

การพัฒนาถังปฏิกรณ์สำหรับกำจัดน้ำมันในดินจากการขุดเจาะปิโตรเลียม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Reactor development for oil removal from drill cuttings



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาถังปฏิกรณ์สำหรับกำจัดน้ำมันในดินจากการขุด เจาะปิโตรเลียม
โดย	น.ส.ชุตติกาญจน์ โพธิ์รัชต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ณัฐวิญญ์ ขวเลิศพรศิยา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.ณัฐวิญญ์ ขวเลิศพรศิยา)

..... กรรมการ  
(ดร.ดาว สุวรรณแสง จันเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มรุพัชร์ จำนงค์วงศ์)

ชุดิกายุจน์ โพธิ์รัชต์ : การพัฒนาถังปฏิกรณ์สำหรับกำจัดน้ำมันในดินจากการขุดเจาะ  
ปิโตรเลียม. ( Reactor development for oil removal from drill cuttings) อ.ที่  
ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ณัฐวิญญู ชาวเลิศพรศิยา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันด้วยวิธีการล้างทำความสะอาด  
สะอาดดินด้วยน้ำประปา ซึ่งดินปนเปื้อนมีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง C<sub>12</sub> (Dodecane) ถึง  
C<sub>22</sub> (Docosane) โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาในการล้างทำความสะอาด ได้แก่ ค่าพีเอชในการ  
ล้าง (ค่าพีเอชน้อยกว่าค่า  $pH_{zpc}$  ค่าพีเอชเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  และค่าพีเอชน้อยกว่าค่า  $pH_{zpc}$ )  
ความเร็วในการเขย่า (30 60 และ 120 รอบต่อนาที) ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด (5  
10 และ 20 นาที) และอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดิน (2.5 5 และ 10 มิลลิลิตรต่อกรัม) ตัวชี้วัด  
คือ ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะนำสภาวะที่เหมาะสมเดินระบบในถังปฏิกรณ์ โดยการ  
เดินระบบแบบทีละเท จากการทดลองพบว่าสภาวะการล้างทำความสะอาดที่เหมาะสมในระดับ  
ปฏิบัติการ (Lab scale) คือ ค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อ  
นาที ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด 10 นาที และอัตราส่วนระหว่างน้ำและดินปนเปื้อน  
10 มิลลิลิตรต่อกรัม ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ถึงร้อยละ 42.15 นำสภาวะไปเดินระบบในถังปฏิกรณ์  
(Bench scale) เริ่มต้นจากเติมน้ำประปาและดินปนเปื้อน เป่าอากาศ (ล้างทำความสะอาด)  
และกรองอนุภาค ค่าความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์ที่เกิดจากฟองอากาศที่มาจากความดันในเส้น  
ท่อ 1.0 บาร์ สร้างฟองอากาศขนาด 2.40 มิลลิเมตร ค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจาก  
ฟองอากาศ 252.69 ต่อวินาที สามารถประเมินอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนอยู่ที่ 1,433  
ชั่วโมง สภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองในถังปฏิกรณ์คือ พีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$   
อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม) ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด  
สะอาดดิน 10 นาที ให้ประสิทธิภาพร้อยละ 27.31 อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดถังปฏิกรณ์หรือติดตั้ง  
ใบพัดสำหรับการปั่นกววน อาจช่วยพัฒนาถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดให้มี  
ประสิทธิภาพได้ดียิ่งขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6070163821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: Soil washing, Tap water, Total Petroleum Hydrocarbon, Soil washing reactor, Ceramic membrane

Chutikarn Potiruch : Reactor development for oil removal from drill cuttings. Advisor: Prof. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D. Co-advisor: Nattawin Chawaloeshonsiya, Ph.D.

The work aims to investigate the treatment of Oil-Contaminated soil by tap water washing which contaminated soil contains carbon in the range  $C_{12}$  (Dodecane) to  $C_{22}$  (Docosane). The effects of soil washing (pH for washing, mixing speed, washing time and liquid to solid ratio) pH for washing ( $pH_{zpc} = pH_{zpc}$  and  $> pH_{zpc}$ ) mixing speed (30 60 and 120 RPM) washing time (5 10 and 20 minutes) and liquid to solid ratio (2.5 5.0 and 10.0 ml/g) measuring the amount of oil is Total Petroleum Hydrocarbon (TPH). The results showed that the highest Total Petroleum Hydrocarbon removal efficiency 42.15 percent was achieve the optimum condition, pH for washing equal  $pH_{zpc}$  mixing speed 120 RPM washing time 10 minutes and liquid to solid ratio 10.0 ml/g. The system to operate in bench scale, starts from adding water and contaminated soil, bubble generator (soil washing) and filtering particles in reactor. Bubble generator in reactor, using the highest velocity gradient of the pressure in the pipeline system 1.0 bar release bubbles diameter ( $D_B$ ) 2.40 mm, gradient velocity 252.69 per second. The lifetime of the ceramic membrane can be estimated at 1,433 hours. The optimum condition from bench scale in reactor is pH for washing equal  $pH_{zpc}$  washing time 10 minutes liquid to solid ratio 10.0 l/kg. The efficiency was 27.31 percent. However, increasing the size of reactor or installing a propeller for stirring may help improve soil washing reactor to be more efficient.

Field of Study: Environmental Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และ ดร. ณัฐวิญญ์ ขวเลิศพรศิยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่มอบโอกาส คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันมีค่าอย่างประเมินไม่ได้จนทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล ดร. ดาวสุวรรณแสง จันเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มรุพัชร จำนงค์วงศ์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ และแก้ไขงานวิจัยนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุก ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าอย่างมากมาย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นางสาวทักษิณา โพธิ์ใหญ่ นายนवल ทองตาล่วง นายกริชชาติ ว่องไวลิขิต และ นายเกียรติ กิตติจิตต์ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันมีค่าแก่ข้าพเจ้าตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่ในการศึกษาและให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่มาตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชุตติกาญจน์ โพธิ์รัชต์

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	1
สารบัญตาราง.....	5
บทที่ 1 บทนำ.....	7
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	7
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ปิโตรเลียม (Petroleum).....	11
2.1.1 นิยาม (Definition).....	11
2.1.2 กระบวนการสำรวจและผลิตปิโตรเลียม.....	11
2.2 ชนิดของปิโตรเลียม.....	13
2.2.1 แก๊สธรรมชาติ (Natural gas).....	13
2.2.2 น้ำมันดิบ (Crude oil).....	13
2.3 ประเภทของน้ำมัน.....	14

2.3.1	น้ำมันหล่อลื่น (Cutting oil) และน้ำมันหล่อเย็น (Cutting fluid).....	14
2.3.2	น้ำมันดิบชนิดเบา (Light crude oil) .....	14
2.3.3	น้ำมันดิบชนิดหนัก (Heavy crude oil) .....	14
2.4	องค์ประกอบของน้ำมันดิบ .....	15
2.4.1	สารประกอบไฮโดรคาร์บอน .....	15
2.4.2	สารประกอบที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอน.....	16
2.4.3	สารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organometallic compounds).....	17
2.5	รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม.....	17
2.6	ของเสียจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม (Drill cuttings) .....	17
2.7	อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier).....	19
2.8	การปนเปื้อนน้ำมันลงสู่ดิน.....	20
2.9	เทคโนโลยีบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน.....	21
2.9.1	การปรับเสถียร (Solidification / Stabilization).....	21
2.9.2	การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological degradation).....	22
2.9.3	การลดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจากการระเหย (Soil Vapor Extraction)..	22
2.9.4	การเผาที่อุณหภูมิสูง (Thermal treatment) .....	23
2.9.5	การล้างดิน (Soil washing) .....	24
2.10	เมมเบรน (Membrane).....	27
2.10.1	Microfiltration (MF).....	29
2.10.2	Ultrafiltration (UF) .....	29
2.10.3	Nanofiltration (NF).....	29
2.10.4	Reverse Osmosis (RO).....	29
2.11	กระบวนการทำให้ลอย (Flotation).....	30
2.11.1	ขั้นตอนการเกิดกระบวนการทำให้ลอย .....	31

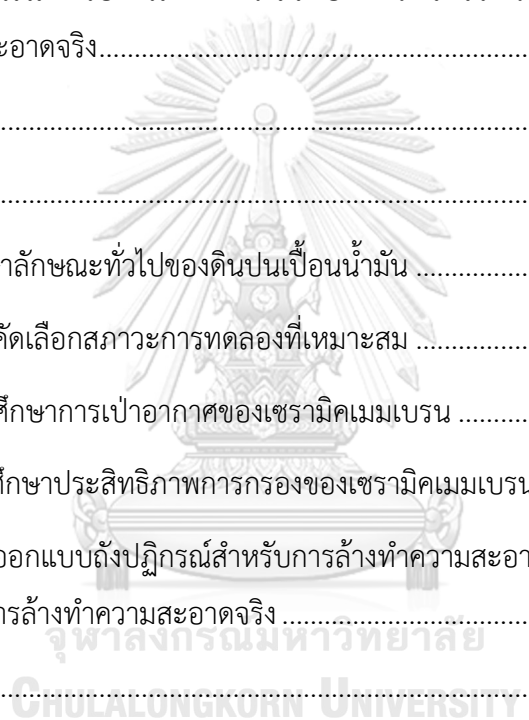


2.11.2	ประเภทของกระบวนการทำให้ลอย .....	31
2.12	ฟองอากาศ (Bubble) .....	32
	ค่าตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters).....	32
2.13	วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM).....	36
	วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับทางสถิติ โดยมีผลต่อการวิเคราะห์ปัญหา ผลตอบสนองที่ได้จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทำให้ผู้ที่ทำการทดลองจะได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจาก การแบบจำลองนี้ ตัวอย่างเช่น ผลตอบสนอง $y$ เป็นฟังก์ชันของ $x_1$ และ $x_2$ จะสามารถเขียน ในรูปแบบสมการได้ดังนี้ .....	36
2.14	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
2.14.1	กระบวนการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน.....	37
2.14.2	การใช้เซรามิคเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน .....	39
2.14.3	กระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก .....	40
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	47
3.1	วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	47
3.1.1	วัตถุประสงค์ .....	47
3.1.2	รายการสารเคมี.....	48
3.2	ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์.....	49
3.3	วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	50
3.3.1	ศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อนน้ำมัน .....	52
3.3.2	การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม .....	59
3.3.3	การทดสอบการสร้างฟองอากาศโดยเซรามิคเมมเบรน .....	61
3.3.4	การทดสอบประสิทธิภาพ การกรองของเซรามิคเมมเบรน .....	64
3.3.5	การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน และศึกษาสภาวะที่ เหมาะสมการล้างทำความสะอาดดินจริง .....	67
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์.....	70

4.1 การศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อนน้ำมัน .....	70
4.1.1 ค่าความชื้นภายในดินตัวอย่าง .....	72
4.1.2 ค่าพีเอชของดินตัวอย่าง .....	73
4.1.3 ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนอนุภาคดินเป็นศูนย์ ( $pH_{zpc}$ ) .....	73
4.1.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินในแต่ละระดับความลึก (Particle size distribution).....	74
4.1.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินปนเปื้อน .....	79
4.1.6 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนแบบโคตของอนุภาค.....	83
4.1.6.1 การตกตะกอนแบบโคตของเบนโทไนท์ .....	83
4.1.6.2 การตกตะกอนแบบโคตของดินปนเปื้อนน้ำมัน .....	85
4.2 การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม .....	87
4.2.1 การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม .....	88
4.2.1.1 ค่าพีเอชในการล้างทำความสะอาดดิน (pH) .....	91
4.2.1.2 อัตราส่วนน้ำประปาต่อดิน (L/S ratio).....	91
4.2.1.3 ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน (Washing time).....	92
4.2.1.4 ความเร็วในการเขย่า (Mixing speed) .....	93
4.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM).....	96
4.2.2.1 กำหนดพารามิเตอร์และค่าที่ใช้ในการทดลอง.....	97
4.2.2.2 สร้างสมการตัวต้นแบบ (Model) จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ .....	97
4.2.2.3 พิสูจน์สมการต้นแบบ (Recheck).....	99
4.2.2.4 สร้างแบบจำลองพื้นผิว (Surface Plot) เส้นค่าระดับ (Contour Plot) .....	101
4.2.2.5 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองที่ 4.2.1 และค่าที่ได้จากสมการต้นแบบ	102
4.2.2.6 สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง .....	104

4.3 การศึกษาการเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน .....	105
4.3.1 ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter, $D_b$ ).....	105
4.3.2 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, $U_b$ ).....	109
4.3.3 ความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient, $G$ )....	110
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของเซรามิคเมมเบรน .....	112
4.4.1 การคัดเลือกขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์ .....	112
4.4.2 การคัดเลือกอัตราการกรองอนุภาคที่เหมาะสม.....	114
4.4.3 การทดลองหาความต้านทานของเซรามิคเมมเบรน.....	116
4.4.4 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน .....	117
4.4.4 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน .....	118
4.4.4.1 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 1.67 กรัม เบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ.....	118
4.4.4.2 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 2.5 กรัม เบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ.....	119
4.4.4.3 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 3.33 กรัม เบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ.....	120
4.4.4.4 การเดินระบบการกรองอนุภาคดินปนเปื้อนด้วยเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 2.67 กรัมดิน/ลิตรของน้ำ .....	121
4.4.5 การประมาณอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรน .....	124
4.5 การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ในการล้างทำความสะอาดจริง .....	127
4.5.1 การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน .....	127
4.5.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดดิน .....	129
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	139
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	139

5.1.1	ลักษณะดินปนเปื้อนน้ำมัน .....	139
5.1.2	สภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่เหมาะสม .....	139
5.1.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM).....	140
5.1.4	การเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน.....	140
5.1.5	การกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน.....	141
5.1.6	ถึงปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน และสภาวะที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดจริง.....	141
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	142
ภาคผนวก	.....	143
ภาคผนวก ก.	ศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อนน้ำมัน .....	144
ภาคผนวก ข.	การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม .....	150
ภาคผนวก ค.	การศึกษาการเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน .....	169
ภาคผนวก ง.	การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของเซรามิคเมมเบรน .....	196
ภาคผนวก จ.	การออกแบบถึงปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดจริง .....	206
บรรณานุกรม	.....	215
ประวัติผู้เขียน	.....	222



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 กระบวนการสำรวจ และผลิตปิโตรเลียม.....	12
ภาพที่ 2-2 น้ำมันดิบชนิดที่ไม่มีไขมาก.....	14
ภาพที่ 2-3 วงแหวนเบนซีน (Benzene model) .....	16
ภาพที่ 2-4 ของไหลสำหรับการขุดเจาะ (Drilling fluid).....	18
ภาพที่ 2-5 การทำงานของอิมัลซิไฟเออร์.....	19
ภาพที่ 2-6 การปนเปื้อนของชั้นดินที่ไม่มีอิมัลชันด้วยน้ำ .....	20
ภาพที่ 2-7 กระบวนการปรับเสถียร (Solidification / Stabilization) .....	22
ภาพที่ 2-8 กระบวนการลดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจากการการระเหยด้วยการไล่ด้วยอากาศ 23	
ภาพที่ 2-9 กระบวนการล้างทำความสะอาดดิน (Soil washing) .....	25
ภาพที่ 2-10 การทำงานของเมมเบรน .....	27
ภาพที่ 2-11 การแบ่งกลุ่มของเมมเบรนในการกำจัดเชื้อโรค (Riley, 2014) .....	28
ภาพที่ 2-12 การทำงานของออสโมซิสย้อนกลับ .....	29
ภาพที่ 2-13 การเปรียบเทียบระหว่างฟองอากาศธรรมดา กับฟองอากาศขนาดเล็ก .....	31
ภาพที่ 2-14 ระบบการทำงานการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) .....	32
ภาพที่ 2-15 ชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยกระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศ ขนาดเล็ก.....	<b>ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดบุ๊กมาร์ก</b>
ภาพที่ 2-16 ชุดการทดลองคอลัมน์ทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็กแบบไซโคลนิก .....	42
ภาพที่ 2-17 ชุดการทดลองบำบัดน้ำมันดิบอิมัลชันในน้ำเกลือ.....	43
ภาพที่ 3-1 เซรามิกเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอน (ก) และ 0.5 ไมครอน (ข) ตามลำดับ.....	47
ภาพที่ 3-2 แผนผังขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	51
ภาพที่ 3-3 กราฟแสดงค่า $pH_{zpc}$ ในการบำบัดน้ำเสีย จากกระบวนการโอโซน.....	53

ภาพที่ 3-4 กระบวนการสกัดดินปนเปื้อนน้ำมัน .....	55
ภาพที่ 3-5 แผนผังการศึกษาลักษณะ และองค์ประกอบของดินปนเปื้อนน้ำมัน .....	56
ภาพที่ 3-6 แผนผังการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนของอนุภาค .....	57
ภาพที่ 3-7 แผนผังการศึกษาการล้างทำความสะอาดดินโดยหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม .....	60
ภาพที่ 3-8 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองการสร้างฟองอากาศ .....	61
ภาพที่ 3-9 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพการเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน .....	63
ภาพที่ 3-10 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลอง .....	64
ภาพที่ 3-11 แผนผังการเตรียมเบนโทไนท์ก่อนนำไปทดลอง .....	65
ภาพที่ 3-12 แผนผังการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของเซรามิคเมมเบรน .....	67
ภาพที่ 3-13 แผนผังการศึกษารูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมจากกระบวนการบำบัดดินปนเปื้อน น้ำมัน .....	68
ภาพที่ 4-1 ลักษณะดินตัวอย่างทั้ง 7 ระดับความลึก ก่อนการฝังแห้ง (1) และ หลังการฝังแห้ง (2) .	71
ภาพที่ 4-2 ลักษณะเนื้อดินตัวอย่างทั้ง 7 ระดับความลึก .....	71
ภาพที่ 4-3 กราฟค่า $pH_{zpc}$ ของแต่ละระดับชั้นความลึกของดินที่ระดับชั้นความลึกต่าง ๆ .....	74
ภาพที่ 4-4 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของแต่ละระดับชั้นความลึกของดิน .....	78
ภาพที่ 4-5 สารละลายมาตรฐาน (น้ำมันดีเซล) ที่ความเข้มข้น 40,000 ppm .....	80
ภาพที่ 4-6 กราฟสารละลายมาตรฐานดีเซล (Standard Calibration Curve) .....	80
ภาพที่ 4-7 ภาพการตกตะกอนของเบนโทไนท์ตามระยะเวลา .....	84
ภาพที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคที่เหลืออยู่และความเร็วในการตะกอน ของอนุภาคเบนโทไนท์ .....	85
ภาพที่ 4-9 ภาพการตกตะกอนของดินปนเปื้อนตามระยะเวลา.....	86
ภาพที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคที่เหลืออยู่และความเร็วในการตะกอนของเบนโทไนท์ .....	86
ภาพที่ 4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่สภาวะ การล้างทำความสะอาดต่าง ๆ .....	90

