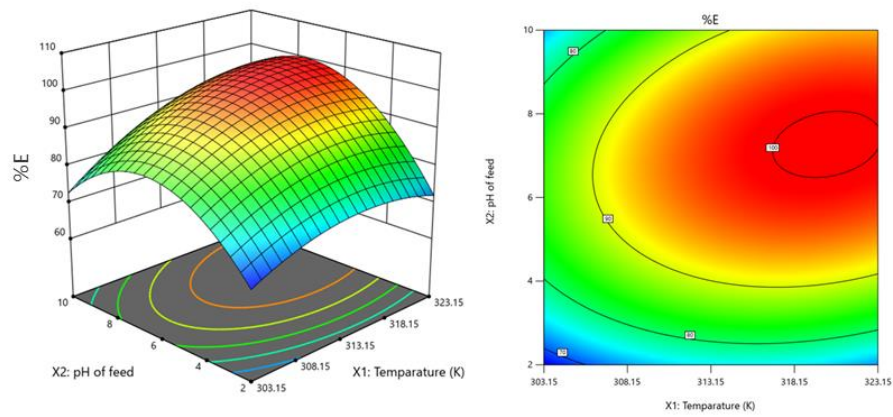
หมายเหตุ X1 คือ อุณหภูมิ (เคลวิน), X2 คือ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ และ X3 คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)

4.2.4.2 ผลของอิทธิพลร่วมสองทางที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดปรอท

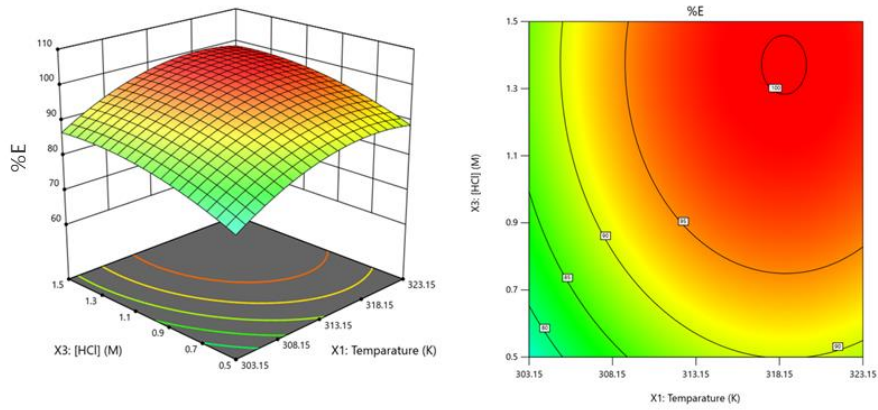
การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละการสกัดปรอท สามารถสร้างพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (3D plot) และแผนภาพเส้นโครงร่าง (contour plot) จากสมการแบบจำลองที่ (4.1) แสดงได้ดังภาพที่ 4-10 (ก) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (X1X2) (ข) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก

(X1X3) และ (ค) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X2X3) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนข้างต้น อิทธิพลร่วมสองปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปัจจัยตอบสนอง ได้แก่ อิทธิพลสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน (X1X2) เมื่อพิจารณาตามภาพที่ 4-10 (ก) แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความเป็นกรดเป็น 2-4 เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจาก 303.15-323.15 เคลวิน พบว่าร้อยละการสกัดปรอทไม่ได้เปลี่ยนแปลงจากเดิมมากนัก เมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์มีค่าเป็น 5-7 พบว่าร้อยละการสกัดปรอทเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 308.15 เคลวิน และให้ประสิทธิภาพการสกัดปรอทสูงที่สุดที่ 100 ในช่วงอุณหภูมิ 314.15-323.15 เคลวิน เนื่องจากรูปแบบของปรอทที่แสดงสภาพความเป็นกลาง ไม่มีตัวของ $HgCl_2$ ทำให้สามารถแพร่ผ่านไปที่ผิวภาคของน้ำมันข้าวโพดได้ดี เมื่อให้อุณหภูมิที่สูงขึ้นกับระบบส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนมวลของสารได้ดีขึ้น ทำให้เสริมการสกัดปรอทให้ดียิ่งขึ้นในช่วงความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์นี้ และเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์มีค่ามากกว่า 8 พบว่าเริ่มมีแนวโน้มการสกัดปรอทลดลงในทุกอุณหภูมิ เนื่องจากรูปแบบของปรอทเปลี่ยนเป็น $Hg(OH)_2$ ซึ่งอาจเกิดการตกตะกอนได้ และอาจขัดขวางการสกัดปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์

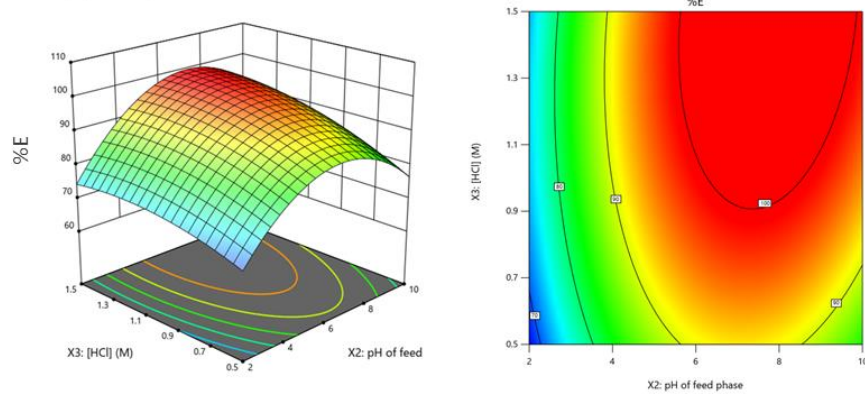
(ก) X1X2



(ข) X1X3



(ค) X2X3

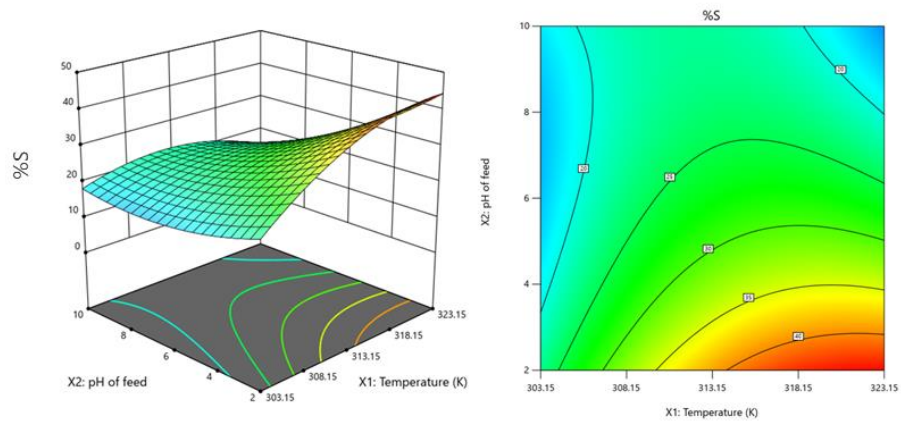


ภาพที่ 4-10 กราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (ก) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (X1X2) (ข) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X1X3) และ (ค) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X2X3) ที่มีผลต่อร้อยละการสกัด

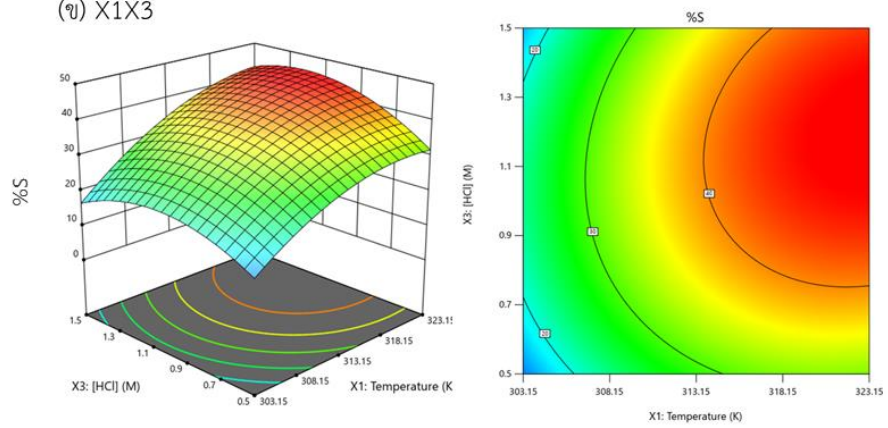
4.2.2.3 ผลของอิทธิพลร่วมสองทางที่ส่งผลต่อร้อยละการนำกลับปรอท

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละการนำกลับปรอท สามารถสร้างพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (3D plot) และแผนภาพเส้นโครงร่าง (contour plot) จากสมการแบบจำลองที่ (4.2) แสดงได้ดังภาพที่ 4-11 (ก) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (X1X2) (ข) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X1X3) และ (ค) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X2X3) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนข้างต้น อิทธิพลร่วมสองปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปัจจัยตอบสนอง ได้แก่ อิทธิพลสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายป้อน (X1X2) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X1X3) เมื่อพิจารณาตามภาพที่ 4-11 (ก) แสดงให้เห็นว่าแสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ต่ำจะทำให้มีร้อยละการนำกลับที่สูง และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะยิ่งเสริมให้มีการนำกลับที่มากขึ้นเนื่องจากการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาคสูงขึ้น เมื่อพิจารณาตามภาพที่ 4-11 (ข) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 303.15-313.15 เคลวิน ร้อยละการนำกลับยังคงให้ประสิทธิภาพที่ต่ำในทุกความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจาก 315.15 เคลวินเป็นต้นไป พบว่าร้อยละการนำกลับเพิ่มสูงขึ้นที่ความเข้มข้นในช่วงประมาณ 0.8-1.5 โมลต่อลิตร เนื่องจากที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในวัฏภาคของน้ำมันข้าวโพดมีการถ่ายโอนมวลไปที่วัฏภาคสารนำกลับได้ดีขึ้น นอกจากนั้นความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นและทำให้สามารถนำกลับปรอทได้เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 40

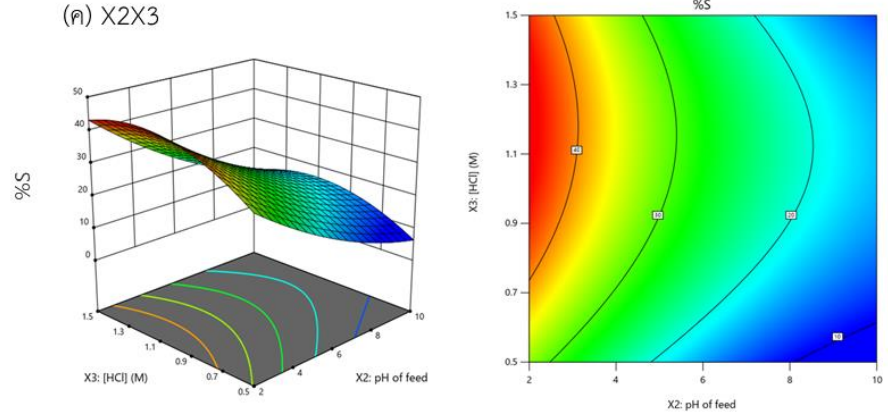
(ก) X1X2



(ข) X1X3



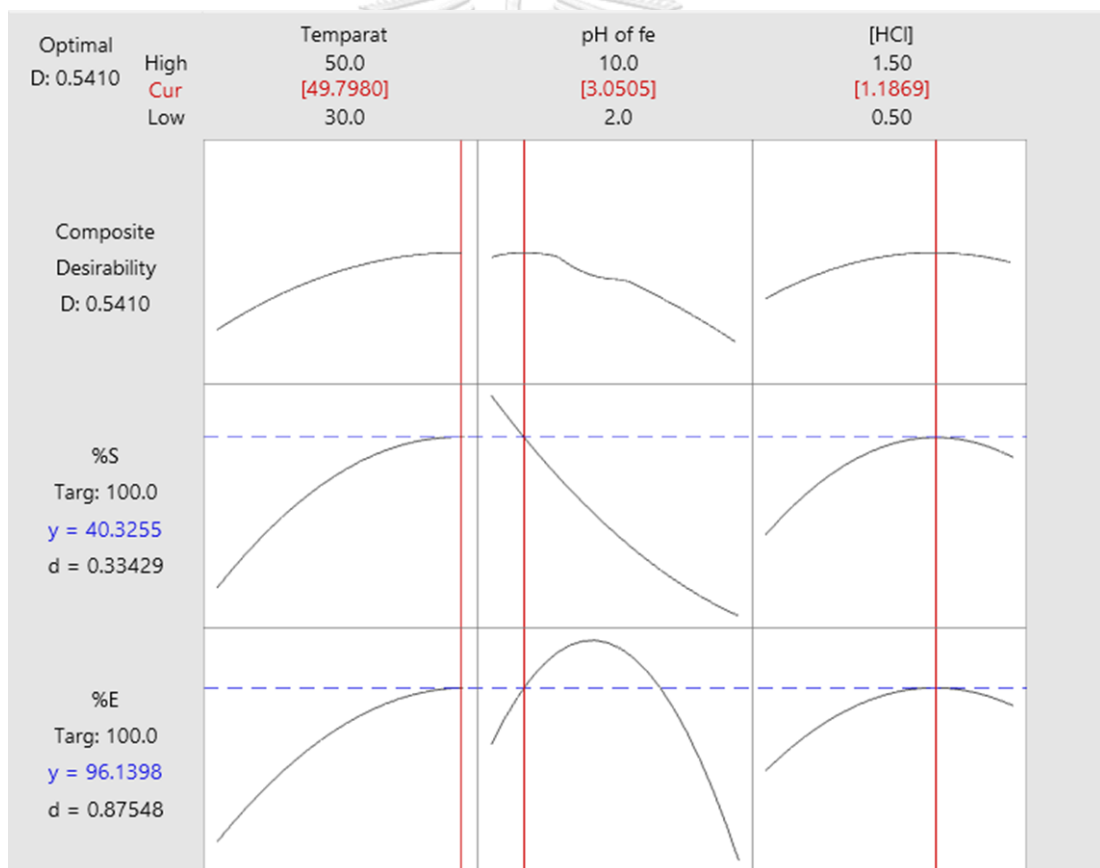
(ค) X2X3



ภาพที่ 4-11 กราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (ก) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ (X1X2) (ข) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X1X3) และ (ค) อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (X2X3) ที่มีผลต่อร้อยละการสกัด

4.2.2.3 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของการสกัดและการนำกลับปรอท

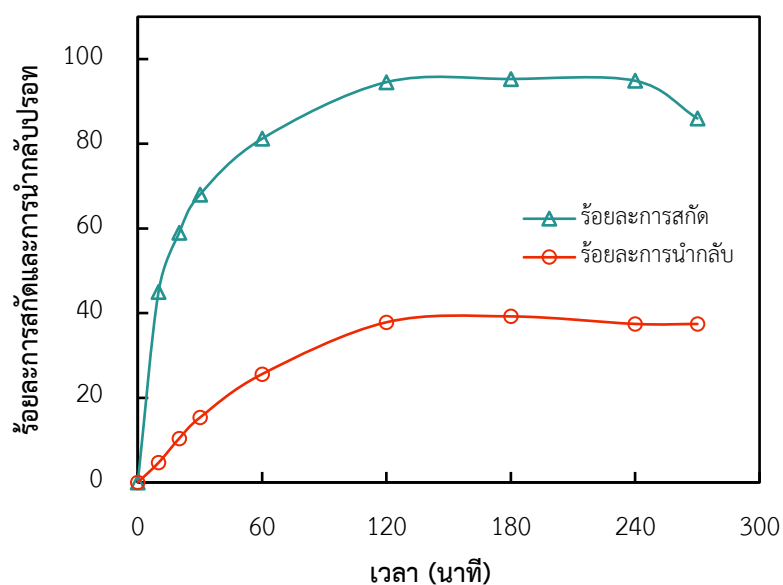
ผลการทำนายค่าที่เหมาะสมที่สุดของการสกัดและนำกลับสามารถวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab จากภาพที่ 4-12 แสดงการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดของการสกัดและนำกลับปรอทเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการสกัดและการนำกลับสูงสุด จากผลการวิเคราะห์พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ 323.15 เคลวิน ค่าความเป็นกรดของน้ำทิ้งสังเคราะห์คือ 3 และค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกคือ 1.2 โมลต่อลิตร จะทำนายผลให้มีร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทที่ 96.14 และ 40.13 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-12 ผลการทำนายค่าร้อยละการสกัดและการนำกลับปรอท รวมทั้งค่าสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร

4.2.5 ผลการศึกษาเวลาในการสกัดและนำกลับปรอท

การทดลองนี้ศึกษาเวลาในการสกัดและนำกลับปรอทที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทที่ต่างกัน โดยสภาวะที่ใช้ได้จากค่าที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดและนำกลับปรอท จากหัวข้อที่ 4.2.2.3 อุณหภูมิใช้ 323.15 เคลวิน ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 3 ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1.2 โมลต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับ มีค่าเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที จากภาพที่ 4-13 ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 0-120 นาที ร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทเพิ่มขึ้นจาก 0-94.56 และเมื่อเวลา 150 นาทีพบว่าร้อยละการสกัดปรอทเข้าสู่สมดุลเนื่องจากร้อยละการสกัดปรอทมีค่าคงที่ แต่ที่เวลามากกว่า 240 นาทีพบว่าร้อยละการสกัดและการนำกลับปรอทลดลง จากการสังเกตพบว่ามีน้ำมันหลุดออกมาทางปลายสายขาออกของฝั่งสารนำกลับ ความเสถียรของน้ำมันข้าวโพดที่ฝังในรูพรุนลดลงอาจเนื่องจากเมื่อเวลาในการปฏิบัติการดำเนินไป ของเหลวทางฝั่งสารละลายป้อนและสารนำกลับมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา และมีแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับน้ำมันข้าวโพดที่ฝังในรูพรุน ส่งผลให้น้ำมันข้าวโพดอาจหลุดออกจากรูพรุนได้ นอกจากนี้การปฏิบัติการที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานยังส่งผลให้น้ำมันข้าวโพดเกิดการรั่วออกได้ง่ายเช่นกัน



ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ของร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทกับอุณหภูมิที่ต่างกัน ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสกัดและนำกลับปรอท

4.2.6 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการสกัดและการนำกลับปรอทด้วยน้ำมันพืช

การคำนวณหาอันดับการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาใช้วิธีการอินทิเกรตสามารถทำได้ด้วยการสร้างกราฟเส้นตรง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนปรอท (แนวแกน y) เทียบกับเวลา (แนวแกน x) ความชันที่ได้จากสมการแต่ละอันดับจะแสดงถึงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 4-6 จากผลการคำนวณพบว่า การสกัดปรอทเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเป็น 0.0262 นาที⁻¹ และการนำกลับปรอทเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 0 มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเป็น 0.0011 มิลลิกรัมต่อลิตรต่ออนาที โดยพิจารณาจากค่า R² ที่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด

ตารางที่ 4-6 ค่าคงที่ปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับที่อันดับการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ

อันดับการเกิดปฏิกิริยา	สมการเส้นตรง	กระบวนการ	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา	หน่วย	R ²
อันดับศูนย์	$(C_{Hg,0} - C_{Hg,t}) \text{ vs } t$	การสกัด	0.0031	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	0.7945
	$C_{Hg,org} - (C_{Hg,org} - C_{Hg,S}) \text{ vs } t$	การนำกลับ	0.0011	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	0.9695
อันดับหนึ่ง	$\ln(C_{Hg,0}/C_{Hg,t}) \text{ vs } t$	การสกัด	0.0262	min^{-1}	0.9682
	$\ln(C_{Hg,org}/C_{Hg,org} - C_{Hg,S}) \text{ vs } t$	การนำกลับ	0.0055	min^{-1}	0.8968
อันดับสอง	$\frac{1}{C_{Hg,t}} - \frac{1}{C_{Hg,0}} \text{ vs } t$	การสกัด	0.4202	$\text{L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	0.9399
	$\frac{1}{C_{Hg,org} - C_{Hg,S}} - \frac{1}{C_{Hg,org}} \text{ vs } t$	การนำกลับ	0.0243	$\text{L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	0.8582

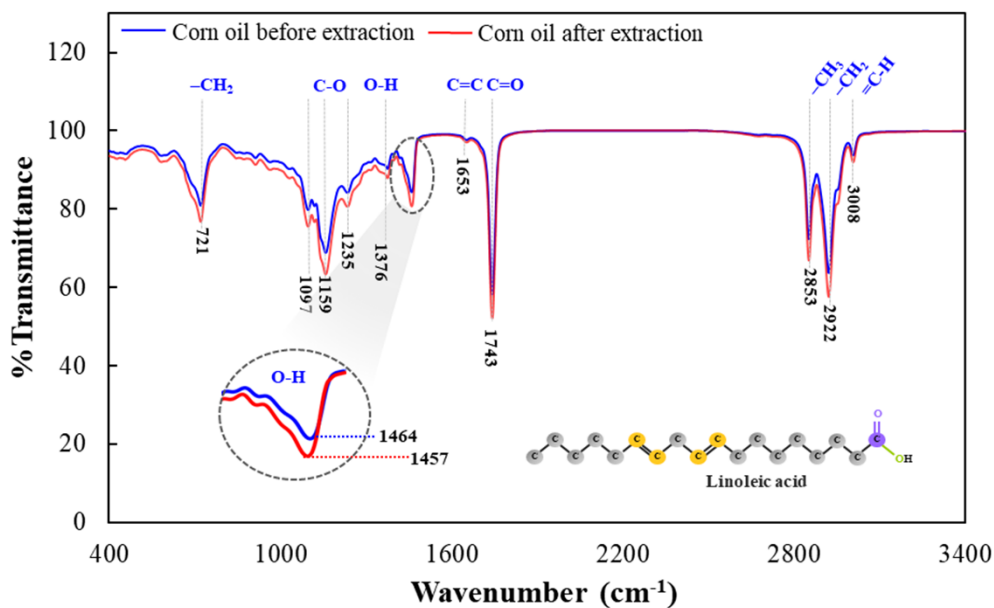
4.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะของสารด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปี

4.3.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

ผลการศึกษาพันธะและหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันข้าวโพดก่อนกระบวนการสกัดปรอทและหลังกระบวนการสกัดปรอท ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี แสดงที่ความยาวคลื่น 400-3400 เซนติเมตร⁻¹ แสดงดังภาพที่ 4-14 พบว่าน้ำมันข้าวโพดก่อนกระบวนการสกัด แสดงค่าความถี่ซึ่งถึงการสั่นแบบยืดและแบบงอของพันธะดังตารางที่ 4-7 แสดงถึงองค์ประกอบที่อยู่ในน้ำมันข้าวโพด ได้แก่ กรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดไขมันอิ่มตัว กรีเซอร์อล และไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันข้าวโพดของ Vlachos และคณะ [83] เมื่อเปรียบเทียบความถี่ของน้ำมันข้าวโพดก่อนกระบวนการสกัดปรอทและหลังกระบวนการสกัดปรอทพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงของความถี่จาก 1464.85 เซนติเมตร⁻¹ เป็น 1457.93 เซนติเมตร⁻¹ [84] อนุมานได้ว่ากลไกการสกัดปรอทเกิดจากพันธะระหว่าง O-H ในหมู่คาร์บอกซิลิกที่อยู่ในกรดไขมัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang และคณะ [85] ศึกษาการแยกเงินด้วยกรดไขมันเกิดการจับปรอทที่ตำแหน่งไฮโดรเจนที่อยู่ในหมู่คาร์บอกซิลิก

ตารางที่ 4-7 ความยาวคลื่นของน้ำมันข้าวโพดก่อนสกัดและหลังสกัดปรอท

ความยาวคลื่นของน้ำมันข้าวโพด (เซนติเมตร ⁻¹)		หมู่ฟังก์ชัน
ก่อนสกัด	หลังสกัด	
3008.28	3008.29	พันธะ =C-H stretching พบในหมู่ alkene ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว
2922.45	2922.45	พันธะ C-H stretching พบในหมู่ alkane (-CH ₂)
2853.06	2853.06	พันธะ C-H stretching พบในหมู่ alkane (-CH ₃)
1743.28	1743.27	พันธะ C=O stretching พบในหมู่ ester ของไตรกลีเซอไรด์
1653.48	1653.40	พันธะ C=C stretching พบในหมู่ alkene aromatic
1464.85	1457.93	พันธะ O-H bending พบในหมู่ carboxylic
1376.34	1376.36	พันธะ C-H bending พบในหมู่ alkane
1235.77	1235.83	พันธะ C-O stretching พบในหมู่ ester
1159.39	1159.39	พันธะ C-O stretching พบในหมู่ ester
1097.54	1097.52	พันธะ C-O stretching พบในหมู่ ester ether

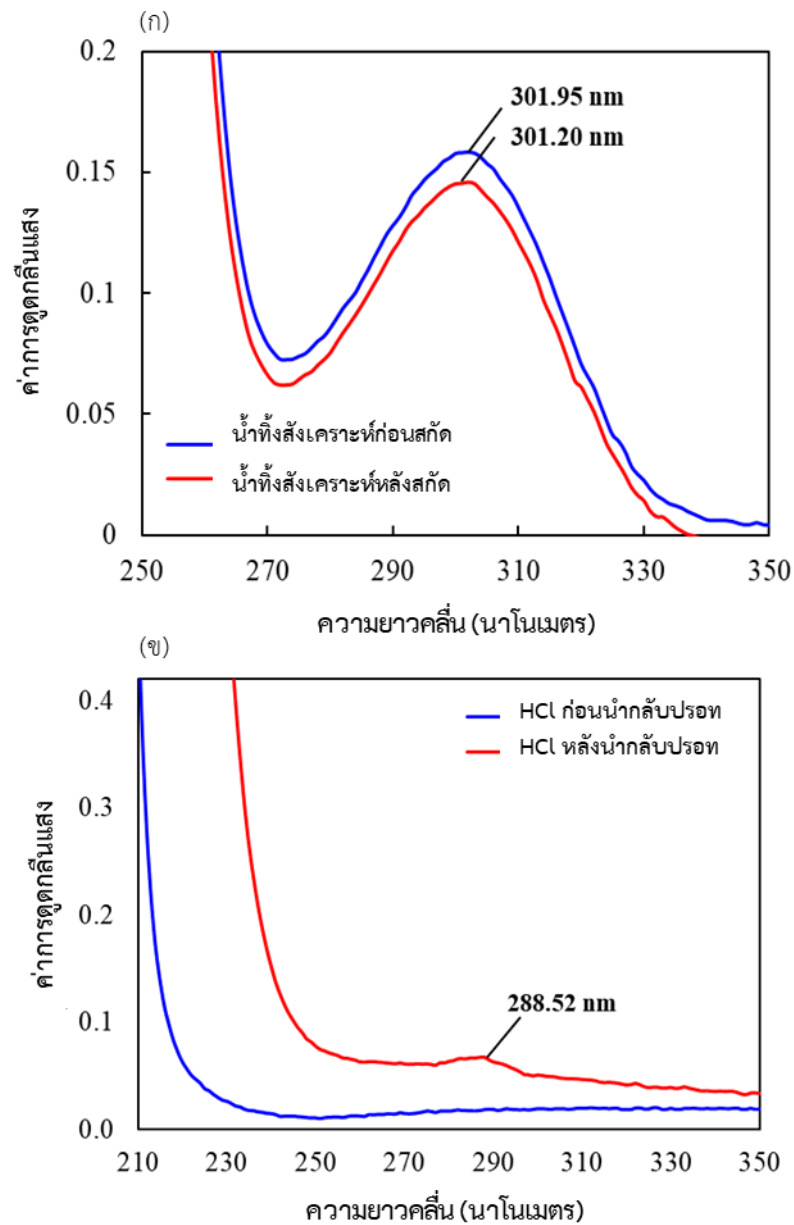


ภาพที่ 4-14 FTIR ของน้ำมันข้าวโพดก่อนและสกัดปรอท

4.3.2 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโคปี

ผลการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของปรอทคลอไรด์ในสารละลายป้อนก่อนกระบวนการสกัดและหลังกระบวนการสกัดปรอทแสดงดังภาพที่ 4-15 (ก) พบว่าเกิดการดูดกลืนแสงของปรอทที่มีความยาวคลื่น 301.95 และ 301.20 นาโนเมตร ตามลำดับ บ่งชี้ว่าเป็นปรอทในรูปแบบของ $HgCl_2$ ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Dash และคณะ [86] เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายป้อนก่อนกระบวนการสกัดและหลังกระบวนการสกัดปรอท พบว่าภายหลังการสกัดปรอทมีค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง แสดงถึงค่าความเข้มข้นของปรอทที่ลดลง เป็นการยืนยันว่าเกิดการสกัดปรอทออกจากสารละลายป้อน [86]

ผลการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของปรอทคลอไรด์ในสารนำกลับก่อนกระบวนการนำกลับและหลังกระบวนการนำกลับปรอทแสดงดังภาพที่ 4-15 (ข) พบว่าไม่พบค่าพีคความยาวคลื่นของสารนำกลับ แต่พบการดูดกลืนแสงของปรอทที่มีความยาวคลื่น 288.52 นาโนเมตร ภายหลังกระบวนการนำกลับปรอท จากงานวิจัยของ Mohdee และคณะ [87] รายงานถึงการยืนยันการนำกลับปรอทเมื่อค่าความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นในสารนำกลับมีค่าเลื่อนเข้าใกล้ค่าความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นในสารละลายป้อน

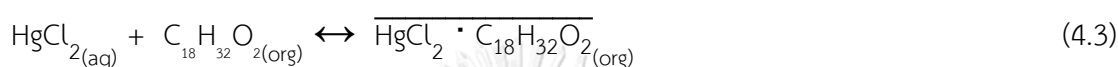


ภาพที่ 4-15 UV-vis ของ (ก) น้ำที่สังเคราะห์ก่อนและหลังสกัดปรอท (ข) กรดไฮโดรคลอริกก่อนและหลังนำกลับ

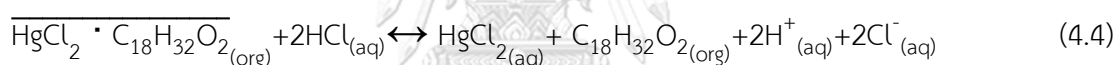
4.4 กลไกการสกัดและนำกลับปรอทจากน้ำที่สังเคราะห์

การแยกปรอทออกจากน้ำที่สังเคราะห์ด้วยน้ำมันข้าวโพด สามารถอนุมานได้ว่าปรอทในน้ำที่สังเคราะห์ที่ทำปฏิกิริยาอยู่ในรูปแบบของเกลือ $HgCl_2$ เกิดขึ้นในช่วงค่าความเป็นกรด-เบสที่สนใจศึกษา เมื่อถูกสกัดด้วยน้ำมันข้าวโพดจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ระหว่าง $HgCl_2$ และกรดไขมันที่

อยู่ในน้ำมันข้าวโพด โดยกรดไลโนเลอิก ($C_{18}H_{32}O_2$) มีปริมาณมากที่สุด (39.5–69.5%) เนื่องจากเมื่อวัดค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำหึ่งก่อนและหลังสกัดพบว่ามีค่าลดลงจาก 6 ลดลงเหลือ 4.37 ในน้ำมันพืชประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ซึ่งมีสัดส่วนมากกว่า 90% เป็นสายโซ่ยาวที่ประกอบด้วยโมเลกุลกลีเซอรอลที่มีกรดไขมันสายยาวสามตัว ซึ่งพบว่าสายโซ่หมู่เอสเทอร์นี้ไม่มีส่วนที่เป็นกรดของไฮโดรเจนไอออน ดังนั้น จึงสันนิษฐานได้ว่าไฮโดรเจนไอออนบางส่วนที่เป็นกรดได้มาจากกรดไขมันอิสระซึ่งส่วนประกอบในน้ำมันพืช เขียนสมการปฏิกิริยาการสกัดและนำกลับได้ดังสมการที่ (4.3)