ภาพที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน .....	94
ภาพที่ 4-13 ขนาดอนุภาคของดินปนเปื้อน .....	95
ภาพที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์ความถดถอยของพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Regression) จากการทดลองทั้ง 81 สภาวะ .....	97
ภาพที่ 4-15 ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์เดี่ยวต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน .....	99
ภาพที่ 4-16 สภาวะการทดลองของโปรแกรมว่าควรมีการตรวจสอบเพิ่มเติม (Fits and Diagnostics for Unusual Observations) .....	100
ภาพที่ 4-17 กราฟพื้นผิวแสดงประสิทธิภาพการบำบัด TPH ระหว่างค่าพีเอช (pH) และความเร็วในการเขย่า (Mixing speed) .....	101
ภาพที่ 4-18 กราฟเส้นค่าระดับแสดงผลของค่าพีเอช (pH) และความเร็วในการเขย่า (Mixing speed) ต่อประสิทธิภาพการกำจัด TPH .....	101
ภาพที่ 4-19 กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนระหว่างการทดลองและการทำนายจากสมการ .....	103
ภาพที่ 4-20 ลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้น (Bubble shape).....	106
ภาพที่ 4-21 การสร้างฟองอากาศของเซรามิคเมมเบรนที่ระดับน้ำสูงเป็น 3 เท่าของเซรามิคเมมเบรน .....	107
ภาพที่ 4-22 ขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลต่าง ๆ .....	108
ภาพที่ 4-23 ขนาดอนุภาคของดินปนเปื้อนและเบนโทไนท์ .....	113
ภาพที่ 4-24 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองการกรองอนุภาค.....	114
ภาพที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในเส้นท่อและเวลาที่อัตราการกรองระดับต่าง ๆ .....	116
ภาพที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเซรามิคเมมเบรนและระยะเวลาเดินระบบที่ความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์ต่อลิตร .....	<b>ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดบุ๊กมาร์ก</b>
ภาพที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเซรามิคเมมเบรนและระยะเวลาเดินระบบที่ความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์ต่อลิตร .....	119

ภาพที่ 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเซรามิคเมมเบรนและระยะเวลาเดินระบบ ที่ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนด์ต่อลิตร .....	120
ภาพที่ 4-29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเซรามิคเมมเบรนและระยะเวลาเดินระบบของ อนุภาคดินปนเปื้อนที่ความเข้มข้น 750 กรัมดินปนเปื้อนต่อลิตร .....	122
ภาพที่ 4-30 แบบถังปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน .....	128
ภาพที่ 4-31 การเลือกสภาวะการเดินระบบภายในถังปฏิกรณ์ .....	131
ภาพที่ 4-32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนกับระยะเวลา ในการล้างทำความสะอาดดินระหว่างการทดลองในระดับปฏิบัติการและเดินระบบในถังปฏิกรณ์ ..	133
ภาพที่ 4-33 กราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาคก่อนและหลังล้างทำความสะอาดดินในสภาวะต่าง ๆ	134
ภาพที่ 4-34 กราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาคก่อนและหลังล้างทำความสะอาดดินในสภาวะต่าง ๆ	135





## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ลักษณะของผลผลิตสารปิโตรเลียม .....	15
ตารางที่ 2-2 ตารางเปรียบเทียบข้อดี และข้อจำกัดของเทคโนโลยีการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน .....	24
ตารางที่ 2-3 ตารางเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการล้างดิน .....	26
ตารางที่ 2-4 ชนิดของเมมเบรนตามการจำแนกด้วยการกรอง .....	28
ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษาระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็กจากงานวิจัยที่ผ่านมา .....	45
ตารางที่ 3-1 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษา และวิธีการวิเคราะห์ .....	49
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรในการคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน ..	59
ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่เหมาะสมในการเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน .....	62
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของเซรามิคเมมเบรน .....	66
ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบถังปฏิกรณ์ .....	69
ตารางที่ 4-1 ค่าความชื้นภายในดินของดินตัวอย่าง .....	72
ตารางที่ 4-2 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในดินจากทุกระดับความลึก .....	82
ตารางที่ 4-3 ผลการตกตะกอนแบบโตนของอนุภาคเบนโทไนท์ .....	84
ตารางที่ 4-4 ผลการตกตะกอนแบบโตนของอนุภาคดินปนเปื้อน .....	86
ตารางที่ 4-5 ลักษณะดินปนเปื้อนจากดินปนเปื้อนระดับชั้นความลึกที่ 3 .....	88
ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดความเข้มข้นปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน .....	89
ตารางที่ 4-7 สภาวะที่ใช้ตรวจสอบความแม่นยำในโปรแกรม Minitab 18 .....	100
ตารางที่ 4-8 ผลการทดลองขนาดฟองอากาศเฉลี่ยของเซรามิคเมมเบรนที่ขนาดรูพรุน 0.3 และ 0.5 ไมครอน .....	106
ตารางที่ 4-9 อัตราการไหลของอากาศที่เข้าถังปฏิกรณ์ผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอนที่ สภาวะต่าง ๆ .....	108

ตารางที่ 4-10 ผลการทดลองความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ.....	109
ตารางที่ 4-11 ผลการทดลองความเร็วในการปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์.....	110
ตารางที่ 4-12 ผลการทดลองจากทุกพารามิเตอร์ในการศึกษาการเป่าอากาศ.....	112
ตารางที่ 4-13 ผลการทดลองอัตราการกรองที่ระดับต่าง ๆ.....	115
ตารางที่ 4-14 ผลการศึกษาการกำจัดอนุภาคของแข็งแขวนลอย.....	123
ตารางที่ 4-15 ระดับการอุดตันภาวะของสภาวะความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ ...	124
ตารางที่ 4-16 ระดับการอุดตันภาวะของสภาวะความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ .....	124
ตารางที่ 4-17 ระดับการอุดตันภาวะของสภาวะความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ ...	125
ตารางที่ 4-18 ระดับการอุดตันภาวะของสภาวะความเข้มข้น 100 กรัมดินปนเปื้อน/ลิตรของน้ำ ..	125
ตารางที่ 4-19 การประมาณอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนด้วยค่าระดับการอุดตันถาวร .....	126
ตารางที่ 4-20 ปริมาณดินที่ขนาดต่าง ๆ.....	129
ตารางที่ 4-21 ข้อมูลการสร้างฟองของความดันในเส้นท่อของ 0.3 และ 1.0 บาร์ .....	130
ตารางที่ 4-22 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน.....	132
ตารางที่ 4-23 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน.....	132
ตารางที่ 4-24 ผลการศึกษาการกำจัดอนุภาคของแข็งแขวนลอย.....	137

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมปิโตรเลียมเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการปนเปื้อนน้ำมันสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากอุตสาหกรรมดังกล่าวต้องอาศัยกระบวนการขุดเจาะ (Drilling) ซึ่งก่อให้เกิดของเสียจำพวก เศษหิน ดิน ทราย (Drill cuttings) ที่ปนเปื้อนไปด้วยน้ำมันหรือสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (Petroleum hydrocarbons) ซึ่งเป็นสารมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช สัตว์ และ พละานามัยของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม (เกษม จันทรแก้ว, 2530)

Drill cuttings ดังกล่าว ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของเสียประเภท 01 05 06 HM ตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2548 ซึ่งเป็นของเสียที่มีสารอันตรายเป็นส่วนประกอบ (Potentially hazardous waste) ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องจัดการหรือบำบัดน้ำมันออกจากของเสียเหล่านี้อย่างถูกวิธี ทั้งนี้ เพื่อให้ของเสียดังกล่าวอยู่ในสภาพที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย (Non-hazardous waste) รวมไปถึงสามารถนำของเสียที่บำบัดแล้วไปใช้ประโยชน์ต่อในภายหลังได้

วิธีการในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันมีอยู่หลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางกายภาพ เช่น การเผาที่อุณหภูมิสูง หรือการฝังกลบ ซึ่ง จัดเป็นการบำบัดตามหลักวิชาการและกฎหมายตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 แต่วิธีการเหล่านี้มีต้นทุนในการกำจัดค่อนข้างสูง และไม่สามารถนำดินเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ต่อได้ การล้างทำความสะอาดดิน (Soil washing) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ได้กับมลพิษหลายกลุ่ม รวมไปถึงการบำบัดสารมลพิษประเภทน้ำมันหรือของเสียปิโตรเลียม จึงเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยม นอกจากนี้ สามารถนำดินกลับมาใช้ใหม่ได้

การล้างทำความสะอาดดินเป็นกระบวนการขัดหรือล้างดินโดยแยกสิ่งปนเปื้อนที่ติดอยู่กับดิน ด้วยสารละลายเคมีและแรงเฉือน เพื่อลดแรงตึงผิวและลดแรงเสียดทานระหว่างสิ่งปนเปื้อนและดิน โดยสารล้างทำความสะอาด (Washing agent) ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent) และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันสูงถึงร้อยละ 85 (Pekdemir และคณะ, 2003) อย่างไรก็ตาม สารล้างเหล่านี้ อาจมีการตกค้างในสิ่งแวดล้อม และมีราคาสารเคมีค่อนข้างสูงจึงมีความสนใจประยุกต์การล้างทำ

ความสะอาดดินโดยการนำน้ำประปามาทำการล้างดินปนเปื้อนมาบำบัดขั้นต้นก่อนการล้างทำความสะอาดดินด้วยสารเคมี โดยการศึกษาการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันด้วยวิธีการล้างทำความสะอาดดินพบว่าตัวแปรที่สำคัญในการทดลอง ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างดินปนเปื้อนน้ำมันกับสารล้าง อุณหภูมิ ความเร็วในการเขย่า และระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน (Kingsley และคณะ, 2005) จึงมีการอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมต่อการทดลอง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปร หนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมคือ วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เป็นวิธีที่อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีต่อผลลัพธ์ที่สนใจ หากจุดหรือความเหมาะสมต่อผลลัพธ์นั้น ๆ และบ่งบอกถึงตัวแปรที่มีนัยสำคัญมากที่สุดจากการทดลอง จึงทำให้สามารถทำนายประสิทธิภาพตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังมีความแม่นยำ และความถูกต้องสูงในการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงผลออกมาเป็นระดับความสำคัญของแต่ละปัจจัย จึงมีความสนใจในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาตัวแปรที่มีความสำคัญต่อผลลัพธ์มากที่สุด และทำนายประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน

การล้างทำความสะอาดดินโดยการนำน้ำประปามาเป็นสารล้างนั้น นอกจากอาศัยการใช้แรงเฉือนระหว่างน้ำกับอนุภาคดิน ยังมีแนวคิดในการนำฟองอากาศขนาดเล็กมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด เนื่องจากฟองอากาศขนาดเล็กสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมกันภายในถังปฏิกรณ์ และเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างดินกับสารล้างมากยิ่งขึ้น ฟองอากาศขนาดเล็กยังสามารถทำให้ตะกอนบางส่วนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (Bensadok และคณะ, 2015) นอกจากนี้การแยกดินออกจากสารล้างภายหลังการทำความสะอาดดินก็เป็นประเด็นที่จะต้องพิจารณา จึงมีแนวคิดในการประยุกต์ใช้เซรามิคเมมเบรนในการแยกอนุภาคดิน เนื่องจากเป็นวิธีการแยกอนุภาคออกจากน้ำที่มีประสิทธิภาพ (Cai และคณะ, 2018) ซึ่งเมมเบรนชนิดดังกล่าวยังสามารถใช้ในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กสำหรับใช้ประโยชน์ในการล้างอีกด้วย ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวจะถูกใช้เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการล้างดินปนเปื้อนน้ำมันที่มีประสิทธิภาพต่อไป

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดินปนเปื้อนด้วยน้ำประปา เพื่อช่วยลดปริมาณการใช้สารล้างและค่าใช้จ่ายในการล้าง โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้น้ำประปาเป็นสารล้างเพื่อทำความสะอาดดินปนเปื้อนน้ำมันในขั้นต้น สำหรับ

กำจัดสารไฮโดรคาร์บอนบางส่วนออกจากของดินปนเปื้อน และใช้เซรามิคเมมเบรน (Ceramic membrane) สำหรับสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก และแยกอนุภาคดินปนเปื้อนภายหลังการล้าง ซึ่งจะทำการหาสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมเพื่อเป็นหนึ่งในทางเลือกในการบำบัดดินปนเปื้อนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันจากการขุดเจาะปิโตรเลียม ด้วยวิธีการล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำ

1.2.2 เพื่อพัฒนาถึงปฏิกรณ์ สำหรับกำจัดน้ำมันปนเปื้อนในดินจากการขุดเจาะปิโตรเลียม โดยใช้น้ำและฟองอากาศขนาดเล็ก

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ โดยดำเนินการที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.3.1 ศึกษาลักษณะดินปนเปื้อนน้ำมันที่มาจากการขุดเจาะที่มาจากแหล่งขุดเจาะน้ำมันจริง

1.3.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดดินในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ได้แก่ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน ความเร็วในการเขย่า อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาและดินปนเปื้อน และค่าพีเอชที่ใช้ในการล้าง

1.3.3 ศึกษาการสร้างฟองอากาศ และกรองอนุภาคของเซรามิคเมมเบรน

1.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการออกแบบถึงปฏิกรณ์ สำหรับการล้างดินปนเปื้อนน้ำมัน ด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ต้นแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันด้วยวิธีการล้างดินโดยใช้น้ำและฟองอากาศขนาดเล็ก

1.4.2 แนวทางการออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยวิธีการล้างดินโดยใช้น้ำและฟองอากาศขนาดเล็ก

1.4.3 สภาพะการเดินระบบที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันอย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.4 กระบวนการล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำประปาจะเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปิโตรเลียม (Petroleum)

##### 2.1.1 นิยาม (Definition)

ปิโตรเลียม คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ธาตุองค์ประกอบหลักคือ ไฮโดรเจน และ คาร์บอน โดยมาจากการแปรสภาพของซากสิ่งมีชีวิต การสลายตัวของสารอินทรีย์ หรือ กรวด โคลน ททราย เกิดการทับถมหลายแสนล้านปีแล้วกลายสภาพเป็นชั้นหินต่าง ๆ ภายใต้ความร้อน และ ความดันที่เหมาะสม ทำให้กลายมาเป็นปิโตรเลียม องค์ประกอบของปิโตรเลียม ทำให้สถานะของปิโตรเลียมแตกต่างกัน ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เมื่อนำมาถลุง หรือเข้ากระบวนการแยก ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์รูปแบบต่าง ๆ

##### 2.1.2 กระบวนการสำรวจและผลิตปิโตรเลียม

แหล่งปิโตรเลียมจะประกอบไปด้วยหิน 3 แบบ ได้แก่ (1) หินก่กำเนิด โดยความร้อนจะเปลี่ยนให้หินกลายเป็นน้ำมัน (2) หินกักเก็บ สามารถทำให้น้ำมันไปสะสมได้ เนื่องจากมีรูพรุน และความสามารถในการซึมผ่าน (3) หินครอบ ทำให้น้ำมันไม่เคลื่อนตัวออกไปจากพื้นผิว โดยแหล่งปิโตรเลียมนี้จะมีของไหลจัดเรียงกันสามชั้น นั่นคือ แก๊ส น้ำมัน น้ำ เมื่อเรียงจากด้านบนลงข้างล่างตามลำดับ เมื่อปริมาณของไฮโดรคาร์บอนเข้มข้นมากขึ้น ทำให้สามารถสกัดน้ำมันออกมาด้วยวิธีการขุดเจาะ การสำรวจหาแหล่งปิโตรเลียมสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

##### 2.1.2.1 ขั้นตอนการสำรวจหาข้อมูล (Exploration)

ขั้นตอนการสำรวจหาข้อมูลมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นหิน และโครงสร้างทางธรณีวิทยา สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทได้แก่

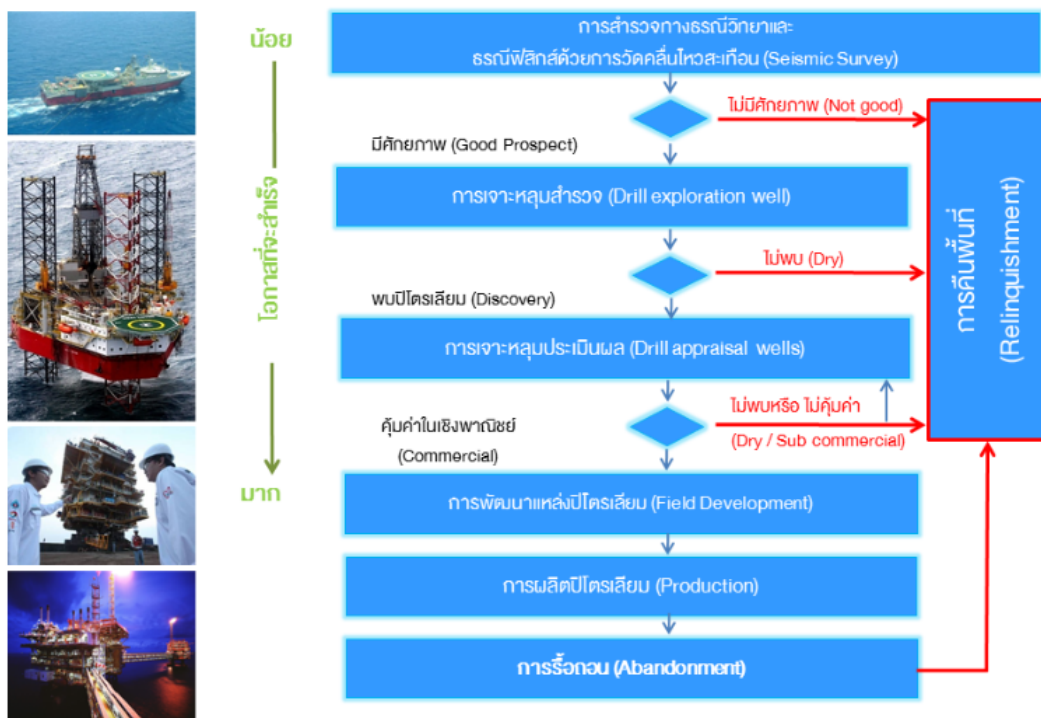
- การเก็บตัวอย่างหิน (Core drilling) การนำตัวอย่างหินจากหลุมขุดเจาะหลาย ๆ หลุมมาศึกษา เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้าง และชนิดของหินแต่ละประเภท
- การใช้คลื่นสั่นสะเทือน (Seismic prospecting) การใช้วัตถุระเบิดลงไปใหลุมทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของชั้นหินกลับขึ้นมาสู่ชั้นผิวดินเพื่อตรวจสอบโครงสร้างทางธรณีวิทยา
- การใช้แรงโน้มถ่วง (Gravity prospecting) ชั้นหินที่วางอยู่ในระนาบเดียวกันอาศัยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงเป็นหลัก และหลักการวัดค่าความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ

### 2.1.2.2 ขั้นตอนการขุดเจาะ (Drilling)

การเจาะหลุมสำรวจ โดยมาจากการรวบรวมข้อมูลการสำรวจทางธรณีวิทยา ธรณีฟิสิกส์ จะทำการเจาะหลุมสำรวจใต้ผิวดิน การขุดเจาะหลุมเพื่อสำรวจจะใช้ความลึก 3 ถึง 4 กิโลเมตรจากใต้พื้นทะเล ระยะเวลาสำหรับการขุดเจาะ แต่ปัจจุบันใช้ระยะเวลาประมาณ 4 ถึง 5 วัน เนื่องจากเทคโนโลยีที่ทันสมัยขึ้น ซึ่งใช้วิธีการสูบลมเจาะ เพื่อดูแหล่งสะสมของปิโตรเลียม เมื่อพบปิโตรเลียมจะทำการค้นหาหลุมถัดไป เพื่อเป็นหลุมประเมินผล (Delineation well) ทำให้ทราบถึงขอบเขตของความสามารถในการผลิตปิโตรเลียมต่อไป (Development well)

### 2.1.2.3 ขั้นตอนการผลิต (Production)

วัตถุประสงค์เพื่อนำน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติไปใช้ในกระบวนการผลิต อื่น ๆ จากการแยกน้ำ สารปนเปื้อน และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ออกจากน้ำมัน ขั้นตอนการสำรวจ และผลิตปิโตรเลียมแสดงดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 กระบวนการสำรวจ และผลิตปิโตรเลียม

(<https://www2.pttep.com/Energyliteracy/PTTEP>)



#### 2.1.2.4 ขั้นตอนการสละหลุม (Abandonment)

วัตถุประสงค์เพื่อป้องกันไม่ให้ของไหลจากชั้นหินที่ขุดเจาะไหลไปยังชั้นหินอื่น โดยจะทำการอัดซีเมนต์ลงท่อผลิต แต่จะดำเนินการเมื่อหลุมขุดเจาะไม่ได้ใช้งานแล้ว

## 2.2 ชนิดของปิโตรเลียม

### 2.2.1 แก๊สธรรมชาติ (Natural gas)

แก๊สธรรมชาติ สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด ได้แก่

- แก๊สแห้ง คือ แก๊สที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนร้อยละ 70 ขึ้นไป
- แก๊สชื้น คือ แก๊สที่มีองค์ประกอบของบิวเทน โพรเพน หรือแก๊สธรรมชาติ

### 2.2.2 น้ำมันดิบ (Crude oil)

น้ำมันดิบ สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ได้แก่ (นุรักษ์ กฤษดาอนุรักษ์, 2543:52)

#### (1) น้ำมันดิบชนิดที่ไม่มีไขมาก (Paraffin base)

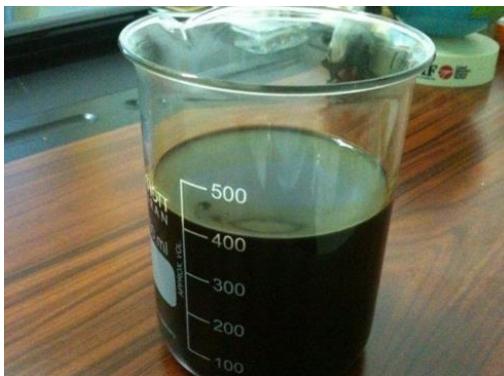
คือน้ำมันที่มีจุดไหลเทสูง ช่วงของการกลั่นน้ำมันจะอยู่ระหว่างน้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา โดยสามารถแข็งตัว และมีสีเหลืองจากการตั้งทิ้งไว้ในบรรยากาศ ตัวอย่างของน้ำมันประเภทนี้คือ สบู่ วาสลิน เป็นต้น ดังภาพที่ 2-2

#### (2) น้ำมันดิบชนิดที่มียางมะตอยมาก (Naphthenic base)

คือน้ำมันที่มีความหนืดปานกลางและความหนืดต่ำมีไขมันปนอยู่น้อย แต่พบตะกอนของแอสฟัลท์อยู่มาก เมื่อกลั่นจะได้น้ำมันเบนซินที่มีค่าออกเทนสูง และได้ยางมะตอยมาก

#### (3) น้ำมันดิบชนิดผสม (Mixed base)

คือน้ำมันดิบที่ผสมทั้งพาราฟินและแอสฟัลท์ผสมกันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาทุกชนิด แต่ไม่ได้โดดเด่น ทั้งนี้ ชนิดของน้ำมันดิบขึ้นกับคุณสมบัติ และ ชนิดของไฮโดรคาร์บอน โดยเมื่อนำไปกลั่น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันไป



ภาพที่ 2-2 น้ำมันดิบชนิดที่ไม่มีไขมาก

(<https://www.tradekey.com/Paraffin-Base-Oil-engine.html>)

## 2.3 ประเภทของน้ำมัน

### 2.3.1 น้ำมันหล่อลื่น (Cutting oil) และน้ำมันหล่อเย็น (Cutting fluid)

กลุ่มน้ำมันที่ใช้ในการลดความร้อน เพื่อไม่ให้เกิดควัน หรือ เกิดประกายไฟ ช่วยการหล่อลื่น และ ลดการเสียดสี จากการ บดโลหะ เจียร ตัด เป็นต้น โดยเป็นน้ำมันที่มาจากพืช สัตว์ หรือ ผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ น้ำมันหล่อเย็นสามารถแบ่งออกได้ 4 ชนิด ได้แก่ (ปิติ ศรีแสงนาม, 2553)

Straight oils หรือ Cutting oil คือ น้ำมันล้วน ไม่ละลายน้ำ เช่น น้ำมันจากพืช สัตว์ หรือ น้ำมันสังเคราะห์

Soluble oil คือ น้ำมันผสมอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) น้ำมันละลายผสมน้ำ

Semi-synthetic fluids คือ น้ำมันผสมน้ำและสารเติมแต่ง

Synthetic fluids คือ สารเคมีช่วยทำความสะอาด (Detergent) และสารเติมแต่ง

### 2.3.2 น้ำมันดิบชนิดเบา (Light crude oil)

น้ำมันดิบที่มีลักษณะความหนาแน่นต่ำ และความหนืดต่ำ ไหลได้อย่างอิสระที่อุณหภูมิห้องมีค่า API สูงกว่า 31.1 ดีกรี ตัวอย่างเช่น น้ำมันดิบเบรนท์ (Brent Crude) ฯลฯ

### 2.3.3 น้ำมันดิบชนิดหนัก (Heavy crude oil)

น้ำมันดิบที่มีลักษณะหนืดข้น มีความหนาแน่นสูง มีค่า API ต่ำกว่า 22.3 ดีกรี ตัวอย่างเช่น แนฟทา (Naphtha) ฯลฯ โดยลักษณะของผลผลิตสารปิโตรเลียมแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ลักษณะของผลผลิตสารปิโตรเลียม

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	จุดเดือด (°C)	สถานะ	จำนวนอะตอมของคาร์บอน	ประโยชน์และการนำไปใช้
ก๊าซปิโตรเลียม	ต่ำกว่า 30	ก๊าซ	$C_1 - C_4$	ทำสารเคมี วัสดุสังเคราะห์ และเชื้อเพลิง
แนฟทาเบา	ต่ำกว่า 70	ของเหลว	$C_5 - C_6$	น้ำมันเบนซิน
แนฟทาหนัก	70 - 170	ของเหลว	$C_6 - C_{10}$	ทำสารเคมี น้ำมันเบนซิน
น้ำมันก๊าด	170 - 250	ของเหลว	$C_{10} - C_{14}$	เชื้อเพลิงเครื่องบิน และตะเกียง
น้ำมันดีเซล	250 - 340	ของเหลว	$C_{14} - C_{19}$	เชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล
น้ำมันหล่อลื่น	340 - 500	ของเหลว	$C_{19} - C_{35}$	น้ำมันหล่อลื่น
ไฮพาราฟิน	340 - 500	ของแข็ง	$C_{19} - C_{35}$	เทียนไข เครื่องสำอาง ยาขัดมัน และวัตถุดิบการผลิตผงซักฟอก
ปิทูเมน	สูงกว่า 500	ของแข็ง	มากกว่า $C_{35}$	ทำยางมะตอย ทำวัสดุกันซึม

ที่มา : เกรียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์, 2546

## 2.4 องค์ประกอบของน้ำมันดิบ

### 2.4.1 สารประกอบไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบไฮโดรคาร์บอน สามารถแบ่งออกได้ 4 ชนิด ได้แก่

#### 2.4.1.1 พาราฟิน (Paraffins)

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว สูตรโครงสร้างคือ  $C_nH_{2n+2}$  โดยมีสถานะเป็นแก๊ส ที่ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ โดยจะละลายอยู่ในน้ำมันดิบ สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด ได้แก่ นอร์มอลพาราฟิน (n-Paraffins) และ ไอโซพาราฟิน (i-Paraffins)

#### 2.4.1.2 แนฟทีน (Naphthenes)

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนวงแหวนที่อิ่มตัว โดยเป็นกลุ่มของสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเลียม แนฟทีนมีสูตรทั่วไปคือ  $C_nH_{2n}$  สารประกอบเหล่านี้มีลักษณะโดยมีอะตอมคาร์บอนที่อิ่มตัวอย่างน้อยหนึ่งวง แนฟทีนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์โรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมเหลว น้ำมันดิบของแนฟทีนสามารถเปลี่ยนเป็นน้ำมันเบนซินได้ง่ายกว่าน้ำมันที่มีส่วนผสมของพาราฟิน

### 2.4.1.3 โอลิฟินส์ (Olefins)

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว โดยมีสถานะเป็นแก๊ส ที่ความดันบรรยากาศ โดยจะละลายอยู่ในน้ำมันดิบ ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนที่มีอะตอมหนึ่งหรือหลายคู่ที่เชื่อมกันด้วยพันธะคู่หรือพันธะสาม โดยโอลิฟินส์เป็นสารประกอบที่มีไฮโดรเจนและคาร์บอนเท่านั้นและมีพันธะคู่หรือสามอย่างน้อยหนึ่งตัว ซึ่งสามารถจัดแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ วงกลมหรืออะลิฟาติก (aliphatic) และกลุ่ม mono-olefins, di-olefins, tri-olefins ฯลฯ

### 2.4.1.4 อะโรมาติกส์ (Aromatics)

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว โดยไฮโดรคาร์บอนจะมีโครงสร้างเป็นวงดังภาพที่ 2-3 เช่น เบนซีน ( $C_6H_6$ ) มีความเสถียร เนื่องจากสามารถเกิดการรีโซแนนซ์ได้



ภาพที่ 2-3 วงแหวนเบนซีน (Benzene model)

([https:// www.wirotty.blogspot.com/2012/02/alomatic](https://www.wirotty.blogspot.com/2012/02/alomatic))

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 2.4.2 สารประกอบที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอน สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ได้แก่

### 2.4.2.1 สารประกอบไนโตรเจน

สารประกอบไนโตรเจนสามารถส่งผลกระทบต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม โดยสารประกอบไนโตรเจนมีความเสถียรมากกว่าสารประกอบซัลเฟอร์

### 2.4.2.2 สารประกอบออกซิเจน

สารประกอบออกซิเจนในน้ำมันดิบ สามารถแบ่งสภาพ 2 แบบ ได้แก่ กรดอ่อน และ ไม่มีความเป็นกรด

### 2.4.2.3 สารประกอบซัลเฟอร์

รูปซัลเฟอร์ในน้ำมันดิบ เช่น RSH, COS, CS<sub>2</sub> โดยบางตัวที่ไม่เสถียร จะทำให้เปลี่ยนสภาพเป็น H<sub>2</sub>S (ซัลเฟอร์อนินทรีย์)

### 2.4.3 สารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organometallic compounds)

2.4.3.1 สารประกอบโลหะอินทรีย์ เช่น Hg, As เป็นต้น

2.4.3.2 สารประกอบเกลืออนินทรีย์ เช่น NaCl, CaCl<sub>2</sub> เป็นต้น โดยสามารถทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ซึ่งเกลืออนินทรีย์จัดเป็นวัสดุสำคัญทางอุตสาหกรรมเคมี เนื่องจากสามารถทำให้เป็นคลอรีน โซเดียมไบคาร์บอเนต โซดาไฟ และกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น

## 2.5 รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

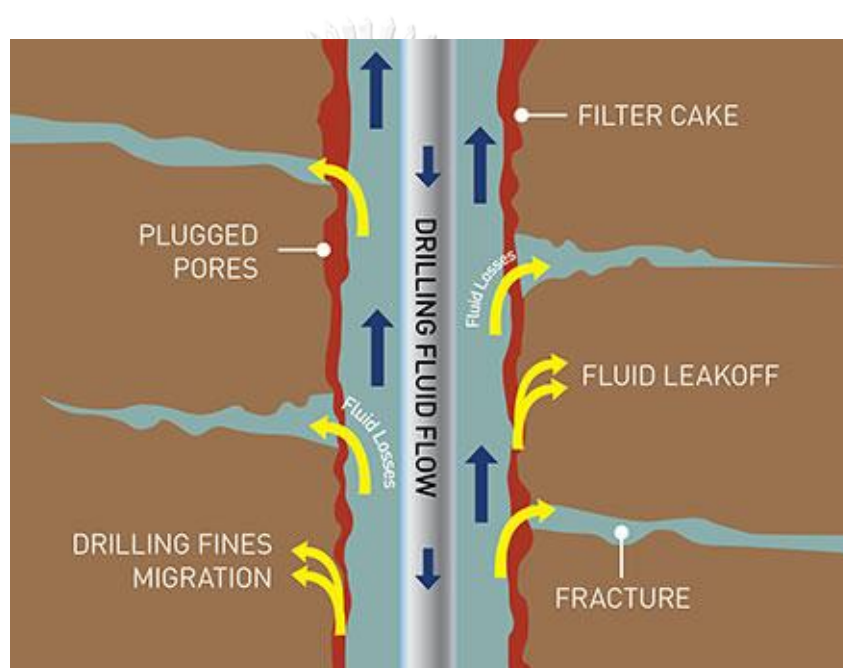
รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม สามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ (Ministry for the Environment, New Zealand (1999)) ได้แก่

- เฟสของแข็ง (Solid phase) คือ ของเสียปนเปื้อน ตัวอย่างเช่น ตะกอนน้ำมันที่พื้นทะเล ชั้นทราย ชั้นหิน แนวปะการังที่อาจเกิดการปนเปื้อน
- เฟสของเหลว (Liquid phase) คือ เฟสที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางน้ำในรูปน้ำมัน สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก (Refractory organic substance)
- เฟสแก๊ส (Gas phase) คือ การปนเปื้อนที่เกี่ยวข้องกับมลพิษอากาศ ตัวอย่างเช่น NO<sub>x</sub> SO<sub>x</sub> และ VOCs ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และความดัน
- 

## 2.6 ของเสียจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม (Drill cuttings)

ของเสียที่มาจากกระบวนการขุดเจาะปิโตรเลียม ประกอบด้วย โคลนเจาะ (Drilling muds) และของเสียจากการขุดเจาะ (Drill cuttings) ซึ่งมีทั้งหิน กรวด ทราย ผสมกันหลากหลายขนาด โดยของเสียเหล่านี้สามารถนำไปสู่การปนเปื้อนของดิน และ น้ำใต้ดิน โดยพบว่าของเสียจะประกอบไปด้วย ของไหลสำหรับการขุดเจาะ (Drilling fluid) แสดงดังภาพที่ 2-4 วัตถุประสงค์เพื่อหล่อลื่นการเจาะ และ ขนส่งวัสดุไปยังพื้นผิว เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง การจัดการมีหลากหลายวิธี สามารถทำได้โดย

การหมุนเหวี่ยง (Centrifuges) หรือการใช้ตะแกรงคัดตัวอย่าง (Shale shaker) เป็นต้น โคลนเจาะ (Drilling muds) สามารถแบ่งตามส่วนประกอบพื้นฐานได้ 3 ประเภท ได้แก่ น้ำ (Water-based) น้ำมัน (Oil-based) และสารสังเคราะห์ (Synthetic-based) โดยโคลนสังเคราะห์จะนิยมใช้มากที่สุด เนื่องจาก มีการย่อยสลายตามธรรมชาติง่าย และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ องค์ประกอบหลักของ โคลนเจาะ มาจากการผสมกันของน้ำ น้ำมัน หรือ สารสังเคราะห์ เพื่อเพิ่มความหนืด ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการที่เหมาะสม เนื่องจากของเสียเหล่านี้จัดเป็นดินที่ปนเปื้อนน้ำมันจากกระบวนการขุดเจาะ (Almeida, 2017)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 2-4 ของไหลสำหรับการขุดเจาะ (Drilling fluid)

(<http://www.gumprodf.com/drilling-fluids-2>)

เทคโนโลยีทางเลือกสำหรับการจัดการของเสียจากกระบวนการผลิตปิโตรเลียม สามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ (Speight, 2015)

(1) Offshore discharge:

การถูกปล่อยออกที่บริเวณเดียวกันของหลุมนอกชายฝั่งตามข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อมและหลังจากผ่านการบำบัดแล้วในเครื่องอบแห้ง (Cuttings dryer system, CDS)

## (2) Onshore disposal:

ของเสียจากกระบวนการขุดเจาะจากเครื่องอบแห้ง (Cuttings dryer system, CDS) จะถูกจัดเก็บไว้ชั่วคราวในกล่องเก็บตัวอย่าง (Cutting boxes, CB) และใช้เครนยกและจัดส่งทางถนนไปยังสถานที่บำบัดเพื่อทิ้งของเสียเหล่านี้และนำไปฝังกลบเนื่องจากเป็นของเสียอุตสาหกรรม