ปฏิกิริยาการนำกลับของสารประกอบเชิงซ้อนของปรอทสามารถเสนอโดยกรดไฮโดรคลอริกสองโมล [41, 42] จากนั้นโปรตอนสองตัวจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนของปรอทกับกรดไลโนเลอิกส่งผลให้พันธะฮาโลเจนแตกออก ปฏิกิริยาของการนำกลับปรอทแสดงได้ ดังสมการที่ (4.4)



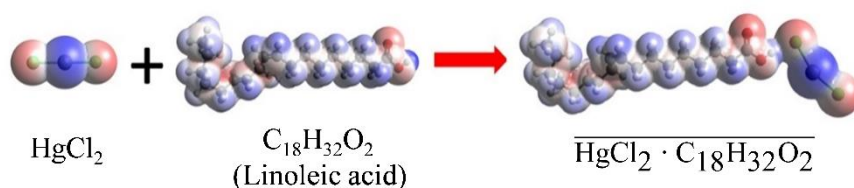
โดยที่ (aq) คือวัฏภาคสารละลาย และ (org) คือวัฏภาคอินทรีย์

4.4.1 ผลการคำนวณทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น

ในงานวิจัยนี้นำเสนอกลไกการสกัดปรอทที่เป็นไปได้จากการวิเคราะห์สเปกโตรสโคปีซึ่งเป็นผลจากการทดลองร่วมกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายผลด้วยทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นซึ่งเป็นผลทางทฤษฎี ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่น มีส่วนสำคัญในการทำนายโครงสร้างทางเคมีของการเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งอธิบายธรรมชาติของสารเชิงซ้อนและการจับตัวกันได้ โดยศึกษาที่ระดับ B3LYP/LANL2DZ เหมาะสมกับการคำนวณเกี่ยวกับผลกระทบของตัวทำละลาย

จากภาพที่ 4-16 แสดงกลไกการสกัดปรอทด้วยน้ำมันข้าวโพดที่ประกอบด้วยกรดไลโนเลอิกเป็นส่วนสำคัญ พิจารณาที่กรดไลโนเลอิกแสดงประจุลบ (สีแดง) ที่ตำแหน่งของออกซิเจน

และแสดงประจวบ (สีน้ำเงิน) ที่ตำแหน่งของไฮโดรเจน และพิจารณาที่ HgCl_2 พบว่าแสดงประจวบ (สีน้ำเงิน) ที่ตำแหน่งของปรอท และแสดงประจวบ (สีแดง) ที่ตำแหน่งของคลอไรด์ เมื่อกรดไลโนเลอิกทำปฏิกิริยากับปรอทในน้ำที่สังเคราะห์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่วัฏภาคของสารอินทรีย์หรือน้ำมันข้าวโพด จะเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างประจวบของไฮโดรเจนที่หมู่คาร์บอกซิลิกในกรดไขมันและคลอไรด์ที่เป็นประจวบ ด้วยพันธะฮาโลเจน (Halogen bond) คำนวณระยะห่างของพันธะได้ (Bond distance) 2.13 Å ซึ่งความยาวพันธะมีสัดส่วนผกผันกับค่าพลังงานพันธะ (Bond energy) [88] หากความยาวพันธะสั้นแสดงถึงพลังงานพันธะที่สูงขึ้น หมายความว่าต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการทำให้โมเลกุลแตกตัว ในงานวิจัยนี้ความยาวของพันธะระหว่าง HgCl_2 และกรดไขมัน (2.13 Å) นั้นสั้นกว่าผลรวมของรัศมี Van der Waals ของสองอะตอม (3.0 Å) ซึ่งเกิดอันตรกิริยาระหว่างไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole interactions) [89] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีที่เกิดการสกัดปรอทที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอกซิลิกในน้ำมันข้าวโพด ค่าทางทฤษฎีที่คำนวณได้จาก DFT พบว่าค่าเอนทาลปี -23.71 กิโลจูลต่อโมล และค่าพลังงานอิสระของกิบส์ 24.38 กิโลจูลต่อโมล จากผลการคำนวณอนุมานได้ว่าปฏิกิริยาการสกัดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามลำดับ



ภาพที่ 4-16 กลไกการสกัดสารปรอทด้วยกรดไลโนเลอิกตามทฤษฎีระดับ B3LYP/LANL2DZ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การแยกปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยน้ำมันพืชผ่านวิธีการสกัดและนำกลับด้วยระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การหาทางเลือกใหม่ในการสกัดปรอทด้วยสารสกัดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ น้ำมันข้าวโพดให้ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทสูงสุดที่ร้อยละ 99.4 เหลือความเข้มข้นของปรอทในน้ำทิ้งสังเคราะห์ 0.0018 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (<0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร)
2. อัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์มีผลต่อร้อยละการสกัด เมื่ออัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์น้อยลงส่งผลให้ร้อยละการสกัดลดลง โดยการสกัดปรอทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่อัตราอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 1 ให้ประสิทธิภาพการสกัดสูงสุด
3. น้ำมันข้าวโพดเป็นสารสกัดที่ใช้คัดเลือกปรอทออกจากโลหะตัวอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ
4. การใช้สารนำกลับที่อยู่ในสภาวะเป็นกรดสามารถนำกลับปรอทออกจากน้ำมันข้าวโพดได้ดีที่สุด ซึ่งกรดไฮโดรคลอริกให้ประสิทธิภาพการนำกลับปรอทได้ดีที่สุด
5. ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สามารถนำกลับปรอทได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีไฮโดรเจนไอออนเพิ่มสูงขึ้น โดยการนำกลับปรอทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมากกว่า 2 โมลต่อลิตรจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด
6. อุณหภูมิส่งผลสำคัญต่อการสกัดและการนำกลับปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทสูงขึ้นเช่นกัน ในงานวิจัยนี้ อุณหภูมิที่ 323.15 เคลวินเหมาะสมในการสกัดและนำกลับปรอทด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมากที่สุด เนื่องจากข้อจำกัดของเส้นใยกลวงอาจเกิดความเสียหายที่อุณหภูมิสูง
7. อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับส่งผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับปรอทไม่มากนัก ในงานวิจัยนี้อัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารนำกลับที่ให้ประสิทธิภาพได้ดีที่สุดคือ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

8. ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์มีผลต่อร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ทำให้ได้ร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทสูงที่สุด คือ 6 และ 2 ตามลำดับ

9. ผลของอิทธิพลร่วมสองทางที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทโดยใช้การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ได้แก่ อิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ และอิทธิพลร่วมสองปัจจัยของอุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกตามลำดับ

10. ค่าที่เหมาะสมที่สุดของการสกัดและการนำกลับปรอทโดยใช้การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนคือ อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 3 และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1.2 โมลต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการสกัดและนำกลับปรอท 96.14 และ 40.13 ตามลำดับ

12. การสกัดและนำกลับปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์โดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงใช้เวลา 150 นาที เสถียรภาพของเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 240 นาที

13. การสกัดปรอทเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเป็น 0.0262 นาที^{-1} และการนำกลับปรอทเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 0 มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเป็น $0.0011 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที}$

14. กลไกการสกัดปรอทออกจากน้ำทิ้งสังเคราะห์พบว่าเกิดจากพันธะฮาโลเจนของคลอไรด์ไอออนในรูปแบบปรอท HgCl_2 จับกับไฮโดรเจนไอออนในโมเลกุลของกรดไขมัน จากทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นสามารถคำนวณค่าพลังงานเอนทาลปีและพลังงานของกิ๊บส์ที่ $-23.71 \text{ กิโลจูลต่อโมล}$ และ $24.38 \text{ กิโลจูลต่อโมล}$ ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ส่งผลต่อร้อยละการสกัดและการนำกลับปรอท พบว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์อาจมีค่าไม่

คงที่เมื่ออยู่ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง ดังนั้นการควบคุมค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

2. ในงานวิจัยนี้พบว่าการนำกลับปรอทด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกทำให้ได้ร้อยละการนำกลับที่สูง แต่เมื่อใช้ในเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงพบว่าร้อยละการนำกลับค่อนข้างน้อย ดังนั้นชนิดของสารนำกลับมีผลในการนำกลับปรอทออกจากสารประกอบเชิงซ้อนอย่างมาก ควรมีการเลือกสารนำกลับเพิ่มเติมเพื่อให้ได้มาซึ่งร้อยละการนำกลับปรอทที่สูง

3. การสกัดหรือการนำกลับไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงมีข้อจำกัดกับสารที่ป้อนเข้าในเส้นใยกลวง คือ ไม่ควรมีสิ่งสกปรกปนมาหรือไม่ควรมีตะกอน เนื่องจากอาจอุดตันภายในเส้นใยกลวงได้ ดังนั้นก่อนถึงกระบวนการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงควรมีการกำจัดสิ่งสกปรกหรือตะกอนนั้นออกก่อน

4. การใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจะปฏิบัติการได้ดีในสถานะที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะต่ำ ๆ ดังนั้นการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงจึงเหมาะสมที่จะเป็นหน่วยปฏิบัติการหลังจากที่ได้มีการกำจัดให้มีความเข้มข้นต่ำแล้ว

5. ศึกษาการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเพิ่มเติม เช่น ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาการสกัดปรอทด้วยน้ำมันข้าวโพด ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน เพื่อสามารถนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มขนาดต่อไป

6. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับจำนวนรอบของการนำน้ำมันพืชที่ผ่านกระบวนการสกัดแล้วกลับมาใช้ใหม่เพื่อศึกษาร้อยละการสกัดที่เปลี่ยนแปลงไป

7. ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงอาจมีน้ำมันหลุดออกจากระบบเมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัดและนำกลับที่นาน หรือใช้อัตราการไหลที่สูง ควรมีการวัดปริมาณของน้ำมันด้วยเทคนิค TOC เพื่อแสดงถึงข้อมูลทางด้านปริมาณ

8. ควรระมัดระวังในการควบคุมอุณหภูมิในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงเพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิที่ควบคุมเป็นไปตามอุณหภูมิที่ต้องการทดลอง ไม่ได้เกิดการลดลงระหว่างที่สารเคลื่อนที่ไประหว่างสายป้อนและสายนำกลับ