## (3) Offshore re-injection:

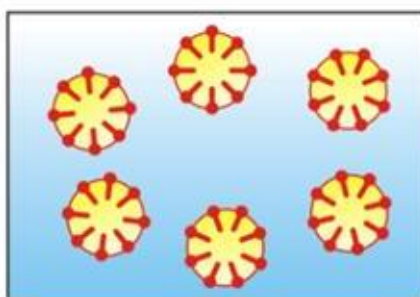
การนำของเสียจากการขุดเจาะปิโตรเลียมฉีดเข้าไปในบริเวณนอกชายฝั่ง แต่ต้องนำไปอบแห้งก่อนแล้วฉีดลงไปอยู่ในชั้นหินที่ปลอดภัย

## (4) Microwave treatment:

การนำของเสียจากการขุดเจาะปิโตรเลียมหลังจากอบแห้งแล้วจะเก็บไว้ในกล่องตัวอย่างชั่วคราวและใช้รถเครนขนส่งไปกำจัดต่อโดยใช้เครื่องมือทางคลื่นไมโครเวฟช่วยให้ของเสียแห้งและส่งไปยังแหล่งฝังกลบต่อไป

## 2.7 อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier)

อิมัลซิไฟเออร์ คือ สารที่ช่วยป้องกันไม่ให้อิมัลชันแยกเป็นชั้น นั่นคือ สารที่ใช้ลดแรงตึงผิว (Surface tension) โดยอิมัลซิไฟเออร์มีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะหันส่วนที่ชอบน้ำเข้าหาน้ำ และหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าหาน้ำมัน เกิดเป็นฟิล์มหุ้มส่วนที่กระจายตัวไว้ โดยการทำงานของอิมัลซิไฟเออร์แสดงดังภาพที่ 2-5 โดยในขั้นตอนการเตรียมการขุดเจาะปิโตรเลียม มีการอัดแก๊สและอากาศลงไปในช่วงขั้นตอนการใช้อัลตราโซนิคร่วมด้วย ซึ่งภายในการขั้นตอนการขุดเจาะมีการใส่อิมัลซิไฟเออร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำมันได้มากขึ้น

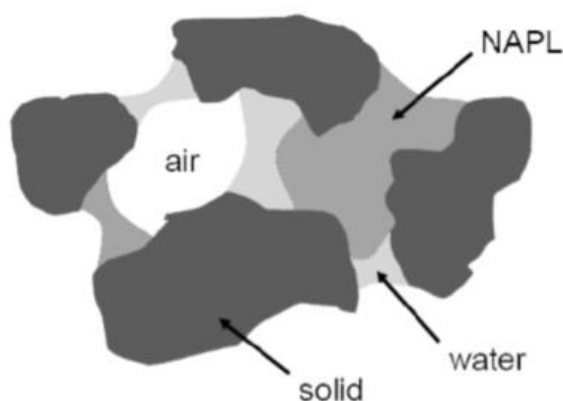


ภาพที่ 2-5 การทำงานของอิมัลซิไฟเออร์

(<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0674/emulsion>)

## 2.8 การปนเปื้อนน้ำมันลงสู่ดิน

เมื่อมีการรั่วไหลของน้ำมันลงสู่ดิน ทำให้ดินสามารถดูดซับน้ำมันเหล่านี้ไว้ได้ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับ และปริมาณช่องว่างของตัวดินด้วย ซึ่งถ้าดินมีการปนเปื้อนของน้ำมันในปริมาณมากจะไม่สามารถทำให้ดินสามารถดูดซับได้ เนื่องจากชั้นดินมีการอิ่มตัว จึงทำให้ผ่านลงไปยังชั้นดินตามแรงดึงดูดของโลก จนมีโอกาสไปยังชั้นน้ำใต้ดินได้อีกด้วย ชั้นน้ำใต้ดินสามารถแบ่งออกเป็น 2 เขต ได้แก่ ชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated zone) ดังภาพที่ 2-6 เนื่องจากมีอากาศแทรกอยู่ และชั้นที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated zone) (Domenico and Schwartz, 1990)



ภาพที่ 2-6 การปนเปื้อนของชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ  
(Pankow and Cherry, 1996)

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปิโตรเลียมจะมีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยสามารถแยกตัวออกจากน้ำ จะเรียกตามลักษณะสารประกอบเหล่านี้คือ Non-aqueous phase liquid (NAPL) ซึ่งสามารถแบ่งออกด้วยความหนาแน่น 2 ชนิด ได้แก่

#### (1) Light non-aqueous phase liquid (LNAPL)

ของเหลวที่มีน้ำหนักเบากว่าน้ำ สารที่ปนเปื้อนจะซึมผ่านชั้นที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยจะเคลื่อนที่ตามแรงโน้มถ่วงโลก การเคลื่อนที่ของของเหลวจะเร็วเมื่อปล่อยสารปนเปื้อนปริมาณมากในเวลาสั้น ตัวอย่างเช่น ดีเซล น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบิน



(2) Dense non-aqueous phase liquid (DNAPL)

ของเหลวที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ เมื่อมีการปนเปื้อนลงสู่ดิน และน้ำใต้ดินจะทำให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ อันได้แก่ การละลายลงดิน (Dissolution) การระเหยสู่อากาศ (Vaporization) การดูดซับหรือดูดซึม (Sorption) โดยของเหลวเหล่านี้จะเคลื่อนที่ตามแรงโน้มถ่วงโลก มีคุณสมบัติความหนาแน่นสูง ความหนืดต่ำ ตัวอย่างเช่น Trichloroethylene (TCE), 1,1,1-Trichloromethane (TCA), Tetrachloroethylene (PCE)

## 2.9 เทคโนโลยีบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน

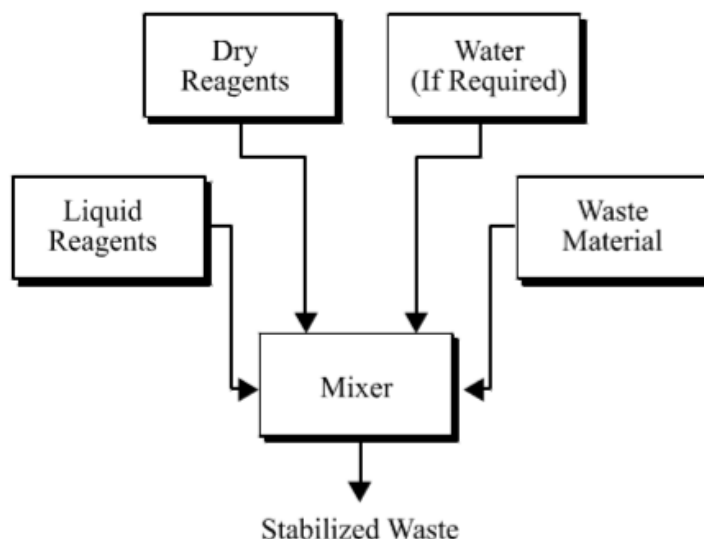
เทคโนโลยีการแยกน้ำมันออกจากดิน มีทั้งด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ เพื่อไม่ให้น้ำมันมีการแพร่กระจายไปมากกว่าเดิม โดยมีการบำบัดที่พื้นที่ 2 แบบคือ บำบัดฟื้นฟูในพื้นที่ (In-situ) คือ การบำบัดในกรณีที่ไม่สามารถฝังกลบได้ หรือไม่สามารถจัดเก็บได้ และ การบำบัดฟื้นฟูนอกพื้นที่ (Ex-situ) คือ การบำบัดในกรณีที่สามารถฝังกลบได้ หรือสามารถจัดเก็บได้ ซึ่งจะนำดินไปบำบัดให้ต่ำกว่ามาตรฐานแล้วจึงนำไปฝังกลบ (Wang and Lawrence, 2007) โดยการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่

- (1) การฟื้นฟูทางกายภาพ และเคมี (Physical and Chemical remediation)  
ตัวอย่างเช่น Soil flushing และ Soil vapor extraction (SVE) เป็นต้น
- (2) การฟื้นฟูทางกายภาพ (Physical remediation)  
ตัวอย่างเช่น การขุด/ตักดินออก (Excavation) เป็นต้น
- (3) การฟื้นฟูทางสิ่งแวดล้อมทางชีวภาพ (Bioremediation)  
ตัวอย่างเช่น Phytoremediation และ Landfarming เป็นต้น
- (4) การฟื้นฟูทางเคมี (Chemical remediation)  
ตัวอย่างเช่น การเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นรูปที่พิษน้อยลง

### 2.9.1 การปรับเสถียร (Solidification / Stabilization)

การกำจัดสารปนเปื้อนโดยมีหลักการผสมสารเคมีกับสิ่งปนเปื้อน เพื่อให้สารปนเปื้อนที่ถูกจับกับสารเคมีเกิดการชะล้างออกมาให้น้อยลง เพราะมีการจับตัวกันไว้ที่โครงสร้าง การ

ทดสอบความเป็นพิษของการถูกชะล้าง สามารถทดสอบได้จาก Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เพื่อให้มั่นใจก่อนนำไปฝังกลบ นอกจากนี้เทคโนโลยีการปรับเสถียรนี้ยังสามารถนำไปบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนจากการผสมของแข็งลงไปดินปนเปื้อน ซึ่งจะเหมาะกับกรณีพื้นที่ในการบำบัดจำกัด กระบวนการปรับเสถียรแสดงดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 กระบวนการปรับเสถียร (Solidification / Stabilization)  
(US.EPA, 2001)

### 2.9.2 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological degradation)

กระบวนการที่ทำให้อินทรีย์วัตถุในดินลดลง โดยเปลี่ยนให้สารอินทรีย์กลับมาอยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และกรดอินทรีย์ ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น ลักษณะและสมบัติของของเสีย อัตราการคงตัวของตัวสาร ชนิดของจุลินทรีย์ในดิน ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน เป็นต้น

### 2.9.3 การลดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจากการการระเหย (Soil Vapor Extraction)

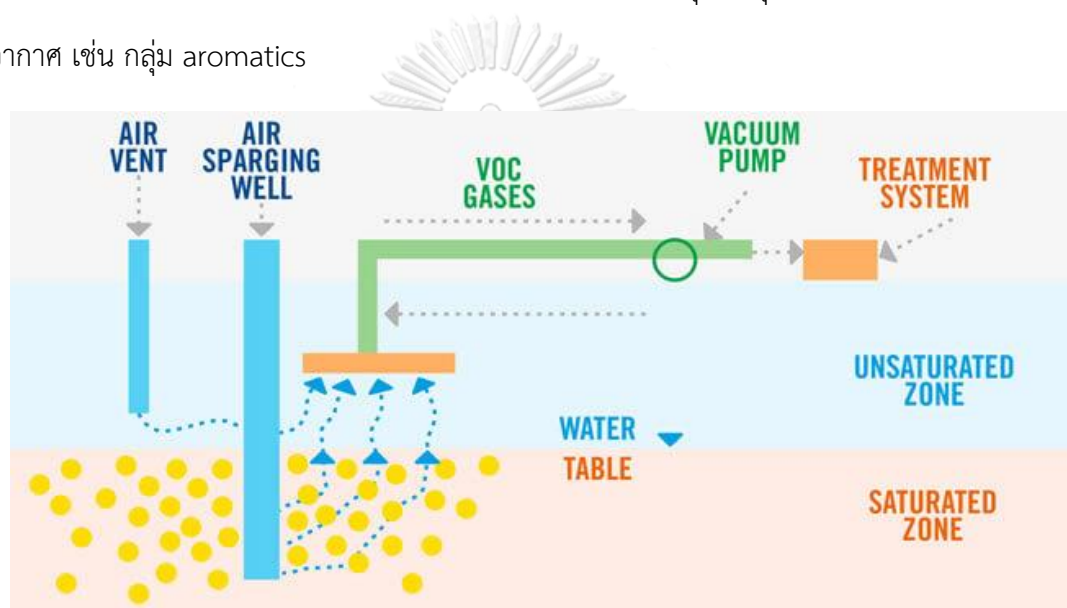
กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายออกจากดิน โดยการปล่อยอากาศให้ไหลผ่านดินที่ปนเปื้อน ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทมวลจากสารปนเปื้อนในดินไปสู่บรรยากาศ แสดงดังภาพที่ 2-8 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

## (1) การไล่ด้วยอากาศ (Air stripping)

การเติมอากาศลงไปดินปนเปื้อนและใช้เครื่องสูญญากาศสกัดอากาศที่มี การปนเปื้อนออกไป ซึ่งจะนิยมกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

## (2) การไล่ด้วยไอน้ำ (Steam stripping)

การฉีดไอน้ำลงไปยังดินใต้บริเวณที่ปนเปื้อน และใช้เครื่องสูญญากาศ ซึ่งมีการใช้ไอน้ำไล่สารปนเปื้อนออกจากน้ำโดยการกำจัดจะนิยมในกลุ่มที่มีคุณสมบัติระเหยง่ายกว่าใช้อากาศ เช่น กลุ่ม aromatics



ภาพที่ 2-8 กระบวนการลดความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจากการระเหยด้วยการไล่ด้วยอากาศ  
(<http://en.riccoboniholding.com/Soil-Vapor-Extraction-Systems>)

#### 2.9.4 การเผาที่อุณหภูมิสูง (Thermal treatment)

การเผาที่อุณหภูมิสูง แบบเตาเผาปูนซีเมนต์ (Cement kiln) โดยปัจจุบันถือเป็นเทคโนโลยีที่ถูกต้องตามข้อกำหนดพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 ว่าด้วยการจัดการของเสีย ซึ่งวิธีการเผาที่อุณหภูมิสูงนั้นเป็นที่นิยม เนื่องจากสามารถนำของเสียหลายชนิดมาเผา และเถ้าที่เหลือจะถูกเผาไหม้รวมกับวัตถุดิบเป็นเนื้อเดียวกับปูนซีเมนต์ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ที่ 1,450 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังประหยัดเวลา และไม่มีของเสียทิ้งสู่ภายนอกได้อีกด้วย

เทคโนโลยีการบำบัดดินปนเปื้อนทั้งหมดจากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปข้อดี และข้อจำกัดของแต่ละเทคโนโลยีดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ตารางเปรียบเทียบข้อดี และข้อจำกัดของเทคโนโลยีการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อจำกัด
1. Solidification/ Stabilization	1. ใช้กับสารปนเปื้อนได้ทุกประเภท 2. ลดการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนมากกว่าร้อยละ 95	1. ดินที่มีสภาพเสถียรอาจนำไปใช้ประโยชน์ยากในอนาคต 2. ถ้าดินมีความลึกเกิน 6 เมตร อาจไม่สะดวกต่อการบำบัดเทคโนโลยีนี้
2. Biological Degradation	ระบบบำบัดที่สมบูรณ์ในพื้นที่ โดยที่ไม่ต้องนำมลพิษไปบำบัดเพิ่มเติม	1. ระยะเวลาในการบำบัดนาน และฟื้นฟูพื้นที่ 2. โลหะหนักอาจเป็นพิษต่อจุลินทรีย์
3. Soil Vapor Extraction	1. ใช้กับการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ระยะเวลาในการบำบัดอยู่ระหว่าง 6 เดือน ถึง 1 ปี 2. สามารถนำสารมาแยกและนำกลับมาใช้ใหม่ได้	1. ถ้าดินมีความละเอียดมาก อาจจะต้องใช้แรงอัดสูงทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น 2. ต้องมีการบำบัดต่อหากพบไฮโดรคาร์บอนที่มีอันตราย
4. Thermal treatment	ระยะเวลาในการจัดการสั้น และไม่มีของเสียสู่ภายนอก	มีข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่าย

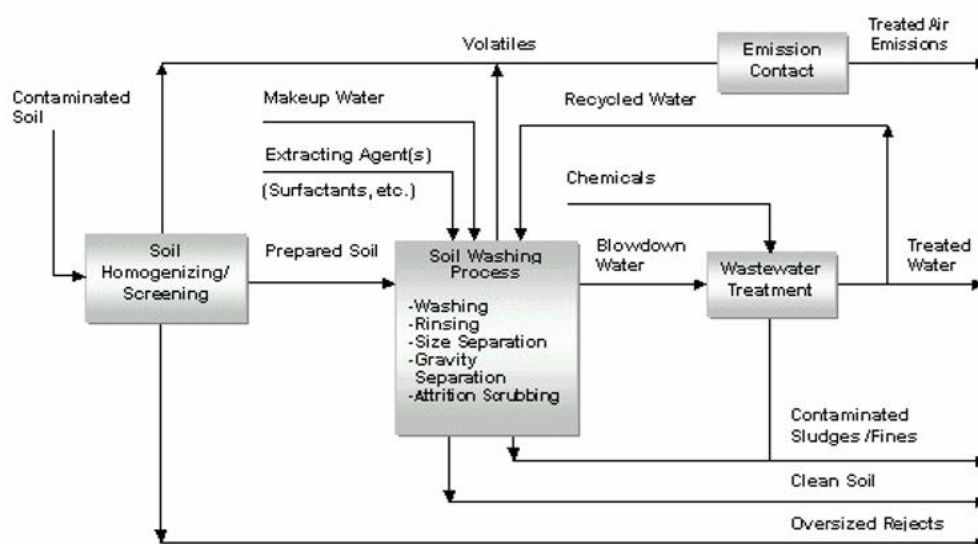
ที่มา : US.EPA, 2001

### 2.9.5 การล้างดิน (Soil washing)

การล้างดิน หรือ “ การขัดดิน (Soil washing) ” เป็นการนำดินที่มีการปนเปื้อนจากสารปนเปื้อนมาทำการล้างด้วยน้ำหรือสารละลาย เช่น สารลดแรงตึงผิว (Surfactants) หรือสารละลายกรดอ่อน สารละลายด่างอ่อน เพื่อให้สารปนเปื้อนนั้นหลุดออกมาจากอนุภาคของดิน ซึ่ง

เป็นหนึ่งในการฟื้นฟูแบบ Ex-situ (การฟื้นฟูโดยการเคลื่อนย้ายตัวกลางที่ปนเปื้อนไปบำบัดหรือกำจัดต่อในสถานที่อื่น) โดยสารละลายที่ใช้ในการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนอยู่นั้น จะถูกนำไปบำบัดต่อไปด้วยวิธีบำบัดแบบอื่น เช่น Thermal desorption หรือ Bioremediation หรือนำเอาไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบที่อนุญาตให้นำเอาดินที่ผ่านการบำบัดแล้วไปฝังกลบได้ การเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการล้างดินแสดงดังตารางที่ 2-3