บรรณานุกรม

1. Gump, B.B., et al., *Background lead and mercury exposures: Psychological and behavioral problems in children*. Environmental Research, 2017. **158**: p. 576-582.
2. 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.
3. Mandal, P.C. and A.F.R.B. Esa, *Mercury Removal From Produced Water Using Subcritical Water Assisted 1-Etyl-3-Methylimidazolium Chloride Ionic Liquid*. Journal of Chemical Engineering, 2017. **30**(1): p. 12-15.
4. Munirasu, S., M.A. Haija, and F. Banat, *Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment—A review*. Process Safety and Environmental Protection, 2016. **100**: p. 183-202.
5. Chaturabul, S., et al., *Mass transfer resistance of simultaneous extraction and stripping of mercury (II) from petroleum produced water via HFSLM*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. **21**: p. 1020-1028.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. Savanayana, U., *Notification of Ministry of Industry Industrial Effluent Standards*, M.o. Industry, Editor. 2017. p. 1-5.
10. Pancharoen, U., et al., *Selective removal of mercury as HgCl₂ from natural gas well produced water by TOA via HFSLM*. Journal of Alloys and Compounds, 2010. **489**(1): p. 72-79.
11. Rajamohan, N. and M. Rajasimman, *Parametric, equilibrium and kinetic studies on the removal of mercury using ion exchange resin*. Water Practice and Technology, 2017. **12**(2): p. 305-313.
12. Pohl, A., *Removal of heavy metal ions from water and wastewaters by sulfur-containing precipitation agents*. Water, Air, & Soil Pollution, 2020. **231**(10): p. 1-17.
13. Naushad, M., et al., *Green and eco-friendly nanocomposite for the removal of toxic Hg (II) metal ion from aqueous environment: adsorption kinetics & isotherm modelling*. Journal of Molecular Liquids, 2019. **279**: p. 1-8.
14. Qu, Z., et al., *Ultraeffective ZnS nanocrystals sorbent for mercury (II) removal based on size-dependent cation exchange*. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014. **6**(20): p. 18026-18032.
15. Alvarez, N.M.M., et al., *Evaluation of mercury (Hg²⁺) adsorption capacity using exhausted coffee waste*. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2018. **10**: p. 60-70.
16. Klemz, A.C., et al., *Oilfield produced water treatment by liquid-liquid extraction: A review*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021. **199**: p. 108282.
17. Berk, Z., *Chapter 11 – Extraction*, in *Food Process Engineering and Technology*, Z. Berk, Editor. 2009, Academic Press: San Diego. p. 259-277.

18. Virolainen, S., et al., *Solvent extraction fractionation of Li-ion battery leachate containing Li, Ni, and Co*. Separation and Purification Technology, 2017. **179**: p. 274-282.
19. Torkaman, R., et al., *Recovery of cobalt from spent lithium ion batteries by using acidic and basic extractants in solvent extraction process*. Separation and Purification Technology, 2017. **186**: p. 318-325.
20. Yoshida, W. and M. Goto, *Ternary extractant system consisting of PC-88A, TOPO, and Versatic 10 for recovery of scandium (III) from nickel laterite processing liquors*. Hydrometallurgy, 2023. **217**: p. 106024.
21. Salman, H.M. and A.A. Mohammed, *Extraction of lead ions from aqueous solution by co-stabilization mechanisms of magnetic Fe₂O₃ particles and nonionic surfactants in emulsion liquid membrane*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019. **568**: p. 301-310.
22. Othman, N., S. Zailani, and N. Mili, *Recovery of synthetic dye from simulated wastewater using emulsion liquid membrane process containing tri-dodecyl amine as a mobile carrier*. Journal of Hazardous Materials, 2011. **198**: p. 103-112.
23. Wongkaew, K., et al., *Separation of platinum (IV) across hollow fiber supported liquid membrane using non-toxic diluents: Mass transfer and thermodynamics*. Journal of industrial and engineering chemistry, 2017. **54**: p. 278-289.
24. Yara-Varón, E., et al., *Vegetable oils as alternative solvents for green oleo-extraction, purification and formulation of food and natural products*. Molecules, 2017. **22**(9): p. 1474.
25. Wongsawa, T., et al., *New and green extraction of mercury (I) by pure sunflower oil: Mechanism, kinetics and thermodynamics*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2021. **122**: p. 40-50.

26. Gaffney, J.S. and N. Marley, *In-depth review of atmospheric mercury: sources, transformations, and potential sinks*. Energy and Emission Control Technologies, 2014. **2**: p. 1-21.
27. 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.
28. Pintor, A.M., et al., *Oil and grease removal from wastewaters: sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies. A critical review*. Chemical Engineering Journal, 2016. **297**: p. 229-255.
29. Li, Q., T. Liu, and P. Deng, *Recovery of mercury and lead from wastewater by sulfide precipitation-flotation*, in *Characterization of minerals, metals, and materials 2015*. 2015, Springer. p. 667-674.
30. Hua, K., et al., *Effective removal of mercury ions in aqueous solutions: A review*. Current Nanoscience, 2020. **16**(3): p. 363-375.
31. Ariffin, N., et al. *Review on adsorption of heavy metal in wastewater by using geopolymer*. in *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
32. Fabrega, F., et al., *Solvent extraction of mercury (II) from aqueous chloride solutions using Cyanex 302*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2017. **126**(4): p. 193-198.
33. Lothongkum, A.W., et al., *Selective recovery of nickel ions from wastewater of stainless steel industry via HFSLM*. Journal of Alloys and Compounds, 2009. **476**(1-2): p. 940-949.
34. 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.

35. 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.
36. Sunsandee, N., S. Phatanasri, and U. Pancharoen, *Separation of homogeneous palladium catalysts from pharmaceutical industry wastewater by using synergistic recovery phase via HFSLM system*. Arabian Journal of Chemistry, 2021. **14**(4): p. 103024.
37. Mohdee, V., et al., *Applicability of HFSLM for Nd (III) recovery via organophosphorus carrier: A conceptual DFT approach towards structural chemistry, mechanistic investigation and transport behavior*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2023: p. 1-14.
38. Güell, R., et al., *Efficient hollow fiber supported liquid membrane system for the removal and preconcentration of Cr (VI) at trace levels*. Separation and Purification Technology, 2008. **62**(2): p. 389-393.
39. 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. 1-16.
40. Ni'am, A.C., et al., *Simultaneous recovery of rare earth elements from waste permanent magnets (WPMs) leach liquor by solvent extraction and hollow fiber supported liquid membrane*. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2020. **148**: p. 107831.
41. Srirachat, W., et al., *Selective separation of trace nickel (II) and gold (I) ions via hollow fiber supported liquid membrane enhanced by synergistic extractants D2EHPA/TBP*. Arabian Journal of Chemistry, 2021. **14**(12): p. 103427.

42. 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.
43. Information, N.C.f.B. *PubChem Annotation Record for LINSEED OIL, Source: Hazardous Substances Data Bank (HSDB)*. 2004 [cited 2021 17 December]; Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/source/hsdb/5155>.
44. Sahasrabudhe, S.N., et al., *Density, viscosity, and surface tension of five vegetable oils at elevated temperatures: Measurement and modeling*. International Journal of Food Properties, 2017. **20**(sup2): p. 1965-1981.
45. Karthik, M., M.W. Iruthayarajan, and M. Bakrutheen. *Investigation of vegetable oil blended with antioxidant*. in *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. 2015. IEEE.
46. Goyal, A., et al., *Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food*. Journal of food science and technology, 2014. **51**(9): p. 1633-1653.
47. Batista, A., et al., *Production and physicochemical characterization of methyl and ethyl biodiesel from canola oil/obtenção e caracterização do biodiesel de canola pelas rotas metílica e etílica*. Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas, 2014. **8**(4): p. 289-298.
48. Zlatanić, A., et al., *Effect of structure on properties of polyols and polyurethanes based on different vegetable oils*. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2004. **42**(5): p. 809-819.
49. White, P.J., L.M. Pollak, and S. Duvick, *Improving the fatty acid composition of corn oil by using germplasm introgression*. Lipid Technology, 2007. **19**(2): p. 35-38.

50. Chakrabarty, K., P. Saha, and A.K. Ghoshal, *Separation of mercury from its aqueous solution through supported liquid membrane using environmentally benign diluent*. Journal of Membrane Science, 2010. **350**(1-2): p. 395-401.
51. Björkegren, S., et al., *A new emulsion liquid membrane based on a palm oil for the extraction of heavy metals*. Membranes, 2015. **5**(2): p. 168-179.
52. Kumar, A., A. Thakur, and P.S. Panesar, *Extraction of hexavalent chromium by environmentally benign green emulsion liquid membrane using tridodecylamine as an extractant*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019. **70**: p. 394-401.
53. Zereski, S., A. Shokri, and A. Karimi, *Application of a green emulsion liquid membrane for removing copper from contaminated aqueous solution: Extraction, stability, and breakage study using response surface methodology*. Journal of Molecular Liquids, 2021. **325**: p. 115251.
54. Noah, N.F.M., et al., *Development of stable green emulsion liquid membrane process via liquid-liquid extraction to treat real chromium from rinse electroplating wastewater*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2018. **66**: p. 231-241.
55. Bhatluri, K.K., et al., *Separation of toxic heavy metals from its aqueous solution using environmentally benign vegetable oil as liquid membrane*. RSC advances, 2015. **5**(107): p. 88331-88338.
56. Chang, S.H., *Utilization of green organic solvents in solvent extraction and liquid membrane for sustainable wastewater treatment and resource recovery—A review*. Environmental Science and Pollution Research, 2020. **27**(26): p. 32371-32388.
57. De Oliveira, L.G., et al., *Response surface methodology for advanced manufacturing technology optimization: theoretical fundamentals, practical*

- guidelines, and survey literature review*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **104**: p. 1785-1837.
58. Witek-Krowiak, A., et al., *Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process*. Bioresource technology, 2014. **160**: p. 150-160.
59. Aydar, A.Y., *Utilization of response surface methodology in optimization of extraction of plant materials*. Statistical approaches with emphasis on design of experiments applied to chemical processes, 2018: p. 157-169.
60. Sujatha, S., et al., *Conversion of waste cooking oil into value-added emulsion liquid membrane for enhanced extraction of lead: Performance evaluation and optimization*. Chemosphere, 2021. **284**: p. 131385.
61. Koonsang, T., et al., *The mutual solubility of organic-liquid membrane and aqueous phases at different water pH for the stability of SLM using Aliquat 336 as an ionic-liquid extractant*. Journal of Molecular Liquids, 2019. **292**: p. 111363.
62. Afolabi, F.O., P. Musonge, and B.F. Bakare, *Application of the response surface methodology in the removal of Cu²⁺ and Pb²⁺ from aqueous solutions using orange peels*. Scientific African, 2021. **13**: p. e00931.
63. Mahmoudiani, F., et al., *Application of response surface methodology for modeling and optimization of the extraction and separation of Se (IV) and Te (IV) from nitric acid solution by Cyanex 301 extractant*. Progress in Nuclear Energy, 2022. **143**: p. 104052.
64. Kavisri, M., et al., *Adsorption isotherm, kinetics and response surface methodology optimization of cadmium (Cd) removal from aqueous solution by chitosan biopolymers from cephalopod waste*. Journal of Environmental Management, 2023. **335**: p. 117484.

65. ศักดิ์เปลื้องผล, ป., ทฤษฎี ฟังก์ชัน น อ ล ความ หนาแน่น กับ การ ศึกษา โครงสร้าง ของ สารควบแน่น. Thai Science and Technology Journal, 2014: p. 137-145.
66. Palafox, M.A., *DFT computations on vibrational spectra: Scaling procedures to improve the wavenumbers*. Physical Sciences Reviews, 2018. **3**(6).
67. Gujar, R.B., et al., *Sequestration of Np⁴⁺ and NpO₂²⁺ ions by using diglycolamide-functionalized aza-crown ethers in C8mim· NTf₂ ionic liquid: Extraction, spectroscopic, electrochemical and DFT studies*. Journal of Molecular Liquids, 2022: p. 120872.
68. Ansari, S.A., et al., *Unusual extraction of trivalent f-cations using diglycolamide dendrimers in a room temperature ionic liquid: extraction, spectroscopic and DFT studies*. Dalton transactions, 2017. **46**(47): p. 16541-16550.
69. Biswas, S., P. Roy, and T.K. Mondal, *Synthesis of palladium (II) complex with NNS donor Schiff base ligand via CS bond cleavage: X-ray structure, electrochemistry and DFT computation*. Journal of Molecular Structure, 2017. **1142**: p. 110-115.
70. Coterillo, R., et al., *Selective extraction of lithium from seawater desalination concentrates: Study of thermodynamic and equilibrium properties using Density Functional Theory (DFT)*. Desalination, 2022. **532**: p. 115704.
71. Prathibha, T., et al., *Selective removal of Zr (IV) from simulated High-Level liquid waste of metallic fuel reprocessing using hydroxyacetamide Extractant: Insights from solvent extraction and density functional theory computations*. Polyhedron, 2021. **208**: p. 115410.
72. Xing, L., et al., *Selective separation of Nd from La/Ce/Pr using phosphate-based ionic liquids: Solvent extraction studies and density functional theory*. Minerals Engineering, 2023. **191**: p. 107967.

73. Wannachod, T., et al., *Optimization of synergistic extraction of neodymium ions from monazite leach solution treatment via HFSLM using response surface methodology*. minerals Engineering, 2015. **77**: p. 1-9.
74. Wahab, A.A.A., S. Chang, and A. Som. *Characterization of waste cooking oil as a potential green solvent for liquid-liquid extraction*. in *International Conference on Advances in Civil and Environmental Engineering*. 2015.
75. Glyk, A., T. Scheper, and S. Beutel, *PEG-salt aqueous two-phase systems: an attractive and versatile liquid-liquid extraction technology for the downstream processing of proteins and enzymes*. Applied microbiology and biotechnology, 2015. **99**(16): p. 6599-6616.
76. Bol, P., et al., *The Kinetics of Phase Separation in Liquid-Liquid Extraction: Modeling of Droplet Swarm Coalescence*. Chemie Ingenieur Technik, 2021. **93**(10): p. 1502-1508.
77. Sengupta, B., M.S. Bhakhar, and R. Sengupta, *Extraction of copper from ammoniacal solutions into emulsion liquid membranes using LIX 84 I®*. Hydrometallurgy, 2007. **89**(3-4): p. 311-318.
78. Kaplanow, I., et al., *Mass transfer of proteins in aqueous two-phase systems*. Scientific reports, 2019. **9**(1): p. 1-6.
79. El-Ashtoukhy, E.-S. and Y. Fouad, *Liquid-liquid extraction of methylene blue dye from aqueous solutions using sodium dodecylbenzenesulfonate as an extractant*. Alexandria Engineering Journal, 2015. **54**(1): p. 77-81.
80. Ren, Z., et al., *New liquid membrane technology for simultaneous extraction and stripping of copper (II) from wastewater*. Chemical Engineering Science, 2007. **62**(22): p. 6090-6101.

81. Hahne, H. and W. Kroontje, *The simultaneous effect of pH and chloride concentrations upon mercury (II) as a pollutant*. Soil Science Society of America Journal, 1973. **37**(6): p. 838-843.
82. Chang, S.H., T.T. Teng, and N. Ismail, *Extraction of Cu (II) from aqueous solutions by vegetable oil-based organic solvents*. Journal of Hazardous Materials, 2010. **181**(1-3): p. 868-872.
83. Vlachos, N., et al., *Applications of Fourier transform-infrared spectroscopy to edible oils*. Analytica chimica acta, 2006. **573**: p. 459-465.
84. 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.
85. Chang, S.H. and A.O.A. Jampang, *Green extraction of gold (III) and copper (II) from chloride media by palm kernel fatty acid distillate*. Journal of Water Process Engineering, 2021. **43**: p. 102298.
86. Dash, H.R. and S. Das, *Interaction between mercuric chloride and extracellular polymers of biofilm-forming mercury resistant marine bacterium Bacillus thuringiensis PW-05*. RSC advances, 2016. **6**(111): p. 109793-109802.
87. 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.
88. Rittirum, M., B. Jongsomjit, and S. Praserttham, *A computational-experimental investigation on high ethylene selectivity in ethanol dehydration reaction found on WO_x/ZrO₂-activated carbon bi-support systems*. Scientific reports, 2019. **9**(1): p. 1-9.

89. Batsanov, S.S., *Van der Waals radii of elements*. Inorganic materials, 2001. **37**(9): p. 871-885.



ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในน้ำทิ้งสังเคราะห์ภายหลังการสกัด และร้อยละการสกัดปรอทด้วยชนิดของน้ำมันพืชที่แตกต่างกันด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

น้ำมันพืช	ความเข้มข้นปรอทหลังการสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการสกัดปรอท
น้ำมันลินสีด	0.083	72.33
น้ำมันคาโนลา	0.054	82.00
น้ำมันข้าวโพด	0.002	99.33

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 6 อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 400 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 1

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทในน้ำทิ้งสังเคราะห์ภายหลังการสกัด และร้อยละการสกัดปรอทด้วยอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกันด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

อัตราส่วนของน้ำมันพืช ต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์	ความเข้มข้นปรอทหลังการ สกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการสกัดปรอท
0.15	0.124	58.67
0.25	0.099	66.77
0.5	0.054	82.12
0.75	0.014	95.43
1.0	0.001	99.70

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เลือกใช้น้ำมันข้าวโพดเป็นสารสกัด ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 6 อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกวน 400 รอบต่อนาที

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลความเข้มข้นของไอออนโลหะในน้ำทิ้งสังเคราะห์ภายหลังการสกัด และร้อยละการไอออนโลหะด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ไอออนโลหะ	ความเข้มข้นไอออน	ความเข้มข้นไอออน	ร้อยละการสกัด ไอออนโลหะ
	โลหะก่อนการสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	โลหะหลังการสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
ปรอท	0.3	0.001	99.60
สารหนู	4.0	2.795	30.12
แคลเซียม	15.2	13.022	14.33
เหล็ก	0.2	0.187	11.37
แมกนีเซียม	2.0	1.9996	0.02

สภาวะที่ใช้ทดลอง : สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 6 อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกวน 400 รอบต่อนาที

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลความเข้มข้นของปรอทภายหลังการนำกลับ และร้อยละการนำกลับปรอทด้วยชนิดของสารนำกลับที่แตกต่างกันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

สารนำกลับ	ความเข้มข้นปรอทหลังการ นำกลับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการนำกลับปรอท
กรดไนตริก	0.003	1.06
ไทโอยูเรีย	0.013	4.65
โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.035	10.09
กรดซัลฟิวริก	0.147	42.58
กรดไฮโดรคลอริก	0.242	74.38

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 6 อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกวน 400 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของสารนำกลับต่อน้ำมันพืชเป็น 1 ความเข้มข้นของสารนำกลับเป็น 1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทภายหลังการนำกลับ และร้อยละการนำกลับปรอทด้วยความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกันโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ความเข้มข้นของสารละลาย กรดไฮโดรคลอริก (โมลต่อลิตร)	ความเข้มข้นปรอทหลังการ นำกลับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการนำกลับปรอท
0.5	0.184	60.84
1	0.218	73.88
2	0.274	91.225
3	0.275	91.585
4	0.270	91.78

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 6 อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกวน 400 รอบต่อนาที สารนำกลับคือกรดไฮโดรคลอริก และอัตราส่วนของสารนำกลับต่อน้ำมันพืชเป็น 1

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความเข้มข้นปรอท หลังการสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นปรอท หลังการนำกลับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการสกัด ปรอท	ร้อยละการ นำกลับปรอท
303.15	0.095	0.038	68.32	12.67
308.15	0.056	0.052	81.44	17.33
313.15	0.029	0.071	90.32	23.33
318.15	0.010	0.073	96.78	24.33
323.15	0.004	0.079	98.56	26.33

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 6 สารนำกลับคือกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์และกรดไฮโดรคลอริกเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทด้วยอัตราการไหลที่แตกต่างกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นปรอท หลังการสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นปรอท หลังการนำกลับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการ สกัดปรอท	ร้อยละการ นำกลับ ปรอท
100	0.004	0.079	98.56	26.19
200	0.011	0.068	96.43	22.67
300	0.023	0.062	92.33	20.50
400	0.047	0.052	84.32	17.40

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 6 สารนำกลับคือกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทด้วยค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่แตกต่างกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

ค่าความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์	ความเข้มข้นปรอทหลังการสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นปรอทหลังการนำกลับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการสกัดปรอท	ร้อยละการนำกลับปรอท
2	0.061	0.134	79.53	44.64
4	0.013	0.099	95.66	32.88
6	0.003	0.081	98.96	27.14
8	0.016	0.053	94.80	17.50
10	0.044	0.047	85.40	15.77

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด สารนำกลับคือกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์และกรดไฮโดรคลอริกเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัดและนำกลับปรอทโดยใช้การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ลำดับ การ ทดลอง	สภาวะการทดลอง			ความเข้มข้น	ความเข้มข้นปรอท	ร้อยละ	ร้อยละการ
	X1	X2	X3	ปรอทหลังการ สกัด (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	หลังการนำกลับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การ สกัด	นำกลับ
1	303.15	2	1	0.098	0.063	67.3	21.0
2	323.15	2	1	0.075	0.134	75.1	44.6
3	303.15	10	1	0.086	0.055	71.3	18.4
4	323.15	10	1	0.015	0.053	95.0	17.5
5	303.15	6	0.5	0.064	0.033	78.7	11.0
6	323.15	6	0.5	0.032	0.043	89.3	14.4
7	303.15	6	1.5	0.033	0.031	89.0	10.4
8	323.15	6	1.5	0.002	0.069	99.3	23.0
9	313.15	2	0.5	0.096	0.090	68.0	30.1
10	313.15	10	0.5	0.060	0.040	80.1	13.3
11	313.15	2	1.5	0.078	0.110	74.0	36.8
12	313.15	10	1.5	0.012	0.046	96.0	15.3
13	313.15	6	1	0.004	0.080	98.6	26.7
14	313.15	6	1	0.007	0.084	97.8	27.9
15	313.15	6	1	0.008	0.083	97.4	27.5