ระบบการล้างดินจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ คือ Scrubbing unit และ Treatment unit แสดงดังภาพที่ 2-9 ซึ่งดินที่มีการปนเปื้อนจะเข้าสู่ระบบ Scrubbing unit โดยจะมีการเติมน้ำหรือสารละลาย ซึ่งสารปนเปื้อนที่หลุดออกมาจากอนุภาคดินจะละลายอยู่ในส่วนของเหลว จากนั้นของเหลวที่ผ่านระบบ Scrubbing Unit จะเข้าสู่ระบบ Treatment unit และทำการบำบัดสารปนเปื้อนตามวิธีการที่เหมาะสมต่อไป ส่วนดินที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นจะนำไปฝังกลบไว้ที่เดิม ระบบการล้างดินการทำต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อการทำ Soil washing เช่น พื้นที่ที่จะต้องมิไว้เพื่อเก็บดินที่ ขุดขึ้นมาเพื่อทำการบำบัด สถานที่ที่จะต้องใช้เป็นที่บำบัดน้ำเสียและบำบัดอากาศเสีย เป็นต้น (United States Environmental Protection Agency (USEPA) , 2001)



ภาพที่ 2-9 กระบวนการล้างทำความสะอาดดิน (Soil washing)  
(USEPA, 2001)

ตารางที่ 2-3 ตารางเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีการล้างดิน

ข้อดี	ข้อจำกัด
1.ลดปริมาณของวัตถุพิษเพื่อนำไปบำบัดต่อ	1. มีประสิทธิภาพต่ำในการล้างดินกรณีในสภาพของงานคั่นดินหรือดินถมบนชั้นดินอ่อน ส่งผลให้เกิดการพังทลาย และภัยพิบัติได้
2. สารลดแรงตึงผิวที่เติมเพื่อเพิ่มการละลาย โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารประเภท Non-toxic จึงมีผลกระทบต่อคนข้างต่ำหากหลงเหลือในดิน และมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ	2. อาจมีปฏิกิริยาระหว่างสารเติมในน้ำชะกาก จำเป็นต้องมีระบบการบำบัดในขั้นตอนต่อไป สำหรับน้ำชะกากที่สูบออกมาจากดินปนเปื้อน
3. ใช้ได้กับมลพิษในหลายกลุ่ม รวมถึงกลุ่ม กัมมันตรังสี กรณีเป็นมลพิษประเภทน้ำมันหรือของเสียปิโตรเลียมสามารถเข้ากระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้	3. ไม่เหมาะกับดินที่มีค่าการซึมสูง เนื่องจากดินจะยอมให้ของเหลวผ่านไปได้ง่าย เนื้อดินไม่มีการอัดตัว

ที่มา : US.EPA, 2001

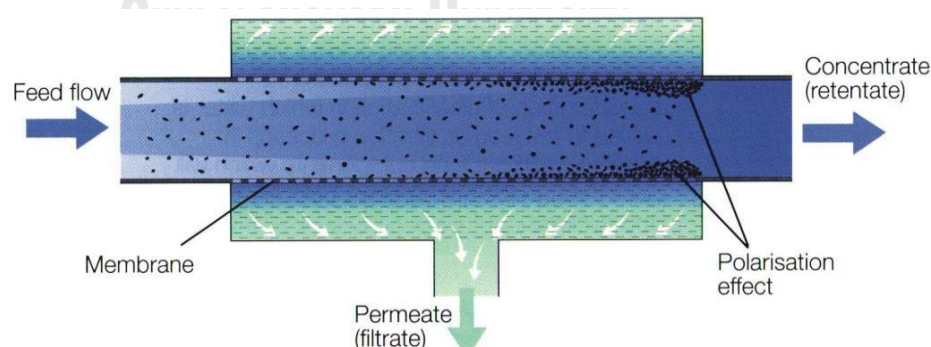
### การล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำ

การล้างทำความสะอาดดินสามารถแบ่งกลไกได้ 2 แบบ คือการใช้แรงทางกายภาพ (Physical force) และการชะละลายด้วยสารเคมี (Chemical solubilization) โดยการล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำจัดเป็นการใช้แรงกระทบทางกายภาพ (Physical impact force) โดยเริ่มต้นจากการชนกัน (Collision) ระหว่างดินปนเปื้อนและน้ำ หลังจากนั้นจะเป็นการกระทบกันของดินกับสิ่งปนเปื้อน นั่นคือน้ำมัน โดยน้ำจะเข้าไปในพื้นผิวของอนุภาคดินเพื่อทำการล้างทำความสะอาดทางกายภาพ และมีการทำงานของความเค้นเฉือน (Shear stress) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือน (Shear force) ของอนุภาคปนเปื้อนต่อพื้นที่ (Area) ของอนุภาคปนเปื้อน การใช้แรงการกระทบกันทางกายภาพมีมากกว่าแรงที่อนุภาคปนเปื้อนเกาะติดกับน้ำมัน สามารถทำให้สิ่งปนเปื้อนหลุดออกมาจากอนุภาคดินหรือลอยอิสระในของเหลว (Yong & Mulligan, 2003)

## 2.10 เมมเบรน (Membrane)

เมมเบรน คือ การกรองโดยใช้เยื่อบาง เพื่อทำให้ส่วนประกอบหลายชนิดในของเหลวแยกออกจากกัน ส่วนที่ไม่ถูกกรองผ่านเยื่อ นั้นคือ Retentate ซึ่งในน้ำบริสุทธิ์จะมีสารแขวนลอย หรืออนุภาคปะปนอยู่ ทำให้การกรองจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการกำจัดสารประกอบเหล่านี้ โดยจะใช้แรงดันทำให้ของเหลวที่เข้าไป เคลื่อนที่ขนาน หรือตั้งฉากกับผิวของเยื่อนั้น ทำให้ของเหลวที่ผ่านรูเยื่อกรอง นั้นคือ Permeate โดยจะไหลในทิศทางตั้งฉากกับเมมเบรน (Dead-end filtration) หรือไหลในทิศทางขนานกับเมมเบรน (Cross-flow filtration) ขึ้นอยู่กับการเดินระบบ ทำให้การกรองจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการกำจัดสารประกอบเหล่านี้ โดยกระบวนการเมมเบรน (Membrane process) สำหรับแยกสารละลายออกจากน้ำ หรือของเหลว การทำงานของเมมเบรนแสดงดังภาพที่ 2-10 และการแบ่งกลุ่มของเมมเบรนในการกำจัดเชื้อโรคแสดงดังภาพที่ 2-11 เมมเบรนสามารถแบ่งออกเป็น 5 แบบ ได้แก่ Reverse Osmosis (RO) Nanofiltration (NF) Ultrafiltration (UF) และ Microfiltration (MF) โดยลักษณะของเมมเบรน สามารถแบ่งแยกได้ดังนี้ (นลินี เหลืองรุ่งรอง, 2544)

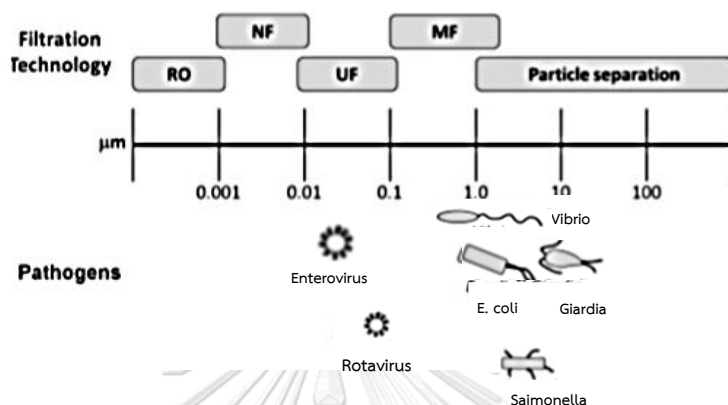
1. แบ่งตามวัสดุที่ทำและขนาดของรูพรุนน้ำ
2. แบ่งตามทิศทางการไหลของน้ำก่อนเข้าเมมเบรน
3. แบ่งตามกลไกในการกรอง – Filtration or Concentration polarization
4. แบ่งตามรูปทรงพื้นฐาน
5. แบ่งตามคุณภาพน้ำที่ต้องการใช้สำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ



ภาพที่ 2-10 การทำงานของเมมเบรน

(<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0674/emulsion>)

กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process) ทั้ง 5 แบบ ได้แก่ Microfiltration (MF) Ultrafiltration (UF) Nanofiltration (NF) และ Reverse Osmosis (RO) สามารถแบ่งลักษณะการใช้งานดังตารางที่ 2-4



ภาพที่ 2-11 การแบ่งกลุ่มของเมมเบรนในการกำจัดเชื้อโรค (Riley, 2014)

ตารางที่ 2-4 ชนิดของเมมเบรนตามการจำแนกด้วยการกรอง

ชนิดของเมมเบรน	ขนาดรูพรุน	สิ่งที่สามารถกำจัดได้	ความดันในการเดินระบบ
1. MF	$10^{-1} - 10^1 \mu\text{m}$	ของแข็งแขวนลอย, แบคทีเรีย, โปรโตซัว	0.1 – 2 บาร์
2. UF	$10^{-2} - 10^{-1} \mu\text{m}$	คอลลอยด์, อนุภาคโมเลกุล, โปรตีน, ไวรัส	1 – 5 บาร์
3. NF	$10^{-3} - 10^{-2} \mu\text{m}$	ไวรัส, สารประกอบอินทรีย์ในน้ำ (NOM)	5 – 20 บาร์
4. RO	$10^{-4} - 10^{-3} \mu\text{m}$	โลหะหนัก, ปุ๋ยเคมี	10 – 100 บาร์

ที่มา : JUN YIN, 2011



### 2.10.1 Microfiltration (MF)

กระบวนการกรองที่ใช้เยื่อสังเคราะห์ชนิด Micro filtration membrane เพื่อสามารถแยกอนุภาคขนาด 0.1 - 10 ไมครอน ให้ออกจากสารแขวนลอยทำให้น้ำใส ซึ่งโมเลกุลขนาดใหญ่จะเป็นส่วนที่แยกออกมา และโมเลกุลของแร่ธาตุต่าง ๆ สามารถผ่านได้บางส่วน

### 2.10.2 Ultrafiltration (UF)

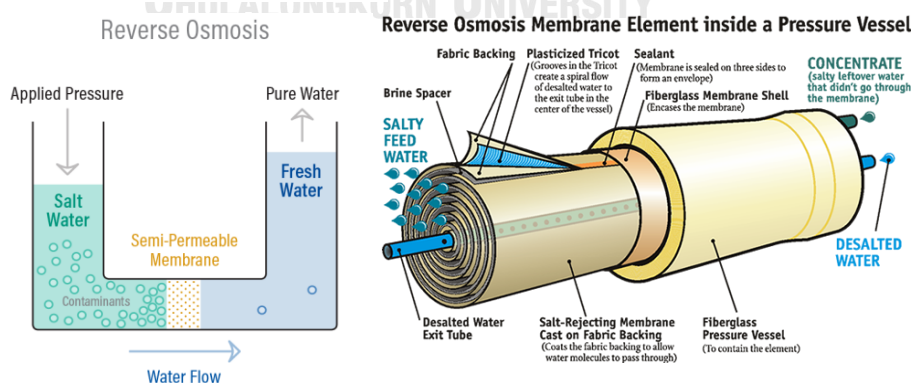
กระบวนการที่ทำวัสดุจากพอลิอะคริโลไนไตรล (Polyacrylonitrile) หรือพอลิซัลโฟน (Polysulfone) โดยมีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่กว่าแบบออสโมซิสผันกลับ อยู่ที่ 0.0001 - 0.01 ไมโครเมตร จึงทำให้แยกน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ๆ ออกไปได้ และความดันที่ประมาณ 5 - 10 บาร์

### 2.10.3 Nanofiltration (NF)

กระบวนการที่กรองสารจำพวกอนินทรีย์ (Inorganics) ที่ละลายออกจากน้ำ โดยสามารถกำจัดความกระด้างได้ ซึ่งรูปแบบของเมมเบรนในที่นี่คือ Hollow fiber, Tubular และ Spiral wound น้ำที่ผ่านการกรองออกไปจะไม่มีสารแขวนลอย และมีความละเอียดในการกรองน้อยกว่าแบบออสโมซิสผันกลับ

### 2.10.4 Reverse Osmosis (RO)

ออสโมซิสผันกลับ หรือออสโมซิสย้อนกลับ จะเป็นการกรองด้วยเยื่อชนิดหนึ่ง ที่ทำให้โมเลกุลของน้ำของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังสารละลายที่เจือจางกว่า โดยแสดงการทำงานของออสโมซิสย้อนกลับดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 การทำงานของออสโมซิสย้อนกลับ

(<http://www.treat.co.th/product/reverse-osmosis-ro/>)

ค่าความต้านทานเซรามิคเมมเบรนเริ่มต้นจากความสัมพันธ์ระหว่างเพอร์มีเอท ฟลักซ์กับค่าความดันผ่านเมมเบรนดังสมการที่ 2-1

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \quad (2-1)$$

เมื่อ	J	คือ	ค่าเพอร์มีเอทฟลักซ์ (L/m <sup>2</sup> .s)
	$\Delta P$	คือ	ค่าความดันผ่านเมมเบรน (kPa)
	$\mu$	คือ	ค่าความหนืดของสารละลาย (kN.s/m <sup>3</sup> )
	R <sub>m</sub>	คือ	ค่าความต้านทานของเมมเบรน (m <sup>-1</sup> )

ค่าความต้านทานรวมในระบบจากการเดินระบบ ที่ทำให้เกิดการสะสมตัวของอนุภาคในรูพรุนของเมมเบรน โดยนำเมมเบรนมาขัดล้างชั้นเค้กและวัดค่าความต้านทานกับน้ำสะอาดสามารถนำไปคำนวณดังสมการที่ 2-2

$$R_t = R_m + R_p + R_c \quad (2-2)$$

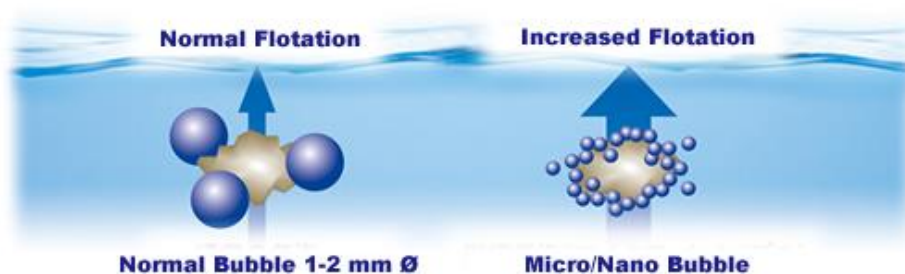
เมื่อ	R <sub>t</sub>	คือ	ค่าความต้านทานรวมในระบบ (m <sup>-1</sup> )
	R <sub>m</sub>	คือ	ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเมมเบรน (m <sup>-1</sup> )
	R <sub>p</sub>	คือ	ค่าความต้านทานจากการสะสมตัวของของแข็งภายในรูพรุนของเมมเบรน (m <sup>-1</sup> )
	R <sub>c</sub>	คือ	ค่าความต้านทานจากการสะสมตัวของชั้นเค้ก (m <sup>-1</sup> )

## 2.11 กระบวนการทำให้ลอย (Flotation)

กระบวนการทำให้ลอย คือ กระบวนการทางกายภาพ โดยจะแยกตะกอนออกจากน้ำเสีย ทำให้ตะกอนลอยไปยังชั้นบนของบริเวณผิวน้ำ และน้ำตะกอนเหล่านี้ก็วาดออกไปทิ้ง ซึ่งอาจจะมีการเติมสารเคมีเพื่อช่วยในการตกตะกอนด้วย เช่น การใช้ฟองอากาศ (Bubbles) ในการแยก ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของฟองอากาศจากการเพิ่มความแตกต่างของความหนาแน่น และเพิ่มขนาดของอนุภาค (Lemlich, 1984) โดยการเปรียบเทียบระหว่างฟองอากาศธรรมดา กับฟองอากาศขนาดเล็กแสดงดังภาพที่ 2-13

### 2.11.1 ขั้นตอนการเกิดกระบวนการทำให้ลอย

- |     |                         |                                    |
|-----|-------------------------|------------------------------------|
| (1) | Bubble generation       | การผลิตฟอง                         |
| (2) | Bubble-particle contact | การทำให้ฟองและอนุภาคเกาะติดกัน     |
| (3) | Separation              | การแยกชั้นระหว่างของแข็งและของเหลว |
| (4) | Sludge/Foam removal     | การกำจัดอนุภาคออก                  |



ภาพที่ 2-13 การเปรียบเทียบระหว่างฟองอากาศธรรมดา กับฟองอากาศขนาดเล็ก  
(<http://www.nano1.co.jp/en/nano1/bubbles.html>)

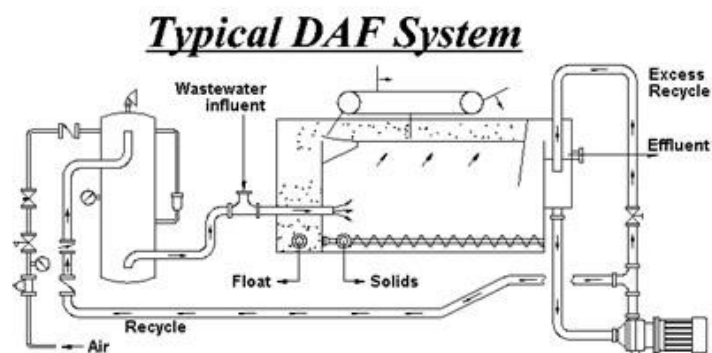
### 2.11.2 ประเภทของกระบวนการทำให้ลอย

โดยแบ่งตามวิธีการสร้างฟองอากาศ

- (1) การลอยตัวด้วยอากาศละลาย (Dissolved Air Flotation, DAF)

การอัดความดันที่ความดัน 2-6 บรรยากาศ แล้วความดันจะถูกปล่อยเข้าสู่บรรยากาศ สามารถทำให้อากาศละลายในน้ำที่พื้นที่ผิวมาก สร้างฟองอากาศที่ขนาดประมาณ 30 ถึง 100 ไมโครเมตร

- ข้อดี คือ มีประสิทธิภาพสูง, สามารถรับปริมาณน้ำเสียได้มาก เหมาะกับระบบบำบัดน้ำเสียน้ำประปา สามารถแยกตะกอนเบาได้ เช่น สาหร่าย น้ำมัน เป็นต้น
- ข้อเสีย คือ ใช้พลังงานสูง และกรณีน้ำขุ่นมากระบบจะมีปัญหาได้



ภาพที่ 2-14 ระบบการทำงานการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF)

(<http://thai-draftman.blogspot.com/dissolved-air-floatation-system-daf.html>)

## (2) การลอยตัวด้วยอากาศ (Induced Air Flotation, IAF)

การเป่าอากาศลงไปใต้น้ำเสียโดยตรงที่ความดันบรรยากาศ โดยจะทำให้เกิดฟองอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศ 1 ถึง 5 มิลลิเมตร ถ้าฟองอากาศมีขนาดใหญ่สามารถทำให้การลอยตัวเร็วขึ้นได้ด้วย

- ข้อดี คือ ระบบมีความง่าย ตรงไปตรงมา สามารถแยกอนุภาคขนาดใหญ่ได้ดี และการบำรุงรักษาต่ำ

- ข้อเสีย คือ เมื่อปิดระบบ สามารถก่อให้เกิดการตันได้ และมีประสิทธิภาพต่ำ จึงต้องใช้ร่วมกับสารเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 2.12 ฟองอากาศ (Bubble)

ค่าตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ (Bubble hydrodynamic parameters) (Painmanakul และคณะ, 2005)

#### 2.12.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter: $d_b$ )

ขนาดของฟองอากาศจะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของฟองอากาศ และความเร็วในการลอยตัว เมื่อฟองอากาศมีขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวของฟองอากาศจะลดลง ถ้าฟองอากาศพื้นที่ผิวเยอะ โอกาสชนกันระหว่างฟองอากาศจะมากขึ้น

$$\text{พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)} = \frac{\pi \times (A \times B)}{4} \quad (2-3)$$

$$\text{เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)} = 2\pi \times \left(\frac{1}{2} \times \left(\left(\frac{A}{2}\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}\right)$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)} = 1.55 \times \left(\frac{\text{พื้นที่ฟองอากาศ}^{0.25}}{\text{เส้นรอบรูปของฟองอากาศ}^{0.62}}\right) \quad (2-4)$$

เมื่อ  $A =$  ระยะแกนเอกของวงรี (มิลลิเมตร)

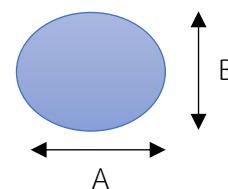
$$A = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

$B =$  ระยะแกนโทของวงรี (มิลลิเมตร)

$$B = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}$$

$x =$  ตำแหน่งของฟองอากาศตามแนวแกน  $x$

$y =$  ตำแหน่งของฟองอากาศตามแนวแกน  $y$



### 2.12.2 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: $U_b$ )

การวิเคราะห์ความเร็วในการลอยตัว วิเคราะห์ ณ จุดที่มีค่าคงที่ หรือความเร็วสุดท้ายจากกฎสมดุลแรงของนิวตัน (Newton's law) อันประกอบไปด้วย แรงลอยตัว (Buoyant force) แรงดึงดูดของโลกจากน้ำหนักของอนุภาค (Gravity force) และแรงเนื่องจากความเสียดทานของของไหลที่กระทำต่ออนุภาค (Drag force) ซึ่งพิจารณาที่ความเร็วของฟองอากาศมีความเร่งเป็นศูนย์ และความเร็วฟองอากาศคงที่

สมการความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ;

$$U_b = \sqrt{\frac{4(\rho_B - \rho_L)gd_b}{3C_D\mu}} \quad (2-5)$$

เมื่อ  $U_b$  คือ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (หน่วย เมตรต่อวินาที)

$\rho_B$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ (หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$P_l$	คือ ความหนาแน่นของของเหลวตัวกลาง (หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$g$	คือ ความเร่งโน้มถ่วง (หน่วย เมตรต่อวินาที <sup>2</sup> )
$d_b$	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค หรือฟองอากาศ (หน่วย เมตร)
$\mu$	คือ ความหนืดของของเหลวตัวกลาง (หน่วย กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)
$C_D$	คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศแสดงดังสมการที่ 2-5 เป็นสมการทางทฤษฎี โดยนอกจากการหาความเร็วลอยตัวของฟองอากาศสามารถหาค่าได้จากอีกหนึ่งสมการในทางปฏิบัติ และทำการคำนวณความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ สามารถทำได้จากการใช้กล้องถ่ายภาพที่มีอัตราการจับภาพประมาณ 60 frame/s ขึ้นไป ทำการถ่ายภาพฟองอากาศเทียบกับมาตรวัดความยาวขณะเต็มอากาศ และนำค่ามาวิเคราะห์ในสมการ 2-6

$$U_b = \frac{\Delta D}{t_{\text{Frame}}} \quad (2-6)$$

เมื่อ	$\Delta D$	คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ (หน่วย เมตร)
	$t_{\text{Frame}}$	คือ ช่วงเวลาของการถ่ายภาพ (หน่วย วินาที)

2.12.3 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency:  $f_b$ )

$$f_b = \frac{Q_g}{V_b} \quad (2-7)$$

เมื่อ	$Q_g$	คือ อัตราการไหลของอากาศ (หน่วย ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
	$V_b$	คือ ปริมาตรทั้งหมดของฟองอากาศ โดยสมมติให้ฟองอากาศเป็นทรงกลม (หน่วย ลูกบาศก์เมตร)

2.12.4 จำนวนฟองอากาศ (The number of bubbles:  $N_b$ )

$$N_b = \frac{f_B \times H_L}{U_B} \quad (2-8)$$

เมื่อ  $H_L$  คือ ความลึกของน้ำเหนือจุดเติมอากาศ (หน่วย เมตร)

2.12.5 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial area: a)

$$a = \frac{N_b \times S_b}{V_{total}} \quad (2-9)$$

$$= f_b \times \frac{H_L}{U_b} \times \frac{S_b}{V_{total}}$$

เมื่อ  $S_b$  คือ พื้นที่ผิวของฟองอากาศโดยสมมติให้ฟองอากาศเป็นทรงกลม (หน่วย ตารางเมตร)

$V_{total}$  คือ ปริมาตรรวมของน้ำและอากาศในถังปฏิกรณ์ (หน่วย ลูกบาศก์เมตร)

2.12.6 ความเร็วเกรเดียนต์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient, G)

$$G = \sqrt{\frac{P_c}{\mu V}} \quad (2-10)$$

$$P_c = KQ \ln \frac{h + 10.33}{10.33} \quad (2-11)$$

เมื่อ  $G$  คือ ค่าความปั่นป่วน (หน่วย ต่อวินาที)

$V$  คือ ปริมาตรน้ำ (หน่วย เมตร<sup>3</sup>)

$P_c$  คือ อัตราการให้พลังงาน (หน่วย วัตต์)

$K$  คือ ค่าคงที่เท่ากับ 1.689

$\mu$  คือ ความหนืดของของเหลวตัวกลาง (หน่วย กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที)

$Q$  คือ อัตราการไหลของอากาศ (หน่วย เมตร<sup>3</sup>ต่อวินาที)

$h$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศถึงผิวน้ำ (หน่วย เมตร)

2.12.7 เวลาการกักฟองอากาศ (Bubble detention time,  $t_{DB}$ )

$$t_{DB} = \frac{H_L}{U_B} \quad (2-12)$$

เมื่อ  $t_{DB}$  คือ เวลาการกักฟองอากาศ (วินาที)  
 $H_L$  คือ ความสูงของระดับน้ำ (เมตร)  
 $U_B$  คือ ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (เมตรต่อวินาที)

### 2.13 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับทางสถิติ โดยมีผลต่อการวิเคราะห์ปัญหา ผลตอบสนองที่ได้จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทำให้ผู้ที่ทำการทดลองจะได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการ แบบจำลองนี้ ตัวอย่างเช่น ผลตอบสนอง  $y$  เป็นฟังก์ชันของ  $x_1$  และ  $x_2$  จะสามารถเขียนในรูปแบบ สมการได้ดังนี้

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

เมื่อ  $\epsilon$  คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ  $y$  ที่มาจากการทดลอง

ถ้าเรากำหนดว่า  $E(y) = f(x_1, x_2) = \mu$  จึงได้สมการคือ  $\mu = f(x_1, x_2)$  ซึ่งการพล็อตกราฟฟังก์ชัน กับระดับของ  $x_1$  และ  $x_2$  สามารถช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยจะพล็อตเป็น เส้นโครงร่าง (Contour plot) เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะวาดอยู่ในระนาบ  $x_1$  และ  $x_2$  เส้นโครงร่าง จะมีความสูงพื้นผิวตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

ปัญหาการทำพื้นผิวตอบ นั้นคือการไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ จึงมีความจำเป็นที่ผู้ทดลองจะหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง  $y$  และกลุ่มตัวแปรอิสระ จึงนิยมใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้ตัวแปรอิสระ ถ้า แบบจำลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้น ฟังก์ชันที่ใช้ประมาณความสัมพันธ์คือแบบจำลองพหุนามกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 2-13

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (2-13)$$



ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาในระบบ ฟังก์ชันพหุนามจะมีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง แสดงดังสมการที่ 2-14

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, j \neq i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2-14)$$

การสร้างแบบจำลองแบบพหุคูณตอบไม่สามารถประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวนั้นมีขนาดใหญ่ การออกแบบพหุคูณตอบจึงจะมีวิธีการที่นำมาใช้การหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ เช่น การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่งและสอง วิธีการป็นขั้นด้วยที่ขั้นที่สุด เป็นต้น

## 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.14.1 กระบวนการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน

**Pekdemir และคณะ (2003)** ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างดินปนเปื้อนจากน้ำมันดิบด้วยสารลดแรงตึงผิวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Biosurfactant) 6 ชนิด ได้แก่ เอสซิน (Aescin) เลซิธิน (Lecithin) แรมโนลิปิด (Rhamnolipid) ซาโปนิน (Saponin) แทนนิน (Tannin) และสารลดแรงตึงผิวสังเคราะห์ นั่นคือ โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulphate) โดยศึกษาตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ปริมาตรของสารลดแรงตึงผิว ความเร็วในการเขย่า และ ระยะเวลาในการบำบัด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาในการบำบัด 10 นาที สำหรับทุกความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวทุกชนิด ซึ่งสารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ คือ โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulphate) แต่มีความเป็นพิษสูงกว่า แรมโนลิปิด (Rhamnolipid) และซาโปนิน (Saponin) ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัด 80 เปอร์เซ็นต์ โดยยังมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมต่ำและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย

**Urum และคณะ (2005)** ศึกษาการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันดิบโดยใช้กระบวนการอัดอากาศ (Air Sparging) ช่วยในถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างดิน เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 12 เซนติเมตร และความสูง 18 เซนติเมตร ใช้สารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด ได้แก่ แรมโนลิปิด (Rhamnolipid) และโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) ทำการศึกษาการล้างดิน 3 รูปแบบในถังปฏิกรณ์ ได้แก่ การกวนอย่างเดียว การอัดอากาศอย่างเดียว และการทำงานร่วมกันระหว่างการ

กวนและการอัดอากาศ พบว่าไซเตียมโตะเดคซิลซัลเฟสมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันได้ดีที่สุดถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้รูปแบบการล้างดินที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ การทำงานร่วมกันระหว่างการกวนและการอัดอากาศ สามารถบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันได้ถึง 92 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิในการล้างดิน 20 องศาเซลเซียส และระยะเวลาบำบัด 20 นาที

**Lee และคณะ (2017)** ศึกษาประสิทธิภาพการฟื้นฟูดินปนเปื้อนน้ำมันดีเซลด้วยระบบของเหลวสองเฟส (Two-liquid-phase system, TLP) โดยการทำงานของระบบของเหลวสองเฟสคือจะใช้สารเคมีผสมน้ำ (Water immiscible liquids) เป็นตัวทำละลาย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นของเหลวที่ไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ ทำให้สามารถแยกของเหลวออกจากน้ำได้ โดยระบบของเหลวสองเฟสสามารถละลายสารมลพิษอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำได้ ความเข้มข้นของน้ำมันดีเซลเริ่มต้นอยู่ที่ 12,000 ถึง 15,000 มก. / กก. ของดิน สารเคมีผสมน้ำ (Water immiscible liquids) ที่ใช้ คือ ซิลิโคน ออยล์ (Silicone oil) นำไปปั่นที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิ และความเร็วในการผสมเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันดีเซลคือ 80 เปอร์เซ็นต์ และ 90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสารประกอบแอลิแฟติก (Aliphatics) และอะโรมาติกส์ (Aromatics) ตามลำดับ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบของเหลวสองเฟสให้เป็นทางเลือกสำหรับการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนน้ำมันดีเซล

**Zubaidi และคณะ (2018)** ศึกษาการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิว และปริมาณน้ำมันหล่อลื่นแตกต่างกัน ทำการทดลองด้วยเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) โดยใช้กระบวนการแบบทีละเท (Batch process) ซึ่งดินและน้ำมันจะวิเคราะห์ทั้งในส่วนก่อน และหลังกระบวนการทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพ เตรียมดิน และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งวัน จากนั้นกวนผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมงในถังผสม ทั้งดินปนเปื้อนไว้ 3 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ภายใต้การสกัดด้วยตัวทำละลาย พบว่าน้ำมันที่ผ่านการบำบัดแล้ว จากดินที่ปนเปื้อนมีคุณสมบัติทางกายภาพดีขึ้นเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน พบว่าปริมาณคาร์บอนคงเหลือต่ำ เนื่องจากมีการดูดซับน้ำหนักโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนหนักภายในดินหลังจากขั้นตอนการสกัด

**Sun และคณะ (2019)** ศึกษาการบำบัดดินทรายที่ปนเปื้อนน้ำมัน ซึ่งใช้น้ำประปา ล้างทำความสะอาด ภายใต้การล้างทำความสะอาดในถังปฏิกรณ์ลักษณะเป็นคอลัมน์ ความสูง 25 เซนติเมตร โดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็ก ขนาด 50 ไมครอน ช่วยจับน้ำมันให้หลุดออกจากดิน ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษาคือระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน ได้แก่ 10 20 30 40 และ 50 นาที พบว่าระยะเวลาในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันที่เวลา 40 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนดีที่สุดในแง่ของค่าการดูดซับ โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดถึงร้อยละ 99.8 โดยพบว่าระยะเวลาในการเจือปนที่เหมาะสมระหว่างสารล้างและอนุภาคสามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อน และการใช้ฟองอากาศที่อัตราการไหลสูง ๆ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อน เนื่องจากมีความปั่นป่วนในถังปฏิกรณ์มาก ทำให้สารล้างสัมผัสกับดินปนเปื้อนได้มากยิ่งขึ้น

#### 2.14.2 การใช้เซรามิกเมมเบรนในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

**Cai และคณะ (2018)** ศึกษาประสิทธิภาพที่ทำจากพอร์ซอโนไดซ์อะลูมิเนียมออกไซด์ (PAAO) โดยพื้นผิวเมมเบรนมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย และตัวควบคุมคราบน้ำมันที่ควบคุมได้โดยพีเอช เพื่อแยกอิมัลชันน้ำมันในน้ำ โดยใช้เมมเบรนแบบพอร์ซอโนไดซ์อะลูมิเนียมออกไซด์ (PAAO) ขนาดรูพรุน น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งปรับวัสดุภายในเยื่อ PAAO ด้วยไวนิลไพรีดีน (3-Vinyl pyridine) ทำให้เมมเบรนมีประสิทธิภาพในการแยกอิมัลชันระหว่างน้ำมันและน้ำ โดยมีการปรับค่าพีเอชของน้ำ (3.0 และ 7.0) ยิ่งกว่านั้นสมาร์ตเมมเบรนสามารถป้องกันการกักครอนได้ดีกว่า ด้วยประสิทธิภาพการแยกอิมัลชันสูงถึง 99.95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการปรับปรุงคุณสมบัติของเมมเบรน โดยเฉพาะชนิด PAAO มีประสิทธิภาพในการแยกอิมัลชันระหว่างน้ำมันและน้ำได้สูง และมีเสถียรภาพ

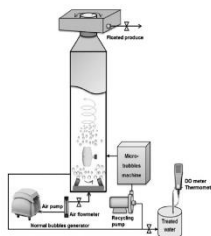
**Ma และคณะ (2018)** ศึกษาการประยุกต์ใช้เมมเบรนในการแยกอิมัลชันน้ำมันในน้ำ โดยใช้เมมเบรนชนิดอิเล็กโตรสปิน นาโนไฟบรัส (Electro spun nanofibrous) ซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็ก ความหนาสูง และมีการเคลือบที่ผิวเมมเบรนเพื่อให้มีการจับตัวของหยดอิมัลชันมากขึ้น จากคุณสมบัติการสร้างเยื่อของ Super hydrophobic โดยการแช่เยื่อหุ้มด้วยเยื่อไนโพลิมิด (PI) ในน้ำ เอทานอล แอมโมเนีย โดพามีน (Dopamine) โดยผสมกันทั้งหมด ตามด้วยการปรับเปลี่ยนเป็น 1H, 1H, 2H, 2H perfluorodecanethiol (PFDT) พบว่ามีมุมสัมผัสของหยดน้ำมากกว่า 153 องศา และมุมสัมผัสน้ำมันมีมุมใกล้เคียงกับ 0 องศา ทำให้เพิ่มเสถียรภาพทางเคมี การหมุนรอบของตัว

เมมเบรนถึง 20 รอบ และเมมเบรนมีฟลักซ์ที่มีความเข้มข้นสูงนั้นคือ  $8,018.5 \pm 100 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  การแยกอิมัลชันน้ำมันในน้ำมีประสิทธิภาพมากถึง 99 เปอร์เซ็นต์

**Li และคณะ (2018)** ศึกษาการใช้นาโนไฟเบอร์/ซิลิกา (Nanofiber/SiO<sub>2</sub>, N/S) เป็นตัวเคลือบเมมเบรนสำหรับแยกอิมัลชันน้ำมันในน้ำโดยใช้แผ่นโพลีเอไมด์ (PM) และเยื่อแผ่นโพลีไวนิล (Vinyl alcohol-co-ethylene) ที่เป็นนาโนเมมเบรน ที่เคลือบด้วย Super hydrophilic เพื่อให้มีการจับตัวของหยดอิมัลชันมากขึ้น และภายใต้แผ่นเคลือบนาโนไฟเบอร์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ของอนุภาคนาโนของ SiO<sub>2</sub> และคุณสมบัติทางกลของสารเคลือบ มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูง นอกจากนี้นาโนไฟเบอร์/ซิลิกา ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าผลการทดลอง ที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำสูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ และฟลักซ์ที่ความดัน 0.025-0.07 MPa