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด สารนำกลับคือกรดไฮโดรคลอริก ควบคุมอัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์และกรดไฮโดรคลอริกเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีในทุกการทดลอง

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลดิบความเข้มข้นของปรอทภายหลังการสกัดและนำกลับ และร้อยละการสกัด และนำกลับปรอทด้วยเวลาที่แตกต่างกันโดยใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นปรอทหลัง การสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นปรอท หลังการนำกลับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการ สกัดปรอท	ร้อยละการ นำกลับปรอท
0	0	0	0	0
10	0.165	0.014	45.00	4.66
20	0.123	0.031	59.00	10.40
30	0.096	0.046	68.00	15.33
60	0.056	0.077	81.20	25.60
120	0.016	0.114	94.56	37.84
180	0.014	0.118	95.30	39.22
240	0.015	0.112	94.88	37.44
270	0.042	0.111	85.98	36.90

สภาวะที่ใช้ทดลอง : ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด สารนำกลับคือกรดไฮโดรคลอริก ควบคุมอัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์และกรดไฮโดรคลอริกเท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีในทุกการทดลอง อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน ค่าความเป็นกรดของน้ำทิ้งสังเคราะห์คือ 3 และค่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกคือ 1.2 โมลต่อลิตร

ภาคผนวก ข

การคำนวณข้อมูล

1) การคำนวณร้อยละการสกัดของปรอท

จากสมการที่ (2.1)

$$\text{ร้อยละการสกัด (\% Extraction)} = \frac{C_{\text{Hg},i} - C_{\text{Hg},t}}{C_{\text{Hg},i}} \times 100$$

สถานะที่ใช้ทดลอง : จากตารางที่ ก-1 ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 6 อุณหภูมิ 303.15 เคลวิน ความเร็วรอบปั่นกววน 400 รอบต่อนาที และอัตราส่วนของน้ำมันพืชต่อน้ำทิ้งสังเคราะห์เป็น 1 โดยใช้สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ความเข้มข้นของสารปรอทเริ่มต้นในวัฏภาคสารละลาย ($C_{\text{Hg},i}$) = 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารปรอทหลังสกัดในวัฏภาคสารละลาย ($C_{\text{Hg},t}$) = 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการสกัด (\% Extraction)} &= \frac{0.30 - 0.002}{0.30} \times 100 \\ &= 99.33 \end{aligned}$$

2) การคำนวณร้อยละการนำกลับของปรอท

จากสมการที่ (2.2)

$$\text{ร้อยละนำกลับ (\% Stripping)} = \frac{C_{\text{Hg},s}}{C_{\text{Hg},i}} \times 100$$

สถานะที่ใช้ทดลอง : จากตารางที่ ก-6 ความเข้มข้นปรอท 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สารสกัดคือน้ำมันข้าวโพด ค่าความความเป็นกรด-เบสของน้ำทิ้งสังเคราะห์เริ่มต้นเป็น 6 สารนำกลับคือกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำทิ้งสังเคราะห์และกรดไฮโดรคลอริก เท่ากันที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง ที่อุณหภูมิ 323.15 เคลวิน

ความเข้มข้นของสารปรอทเริ่มต้นในวัฏภาคสารละลาย ($C_{Hg,i}$) = 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของสารปรอทหลังสกัดในวัฏภาคสารละลาย ($C_{Hg,t}$) = 0.079 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการสกัด (\% Extraction)} &= \frac{0.079}{0.30} \times 100 \\ &= 26.33 \end{aligned}$$

3) การคำนวณจลนศาสตร์การสกัดและการนำกลับปรอท

ปฏิกิริยาอันดับที่ 0

อัตราการเกิดปฏิกิริยา = การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสาร A / การเปลี่ยนแปลงของเวลา

$$r = -\frac{d[A]}{dt} = k_0$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ จะได้สมการเส้นตรง ดังนี้

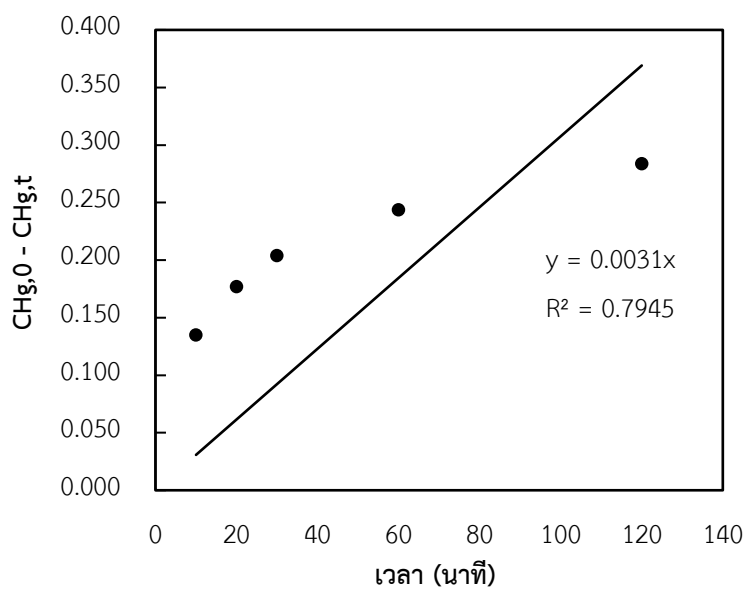
$$[A]_t = -k_0 t + [A]_0$$

กระบวนการสกัด : แกน y คือ ($C_{Hg,0} - C_{Hg,t}$) แกน x คือ t และความชันคือ k_0

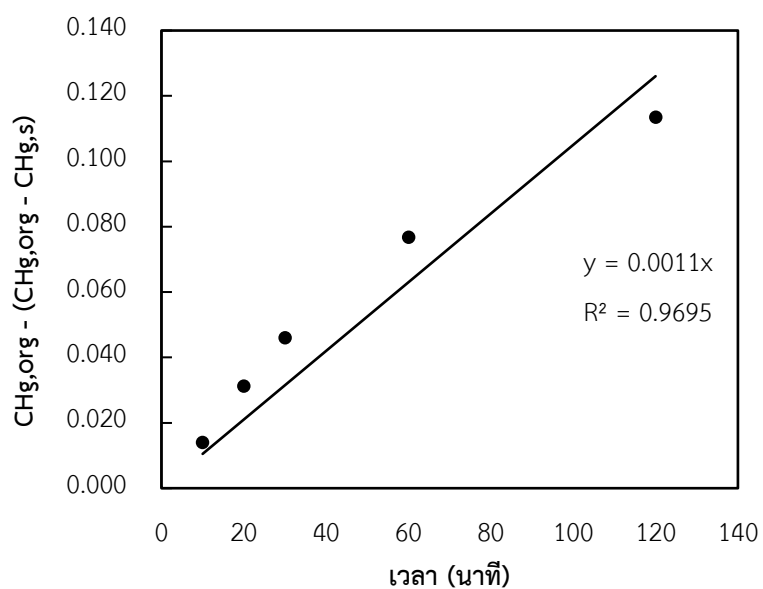
กระบวนการสกัด : แกน y คือ $C_{Hg,org} - (C_{Hg,org} - C_{Hg,S})$ แกน x คือ t และความชันคือ k_0

ตารางที่ ข-1 การคำนวณการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับปรอทที่อันดับปฏิกิริยาที่ศูนย์

เวลา (นาที)	$C_{Hg,0}$	$C_{Hg,t}$	$(C_{Hg,0} - C_{Hg,t})$	$C_{Hg,org} - (C_{Hg,org} - C_{Hg,S})$
10	0.3	0.165	0.135	0.014
20	0.3	0.123	0.177	0.031
30	0.3	0.096	0.204	0.046
60	0.3	0.056	0.244	0.077
120	0.3	0.016	0.284	0.114



ภาพที่ ข-1 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการสกัดอันดับที่ศูนย์



ภาพที่ ข-2 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการนำกลับอันดับที่ศูนย์

ปฏิกิริยาอันดับที่ 1

$$r = -\frac{d[A]}{dt} = k_1[A]$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ จะได้สมการเส้นตรง ดังนี้

$$\ln[A]_t - \ln[A]_0 = -k_1 t$$

หรือ

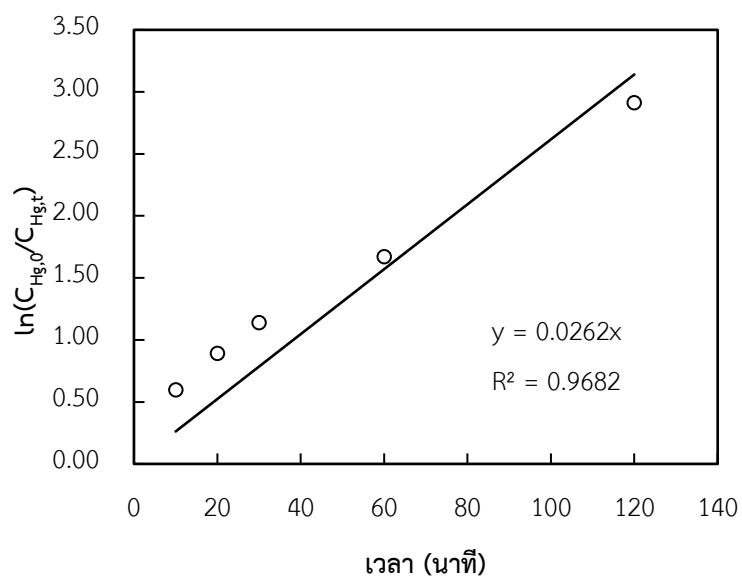
$$\ln \frac{[A]_t}{[A]_0} = -k_1 t$$

กระบวนการสกัด : แกน y คือ $\ln \left(\frac{C_{Hg,0}}{C_{Hg,t}} \right)$ แกน x คือ t และความชันคือ k_1

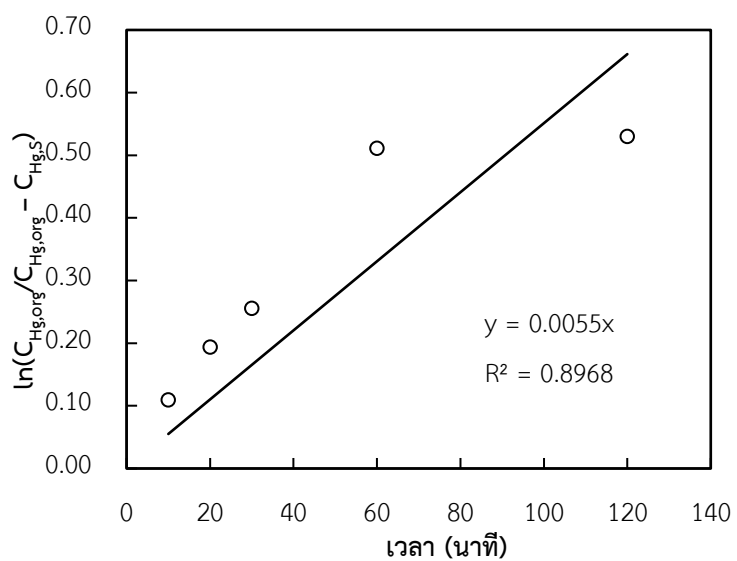
กระบวนการสกัด : แกน y คือ $\ln \left(\frac{C_{Hg,org}}{C_{Hg,org} - C_{Hg,S}} \right)$ แกน x คือ t และความชันคือ k_1