### 2.14.3 กระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก

**Imai และคณะ (2013)** ศึกษาประสิทธิภาพของฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubbles, MBs) และ ฟองอากาศขนาดปกติ (Normal cyclone bubbles, NBs) สำหรับการแยกอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ โดยการลอยผ่านคอลัมน์ (Column flotation) เตรียมตัวอย่างน้ำมันปาล์ม และน้ำประปา โดยดำเนินการทดลองในระบบที่ละเท (Batch process) ติดตั้งชุดการทดลอง ดังภาพ 2-15 โดยถึงปฏิกรณ์มีปริมาตรประมาณ 10 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 108 มิลลิเมตร และสูง 1,099 มิลลิเมตร ติดตั้งหัวพ่นฟองอากาศขนาดเล็กที่สามารถสร้างฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 16 ไมโครเมตร หัวพ่นฟองอากาศขนาดปกติ 2 จุดบริเวณด้านล่างถึงปฏิกรณ์ที่สามารถสร้างฟองอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 20 มิลลิเมตร ทำการเดินระบบโดยมีปริมาณความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำมัน 100 – 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ อัตราการไหลของอากาศ 10.8 ลิตรต่อนาที



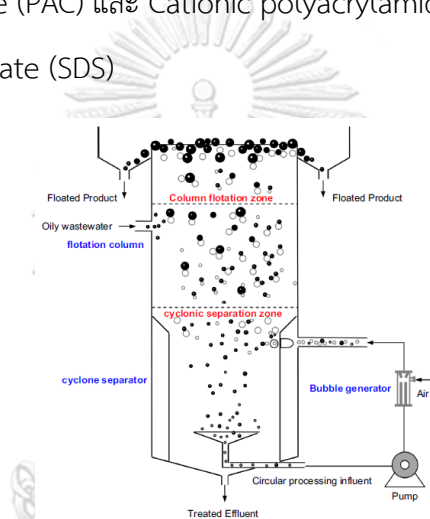
ภาพที่ 2-15 ชุดการทดลองบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันโดยกระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก (Imai และคณะ, 2013)

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก ได้แก่ ระยะเวลาในการบำบัด (0 5 30 และ 60 นาที) อัตราการไหลของฟองอากาศขนาดปกติ (0 ถึง 7.5 ลิตรต่อนาที) ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวอย่างน้ำมัน (103 501 และ 1009 มิลลิกรัมต่อลิตร) ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (3 5 7 และ 9) อุณหภูมิ (36 38 และ 45 องศาเซลเซียส) และความเข้มข้นของเกลือ (0 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร)

#### ผลการทดลองพบว่า

1. ระยะเวลาในการบำบัดเริ่มมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตั้งแต่ 30 นาทีขึ้นไป โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวอย่างน้ำมัน ระยะเวลาการบำบัดจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งขนาดหยดอิมัลชัน (EO droplets) ที่มีขนาดใหญ่จะใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้นกว่าหยดอิมัลชัน (EO droplets) ที่มีขนาดเล็ก
2. อัตราการไหลของฟองอากาศขนาดปกติที่มีประสิทธิภาพสูงสุด 86 เปอร์เซ็นต์ ที่ 2.5 ลิตรต่อนาที
3. ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำเพิ่มมากขึ้น (103 501 และ 1009 มิลลิกรัมต่อลิตร)
4. ค่าพีเอชเริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการทำให้ลอยเนื่องจากแยกอิมัลชันในน้ำ โดยการบำบัดสูงสุดเมื่อค่าพีเอชน้อยกว่า 7 โดยประสิทธิภาพการบำบัดสูงถึง 67 เปอร์เซ็นต์เมื่อพีเอชเท่ากับ 7
5. ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อลดอุณหภูมิ (36 38 และ 45 องศาเซลเซียส) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ จะเพิ่มปริมาตรของฟองอากาศทำให้เกิดการลดลงของพื้นที่ผิวของฟองอากาศ และสภาวะที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิน้อยกว่า 40 องศาเซลเซียส
6. ความเข้มข้นของเกลือ (0 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร) เพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้เพิ่มความสามารถในการกระทบกันระหว่างของฟองอากาศและหยดน้ำมัน โดยปริมาณความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถปรับค่าประจุที่พื้นผิวของฟองอากาศและหยดน้ำมัน ในลักษณะเดียวกับการลดขนาดของฟองอากาศ จึงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการลอยตัว

**Li และคณะ (2017)** ศึกษาการบำบัดอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำจากบ่อน้ำมันปิโตรเลียม โดยกระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubbles) ร่วมกับการทำงานของไซโคลน สำหรับหาประสิทธิภาพการบำบัดอิมัลชันน้ำมันในน้ำ คอลัมน์ที่ใช้ทดลองมี 3 ส่วนคือ คอลัมน์การทำให้ตะกอนลอยตัว, ส่วนที่แยกด้วยไซโคลน, ส่วนที่สร้างฟองอากาศ ติดตั้งชุดการทดลองดังภาพ 2-16 โดยน้ำเสียมีความหนืด 214.4 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มีปริมาณเกลือ 17 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด 1.33 มิลลิกรัมต่อกรัม และเตรียมอิมัลชันน้ำมันในน้ำ 1 ลิตรที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สารที่ช่วยจับกลุ่มอนุภาคสารที่ทำให้เกิดฟล็อก ได้แก่ Poly-aluminum chloride (PAC) และ Cationic polyacrylamide (PAM) และสารลดแรงตึงผิวคือ Sodium dodecyl sulfonate (SDS)



ภาพที่ 2-16 ชุดการทดลองคอลัมน์ทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็กแบบไซโคลนิก (Li และคณะ, 2017)

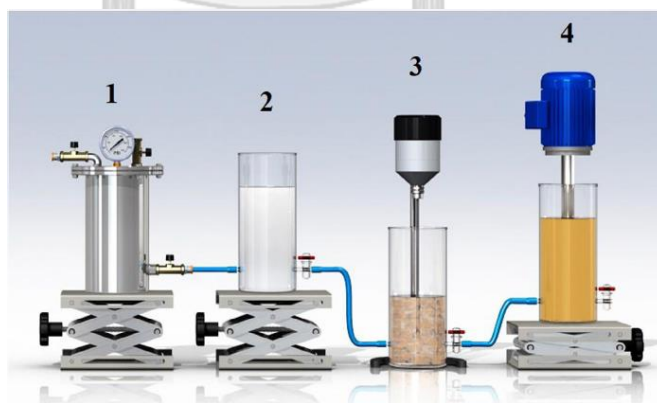
ทำการศึกษายังมีผลต่อกระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก ร่วมกับการทำงานของไซโคลน ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมัน (100 200 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร) อัตราการเติมอากาศ (0.8 ถึง 2.6 ลิตรต่อนาที) และ ขนาดของหยดน้ำมัน (10 ถึง 50 ไมโครเมตร)

ผลการทดลองพบว่า

1. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันเพิ่มขึ้น (100 200 300 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยส่วนของคอลัมน์ทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็กแบบไซโคลนิก (Cyclonic state micro-bubble flotation column, FCSMC) มีความเข้มข้นของน้ำมันน้อยกว่าส่วนของคอลัมน์ทำให้ลอยแบบอากาศละลาย (DAF) เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันเท่ากัน

2. อัตราการเติมอากาศที่เหมาะสมคือ 1.8 ลิตรต่อนาที โดยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการเติมอากาศ (0.8 ถึง 2.6 ลิตรต่อนาที)
3. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของหยดน้ำมันลดลง (10 ถึง 50 ไมโครเมตร) ส่วนของคอลัมน์ FCSMC มีประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันมากกว่า คอลัมน์ DAF เนื่องจากคอลัมน์ FCSMC พบขนาดหยดน้ำมันขนาด ประมาณ 5 ไมโครเมตร ซึ่งไม่พบขนาดอนุภาคมากกว่า 10 ไมโครเมตร แต่คอลัมน์ DAF พบขนาดหยดน้ำมันขนาด ประมาณ 10 ไมโครเมตร
4. คอลัมน์ FCSMC มีประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมัน 92.19 เปอร์เซ็นต์ และมีความเข้มข้นน้ำมันสุดท้ายเท่ากับ 37.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสังเกตว่าไม่มีหยดน้ำมันที่ขนาดมากกว่า 10 ไมโครเมตร

**Etchepare และคณะ (2017)** ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำมันในรูปอิมัลชันด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก (Microbubbles, MBs) โดยขนาดของไมโครบับเบิล (MBs) คือ 30 ถึง 40 ไมโครเมตร และฟองอากาศขนาดปกติ (Normal cyclone bubbles, NBs) โดยขนาดคือ 150 ถึง 350 นาโนเมตร ตัวช่วยตกตะกอน คือ โพลีอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide cationic (Dismulgan)) ที่ค่าพีเอช 7 ปริมาณสารละลาย 30 กรัมต่อลิตรของโซเดียมคลอไรด์ น้ำมันดิบ 1.6 กรัมในสารละลาย กวนผสม 24 รอบต่อนาทีเป็นระยะเวลา 10 นาที ชุดการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองแสดงดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 ชุดการทดลองบำบัดน้ำมันดิบอิมัลชันในน้ำเกลือ โดย 1. เครื่องทำให้น้ำอิมัลชันเพื่อสร้างฟองอากาศ 2.คอลัมน์การแยกด้วยฟองอากาศ 3.คอลัมน์การรวมตะกอนและทำให้ตะกอนลอยและเครื่องกวน 4.เครื่อง Ultra Turrax อิมัลซิไฟเออร์สำหรับการผสมกันของน้ำมันในน้ำ (Etchepare และคณะ, 2017)

ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทำให้ลอยด้วยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก ได้แก่ ความดันอิมตัว (2.5 3.5 5 และ 6 บาร์) ความเข้มข้นของ Dismulgan (1 ถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และการเติมและไม่เติม NaCl (30 กรัมต่อลิตร)

ผลการทดลองพบว่า

1. ความดันอิมตัวที่เพิ่มมากขึ้น (2.5 3.5 5 และ 6 บาร์) ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันเพิ่มขึ้น โดยผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ ความดันอิมตัวที่ 5 และ 6 บาร์ โดยประสิทธิภาพการกำจัดจะมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และ ความเข้มข้นของน้ำมัน เหลือน้อยกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยข้อสังเกตคือ เมื่อใช้ความดันอิมตัวที่ 3.5 บาร์ มีประสิทธิภาพการบำบัด 93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพียงพอสำหรับการบำบัด นั่นคือ เมื่อแรงดันอิมตัวต่ำ การใช้พลังงานน้อยลง
2. ความเข้มข้นของ Dismulgan ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเดินระบบคือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมัน 99 เปอร์เซ็นต์
3. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันเพิ่มขึ้น เมื่อเติม NaCl ในกระบวนการทำให้ลอยของระบบ โดยความเข้มข้นของน้ำมันหลังการบำบัดเมื่อเติม NaCl เท่ากับ 34 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ความเข้มข้นของน้ำมันหลังการบำบัดเมื่อไม่เติม NaCl เท่ากับ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร



จากการศึกษากระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 สรุปผลการศึกษากระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็กจากงานวิจัยที่ผ่านมา

ผู้แต่ง	ชนิดของน้ำเสีย	รูปแบบถังปฏิกรณ์	สถานะการเดินระบบที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของระบบ
Imai และคณะ, 2013	อิมัลชันน้ำมันปาล์มในน้ำ	ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Column flotation)	<ol style="list-style-type: none"> <li>ใช้ฟองอากาศขนาดเล็กร่วมกับฟองอากาศขนาดปกติ</li> <li>ระยะเวลาในการบำบัด 60 นาที</li> <li>อัตราการไหลของฟองอากาศขนาดปกติ 2.5 ลิตรต่อนาที</li> <li>อุณหภูมิ 36.5 องศาเซลเซียส</li> <li>บำบัดอิมัลชันน้ำมันในน้ำ 87 เปอร์เซ็นต์</li> </ol>
Li และคณะ, 2017	อิมัลชันน้ำมันในน้ำจากแหล่งปิโตรเลียม	ถังปฏิกรณ์แบบไซโคลนร่วมกับฟองอากาศ (Cyclonic state micro-bubble flotation column)	<ol style="list-style-type: none"> <li>ใช้ฟองอากาศขนาดเล็กร่วมกับการทำงานของไซโคลน</li> <li>อัตราการเติมอากาศ 1.8 ลิตรต่อนาที</li> <li>บำบัดอนุภาคหยดน้ำมันขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร</li> <li>บำบัดอิมัลชันน้ำมันในน้ำ 92.19 เปอร์เซ็นต์</li> </ol>
Etchepare และคณะ, 2017	อิมัลชันน้ำมันในน้ำเกลือ (โซเดียมคลอไรด์)	ถังปฏิกรณ์แบบฟองอากาศ (Column flotation)	<ol style="list-style-type: none"> <li>ใช้ฟองอากาศขนาดเล็ก 2 กลุ่ม (Microbubbles และ Nanobubbles)</li> <li>ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย 7</li> <li>ความเข้มข้นของ Dismulgan 5 มิลลิกรัมต่อลิตร</li> <li>บำบัดอิมัลชันน้ำมันในน้ำ 95 เปอร์เซ็นต์</li> </ol>

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า กระบวนการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้หลายชนิด โดยมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับการทำงานอื่น ๆ เช่น การทำงานร่วมกับไซโคลนเพื่อเพิ่มการผสมในระบบ การใช้ฟองอากาศขนาดเล็กหลายกลุ่ม และการทำให้ลอยด้วยอากาศละลาย ทั้งนี้อัตราการเติมอากาศ ขนาดของหยดน้ำมัน ความเข้มข้นเริ่มต้นของอิมัลชัน อุณหภูมิ ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ถือเป็นสิ่งสำคัญต่อการเดินระบบโดยพบว่าการใช้ฟองอากาศหลายขนาดทำให้เพิ่มการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศกับอนุภาค ซึ่งตัวกลางในการสร้างฟองอากาศขนาดเล็กภายในถังปฏิกรณ์เลือกใช้เซรามิคเมมเบรน เนื่องจากนอกจากการสร้างฟองอากาศ เมมเบรนยังสามารถกรองอนุภาคภายในถังปฏิกรณ์ได้อีกด้วย แต่ข้อจำกัดของเมมเบรน คือ การอุดตันเมื่ออายุการใช้งานเพิ่มขึ้น จึงมีแนวคิดการใช้การเป่าอากาศก่อนเริ่มการกรองอนุภาค เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเมมเบรน และกระบวนการล้างทำความสะอาด สารล้างที่ใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่จะใช้สารลดแรงตึงผิว และสารตัวทำละลาย ซึ่งพบว่า สารล้างเหล่านี้สามารถตกค้างในสิ่งแวดล้อม และมีข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่าย จึงเป็นแนวคิดในงานวิจัยที่จะนำหลักการทำให้ลอยด้วยฟองอากาศมาใช้ในถังปฏิกรณ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน โดยสารล้างที่ใช้ คือ น้ำเปล่า เพื่อลดการตกค้างของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม และลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

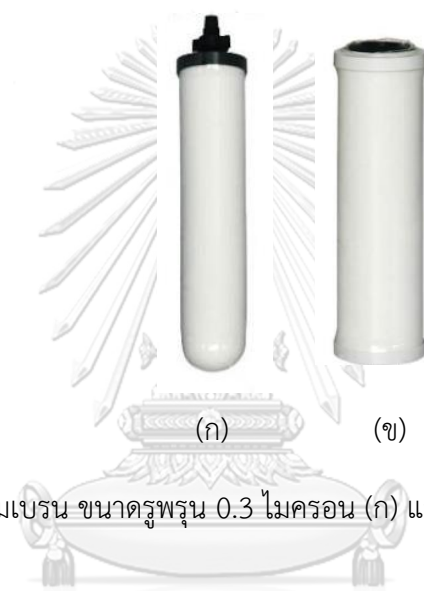
### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. เซรามิคเมมเบรน (Ceramic membrane) ทรงกระบอก ขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอน และ เซรามิคเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.5 ไมครอน ความยาวของเซรามิคเมมเบรน 10 นิ้ว ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 เซรามิคเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอน (ก) และ 0.5 ไมครอน (ข) ตามลำดับ

2. หลอดทดลองแบบฝาเกลียว เส้นผ่านศูนย์กลาง \* ยาว (16\*100 มิลลิเมตร) ปริมาตร 11 มิลลิลิตร

3. เครื่องสูบน้ำแบบรีดสาย (Peristaltic pump)

4. เครื่องเติมอากาศ (Air compressor) ขนาดมอเตอร์ 0.5 แรงม้า แรงดัน 8 บาร์

5. เกจวัดความดัน (Pressure gauge)

6. ถังพลาสติกขนาด 60 ลิตร

7. เครื่องชั่งน้ำหนักสาร รุ่น ML104 บริษัท Mettler Toledo

8. นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล

9. ตะแกรงคัดขนาดอนุภาค เบอร์ 10 ขนาด 2 มิลลิเมตร (ASTM E11 Specification)

10. เตาอบร้อน (Hot air oven) บริษัท Memmert รุ่น 600

11. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ รุ่น Digital precise circulation water bath, WCB22

12. เครื่องวัดความขุ่น HI 98703 Turbidimeter

13. เครื่อง Gas Chromatography Agilent Technologies 6890N GC ชนิดตัวตรวจวัดคือ Flame Ionization Detector (FID)

14. กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง

15. กระจกกรองขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน

16. เครื่องวัดพีเอช AE150 pH Benchtop Meter

17. เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ อาทิ กระบอกตวง ปีกเกอร์ เครื่องแก้ว ฯลฯ

### 3.1.2 รายการสารเคมี

1. ดินปนเปื้อนน้ำมันจากแหล่งขุดเจาะปิโตรเลียมจริง

2. เบนโทไนท์ (Bentonite)

3. เมทิลีน คลอไรด์ Methylene chloride ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )

4. สารปรับพีเอช คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

### 3.2 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษาและวิธีการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สรุปตัวแปรที่ทำการศึกษา และวิธีการวิเคราะห์

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีการวิเคราะห์
1. ขนาดของดิน	1. วิธี Particle size distribution (%) ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D 2487
2. ค่าความชื้นภายในดิน	2. วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2216
3. ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดิน (TPH)	3. วิธี Gas chromatography (GC) analysis (Hydrocarbon analysis) EPA method 8015
4. ค่าพีเอชของดิน	4. วิธีทดสอบตามมาตรฐาน METHOD 9045D
5. ค่า $pH_{zpc}$ (point of zero charge)	5. วิธีการปรับค่าพีเอชด้วยกรดและเบส (The pH drift method)
6. ความเร็วในการเขย่า	6. วิธีเขย่าด้วยเครื่อง ทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T-88-86
7. ปริมาณของแข็งแขวนลอย	7. วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5907-18
8. ความขุ่นของน้ำ	8. วิธี Spectrophotometry ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D6181-03