ตารางที่ ข-2 การคำนวณการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับปรอทที่อันดับปฏิกิริยาที่หนึ่ง

เวลา (นาที)	$C_{Hg,0}$	$C_{Hg,t}$	$\ln(C_{Hg,0}/C_{Hg,t})$	$\ln(C_{Hg,org}/C_{Hg,org} - C_{Hg,S})$
10	0.3	0.165	0.598	0.109
20	0.3	0.123	0.892	0.194
30	0.3	0.096	1.139	0.255
60	0.3	0.056	1.671	0.511
120	0.3	0.016	2.911	0.530



ภาพที่ ข-3 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการสัต์อันดับที่หนึ่ง



ภาพที่ ข-4 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของอันดับปฏิกิริยาการนำกลับอันดับที่หนึ่ง

ปฏิกิริยาอันดับที่ 2

$$r = -\frac{d[A]}{dt} = k_2[A]^2$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ จะได้สมการเส้นตรง ดังนี้

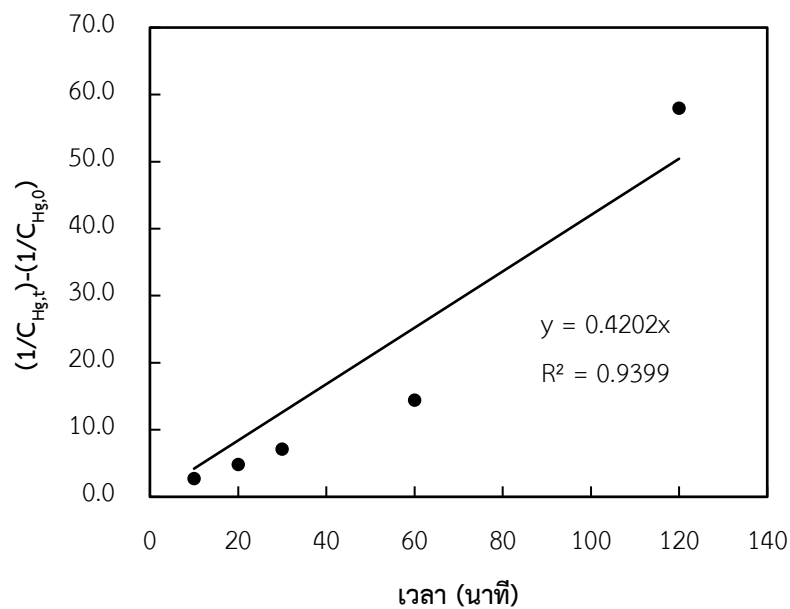
$$\frac{1}{[A]_t} - \frac{1}{[A]_0} = -k_2 t$$

กระบวนการสกัด : แกน y คือ $\frac{1}{C_{Hg,t}} - \frac{1}{C_{Hg,0}}$ แกน x คือ t และความชันคือ k_2

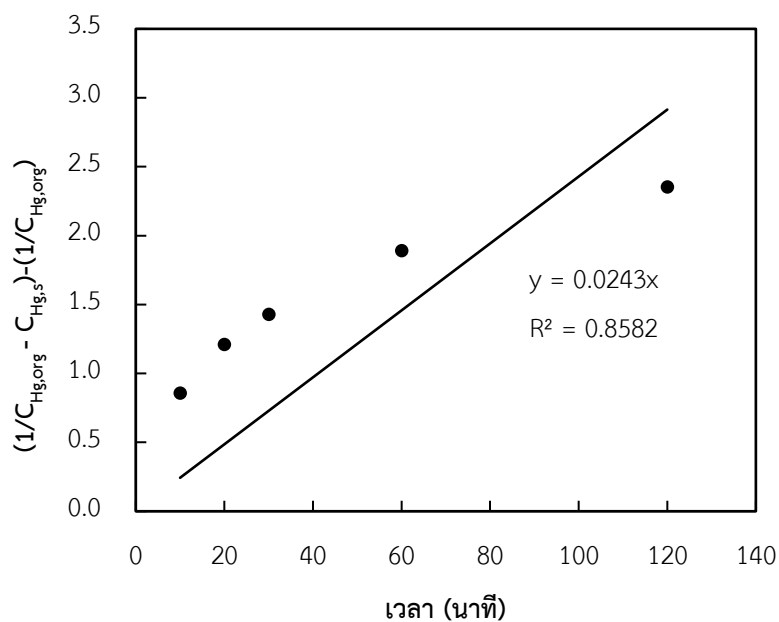
กระบวนการสกัด : แกน y คือ $\frac{1}{C_{Hg,org} - C_{Hg,s}} - \frac{1}{C_{Hg,org}}$ แกน x คือ t และความชันคือ k_2

ตารางที่ ข-3 การคำนวณการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาการสกัดและการนำกลับปรอทที่อันดับปฏิกิริยาที่สอง

เวลา (นาที)	$C_{Hg,0}$	$C_{Hg,t}$	$(1/C_{Hg,t}) - (1/C_{Hg,0})$	$(1/C_{Hg,org} - C_{Hg,s}) - (1/C_{Hg,org})$
10	0.3	0.165	2.727	0.856
20	0.3	0.123	4.797	1.209
30	0.3	0.096	7.083	1.427
60	0.3	0.056	14.397	1.890
120	0.3	0.016	57.941	2.352



ภาพที่ ข-5 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการสัต์อันดับที่สอง



ภาพที่ ข-6 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลาของปฏิกิริยาการนำกลับอันดับที่สอง

ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์

Journal of Environmental Chemical Engineering 11 (2023) 109296



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Environmental Chemical Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jece

Mercury elimination from synthetic petroleum produced water using green solvent via liquid-liquid extraction: Experimental, effective solubility behaviors and DFT investigation

Kanyanat Duangchan^a, Vaneer Mohdee^a, Wikorn Punyain^{b,*}, Ura Pancharoen^{a,*}^a Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand^b Department of Chemistry and Center of Excellence in Biomaterials, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

ARTICLE INFO

Editor: Pei Xu

Keywords:

Vegetable oil
Hg(II)
Separation
Response surface methodology
Thermodynamic models
Density functional theory

ABSTRACT

This study focuses on the use of alternative vegetable oils (corn, linseed, and canola oil) as green extractants in the liquid-liquid extraction (LLE) of mercury elimination from synthetic produced water to meet Thailand's standard discharge limits. Extraction parameters involve the type of vegetable oil used, pH of feed solution, time, and O/A ratio. Three parameters in the stripping process are optimized by applying response surface methodology (RSM). Models NRTL, UNIQUAC, and Van't Hoff are employed in the mutual solubility of corn oil; the various strippants (NaOH, HCl, and thiourea) are investigated under different temperatures. Under optimal conditions, results demonstrate that percentages of extraction and stripping of mercury reach 99.4% and 95.4%, respectively. Corn oil proved to be the most efficient solvent for mercury extraction at pH ranges 2–8. Based on ANOVA, the stirring speed and A/O ratio had a significant influence on the stripping process. The mechanisms of extraction reaction were evaluated via density functional theory (DFT) along with Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and ultraviolet-visible spectroscopy (UV-vis). Extraction and stripping kinetics are found to be of first-order ($k = 0.182 \text{ min}^{-1}$) and second-order ($k = 0.9244 \text{ L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), respectively. It is seen that our method has the ability to successfully remove mercury while still remaining below the standard discharge level.

1. Introduction

Global awareness regarding the adverse impacts of toxic metal pollution on the environment has been known for over a decade. Mercury is one of the most hazardous metals and can be found in soil, air, and water [1]. It has been reported that wastewater generated from industrial processes as well as produced water from the production of offshore oil and gas is contaminated with mercury. The composition of produced water differs depending on the natural geological formation and production area [2]. In Thailand, mercury contaminant in produced water has been found in the range of 2 ppm [3,4]. Lothongkum et al. [3] recorded that the concentration of mercury from natural-gas-produced water in the Gulf of Thailand was 0.3 ppm. However, the standard discharge limit of mercury as formulated by the Ministry of Industry and the Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand is no greater than 0.005 ppm [5]. Toxic metals like mercury released into the environment can accumulate and is therefore harmful to the ecological system as well as human health. The toxicity of mercury depends on the

type of mercury found. For instance, both elemental and methylmercury can affect the nervous system while inorganic mercury can cause kidney damage [6]. Mercury is also seen to have a negative effect on equipment, resulting in corrosive material [2].

In general, the simplest method to dispose of produced water is by re-injecting mercury-contaminated produced water into wells. However, due to the increased risk of leakage into the environment, re-injection of produced water may not be feasible [7]. Of late, conventional methods such as coagulation/flocculation, precipitation, adsorption and ion-exchange have been applied to remove toxic metal contamination from aqueous solutions [8]. In Table S1 of the Supplementary material, a summary of the advantages and disadvantages of different methods for mercury removal are shown [8–10]. Naushad et al. [11] utilized a curcumin based bio-composite for the removal of toxic Hg(II) metal ions; 85.00% of mercury was removed. Several adsorbents are effective for the adsorption of Hg(II) ions. Nevertheless, the discharge concentration was still found to be above standard discharge limits. The application by Klemz et al. [12] using liquid-liquid extraction (LLE) is of great interest

* Corresponding authors.

E-mail addresses: kraiwpanp@nu.ac.th (W. Punyain), ura.p@chula.ac.th (U. Pancharoen).<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109296>

Received 7 November 2022; Received in revised form 25 December 2022; Accepted 6 January 2023

Available online 9 January 2023

2213-3437/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวกัญญาณัฐ ดวงจันทร์
วัน เดือน ปี เกิด	3 มิถุนายน 2541
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลชลประทาน
วุฒิการศึกษา	2553-2559 ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนศรีบุญยานนท์ จังหวัดนนทบุรี 2559-2563 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2563-ปัจจุบัน เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	14 ซอยรณสีทิพย์ 2 ถนน สนามบินน้ำ ตำบลท่าทราย อำเภอเมืองนนทบุรี
ผลงานตีพิมพ์	K. Duangchan et al., “Mercury elimination from synthetic petroleum produced water using green solvent via liquid-liquid extraction: Experimental, effective solubility behaviors and DFT investigation” Journal of Environmental Chemical Engineering Volume 11, Issue 2 April 2023 Article number 109296, DOI: 10.1016/j.jece.2023.109296