### 3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ โดยดำเนินการที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการทดลองเป็น 5 ช่วง ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 การศึกษาลักษณะของดินปนเปื้อนที่มาจากการขุดเจาะในแหล่งน้ำมันจริง ได้แก่ ค่าความชื้นภายในดิน (Moisture content) ค่าพีเอชของดิน ค่า  $pH_{zpc}$  ขนาดของดิน และปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดิน (TPH) หลังจากนั้นจะทำการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้อนุภาคตกตะกอน (Settling time) โดยตรวจวัดจากค่าของแข็งแขวนลอย

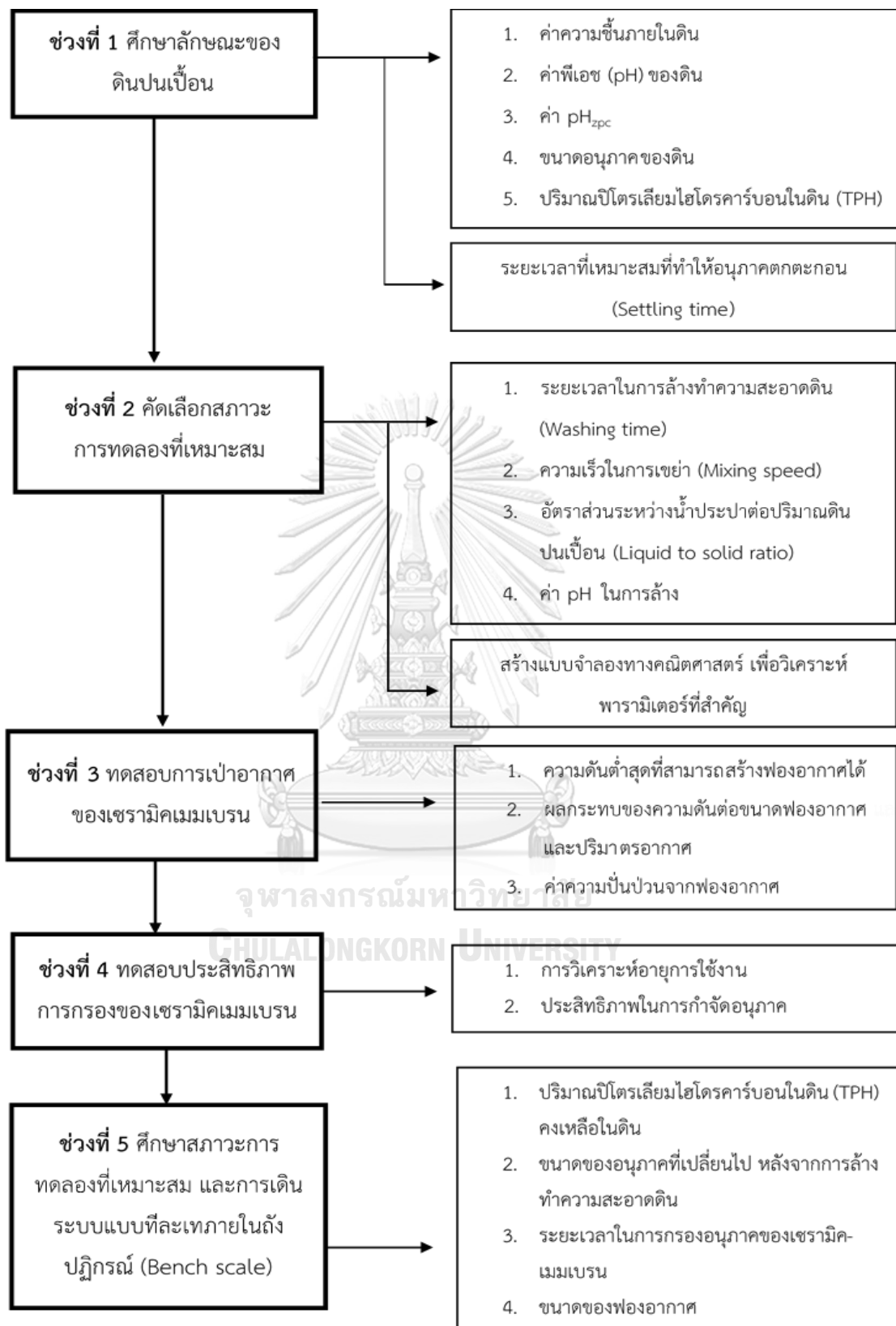
การทดลองช่วงที่ 2 การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก วิเคราะห์ผลเพื่อเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม ได้แก่ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน (Washing time) ความเร็วในการเขย่า (Mixing speed) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปริมาณดินปนเปื้อน (Liquid to solid ratio) และค่า pH ในการล้าง และส่วนที่สอง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญ

การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาการเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน การสร้างฟองอากาศ ผลกระทบของความดันต่อขนาดฟองอากาศและปริมาตรอากาศ และค่าความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์ที่เกิดจากฟองอากาศ เพื่อป้องกันปัญหาอนุภาคจมตัวก่อนเริ่มการทำงานของเซรามิคเมมเบรน

การทดลองช่วงที่ 4 การศึกษาการกรองอนุภาคของเซรามิคเมมเบรน โดยศึกษาระยะเวลาในการกรองอนุภาค การวิเคราะห์อายุการใช้งานและประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาค ทั้งนี้จะควบคุมอัตราการกรองของน้ำให้คงที่ ซึ่งอนุภาคที่นำมาศึกษา ได้แก่ เบนโทไนท์ และดินปนเปื้อนน้ำมัน

การทดลองช่วงที่ 5 การศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดดินปนเปื้อนจากการทดลองที่ 2 โดยติดตั้งเซรามิคเมมเบรนลงในถังปฏิกรณ์ และศึกษาการเดินระบบแบบทีละเทภายในถังปฏิกรณ์ วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดดินปนเปื้อน โดยมีการศึกษาขนาดของฟองอากาศ ระยะเวลาที่เซรามิคเมมเบรนสามารถใช้งานได้ โดยวิเคราะห์ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดิน (TPH) และขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนไป

จากการทดลองทั้ง 5 ช่วง สามารถแสดงแผนผังขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 แผนผังขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.3.1 ศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อนน้ำมัน

การศึกษาลักษณะของดินปนเปื้อนที่มาจากการขุดเจาะในแหล่งน้ำมันจริง แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองที่ 1.1 การศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อนน้ำมัน และการทดลองที่ 1.2 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนของอนุภาค

#### การทดลองที่ 1.1 การศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อนน้ำมัน

การศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อนน้ำมันทำการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะ และองค์ประกอบของดินปนเปื้อนน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการศึกษา ค่าความชื้นภายในดิน ค่าพีเอชของดิน ค่า  $pH_{zpc}$  และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle size distribution (%)) หลังจากนั้นนำไปตรวจวัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินด้วยวิธี Gas chromatography ชนิดตัวตรวจวัด คือ Flame ionized detector (FID) โดยแสดงแผนผังการทดลองการศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อนน้ำมัน ดังภาพที่ 3-5

#### (1) การตรวจวัดค่าความชื้นภายในดิน

การตรวจวัดค่าความชื้นในดิน เริ่มจากเตรียมดินปริมาณ 100 กรัม นำดินใส่จานแก้วและชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำจานแก้วที่มีดินเข้าตู้อบที่ความร้อน  $60 \pm 5$  องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง นำถ้วยกระเบื้องที่มีดินเข้าตู้อบความชื้นเมื่อลดอุณหภูมิ และนำถ้วยกระเบื้องที่มีดินไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อวิเคราะห์ค่าความชื้นภายในดิน โดยแสดงผังสมการที่ 3-1 (Arends และคณะ, 2018)

สัดส่วนน้ำหนักความชื้นต่อน้ำหนักดินอบแห้ง (Percent by weight,  $P_w$ )

$$P_w = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100 \quad (3-1)$$

เมื่อ

$P_w$  คือ รอยละความชื้นของดิน

$M_w$  คือน้ำหนักดินก่อนอบ (กรัม)

$M_d$  คือน้ำหนักดินหลังอบ (กรัม)

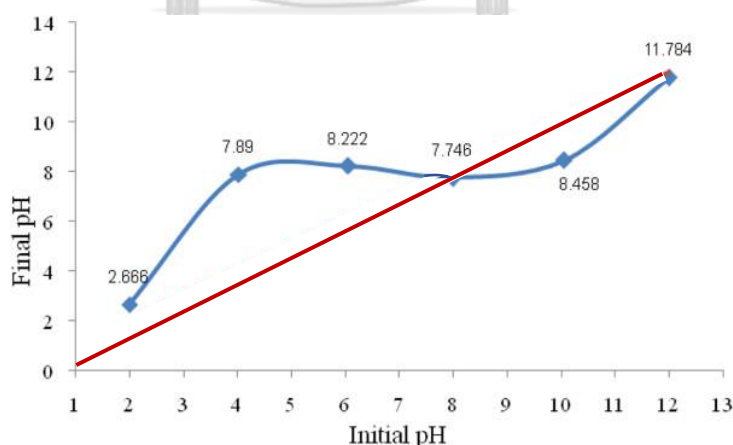


## (2) การตรวจวัดค่าพีเอชของดิน

การตรวจวัดค่าพีเอชของดิน เริ่มจากเตรียมดินปริมาณ 10 กรัม เติลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่างดินต่อน้ำ คือ 1 ต่อ 10 (กรัมต่อมิลลิลิตร) หลังจากนั้นใช้แท่งแก้วคนดินระยะเวลา 30 วินาที พักทิ้งไว้ 3 นาที ทำเช่นเดิมเป็นจำนวน 5 ครั้ง และตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งดินในบีกเกอร์ตกตะกอนและเห็นน้ำใส ตรวจวัดค่าพีเอชของดินด้วยเครื่อง pH meter ในส่วนน้ำใส (Zhang, 2018)

## (3) การตรวจวัดค่า $pH_{zpc}$

การตรวจวัดค่า  $pH_{zpc}$  (การศึกษาประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์, Point of zero charge) เริ่มจากนำน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชให้เป็นกรด และต่างให้อยู่ในช่วง 3.0 ถึง 12.0 ด้วยกรดไนตริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ซึ่งจะวัดค่าความเป็นกรด และต่างเริ่มต้น (Initial pH) ด้วยพีเอชมิเตอร์ และนำอนุภาคปริมาณ 0.1 กรัม อัตราส่วนระหว่างดินต่อน้ำ คือ 1 ต่อ 1,000 (กรัมต่อมิลลิลิตร) ใส่ในขวดรูปชมพูนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าความเป็นกรด และต่างสุดท้าย (Final pH) หลังจากนั้นจะนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด และต่างเริ่มต้น (Initial pH) และค่าความเป็นกรด และต่างสุดท้าย (Final pH) โดยลากเส้นตัดแกน (0,0) จุดที่  $X=Y$  คือค่า pH ที่ประจุบนพื้นผิวที่ของอนุภาคเป็นศูนย์ แสดงกราฟค่า  $pH_{zpc}$  ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 กราฟแสดงค่า  $pH_{zpc}$  ในการบำบัดน้ำเสีย จากกระบวนการโอโซน (Ismaie, 2013)

#### (4) ขนาดอนุภาคของดิน (Particle size distribution)

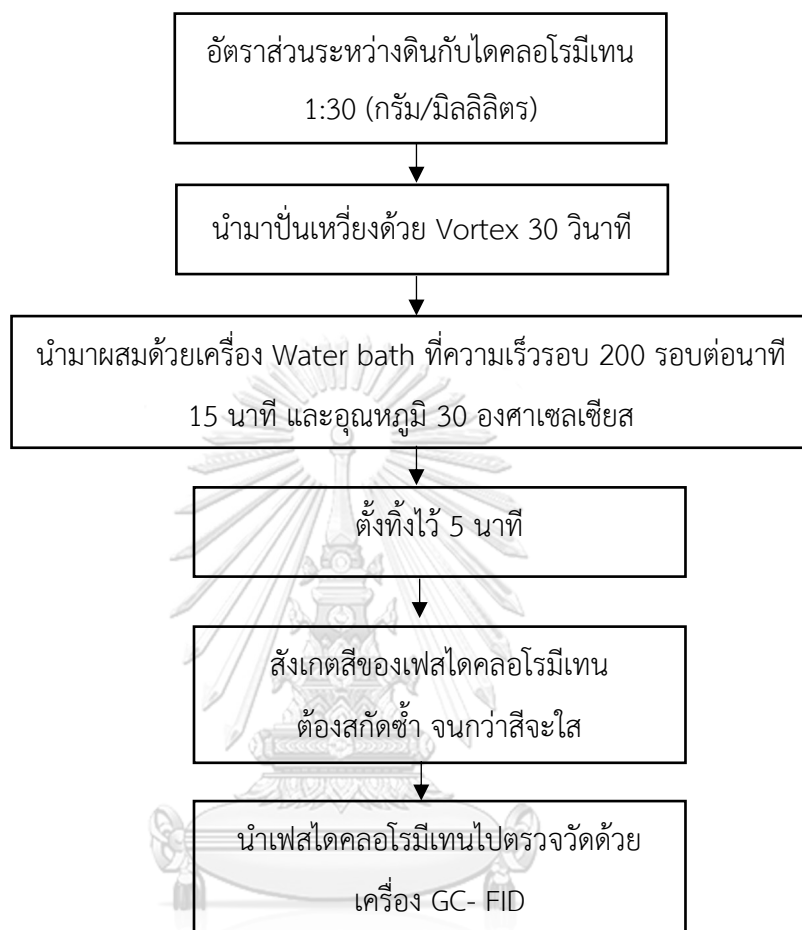
การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค โดยจะเลือกขนาดอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 2 มิลลิเมตร เนื่องจาก ขนาดอนุภาคสามารถบ่งบอกได้ว่าลักษณะทางกายภาพของดินปนเปื้อนมีการเกาะอยู่ของน้ำมันอยู่หรือไม่ ซึ่งหากขนาดอนุภาคของดินมากกว่า 2 มิลลิเมตร อาจบ่งบอกได้ว่าดินปนเปื้อนมีการเกาะตัวของน้ำมันอยู่ (Grasso, 1997) โดยสามารถแสดงการกระจายตัวของอนุภาคดินได้ดังนี้

>2 มิลลิเมตร	ควรมีการปรับขนาดก่อนการล้างทำความสะอาดดิน
0.25 - 2 มิลลิเมตร	ประสิทธิภาพสูงในการล้างทำความสะอาดดิน
0.063 - 0.25 มิลลิเมตร	ประสิทธิภาพปานกลางถึงต่ำในการล้างทำความสะอาด
<0.063 มิลลิเมตร	ยากต่อการล้างทำความสะอาดดิน

การทำลองหาขนาดอนุภาคของดิน เริ่มจากนำดินปริมาณ 50 กรัม และชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกน้ำหนักแต่ละภาคของตะแกรง (Sieve) เรียงตะแกรงขนาดใหญ่สุดอยู่ด้านบนและไล่ลำดับความละเอียดลงมา จากนั้นนำไปประกอบเข้าเครื่องเขย่า นำดินที่เตรียมไว้ลงในชุดตะแกรง ปิดฝา เขย่าประมาณ 8 ถึง 10 นาที หลังจากนั้นนำดินที่ค้างในแต่ละภาคของตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก และนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (Brown และคณะ, 2018)

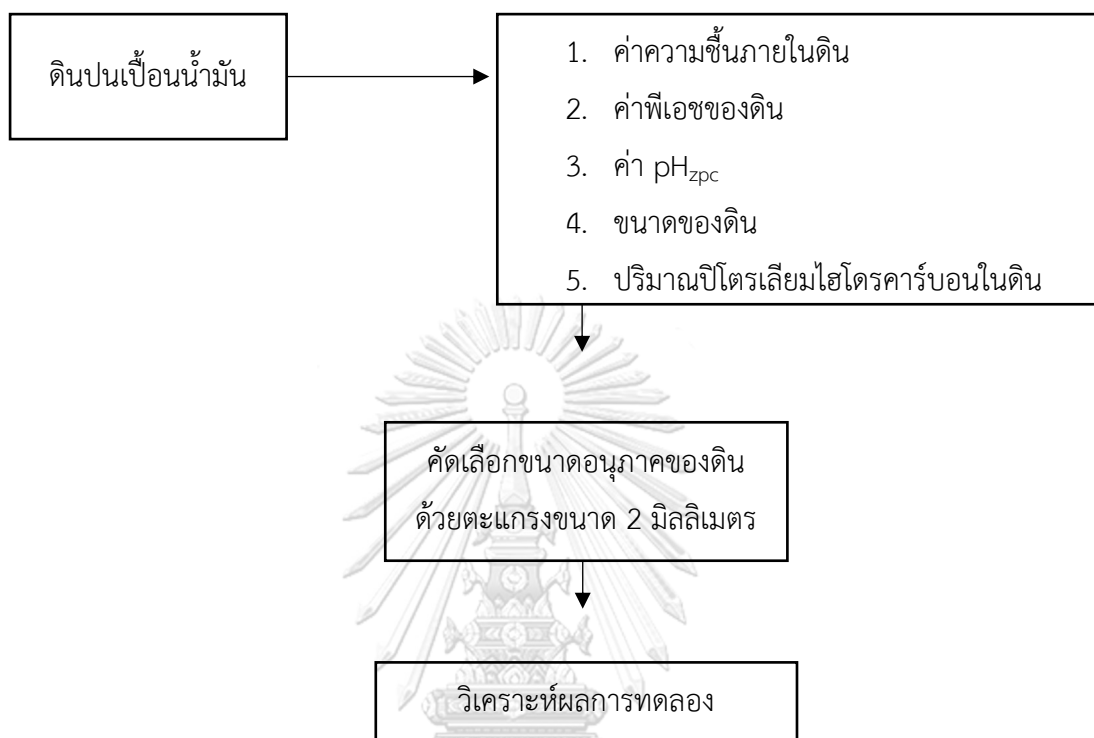
#### (5) การตรวจวัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดิน

การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการตรวจวัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดิน ด้วยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) โดยจะใช้สารไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) เป็นสารตัวทำละลายในการสกัดดินปนเปื้อน โดยแสดงแผนผังกระบวนการสกัดดินดังภาพที่ 3-4 (Blaisdell & Smallwood, 1993)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
Chulalongkorn University  
ภาพที่ 3-4 กระบวนการสกัดดินปนเปื้อนน้ำมัน

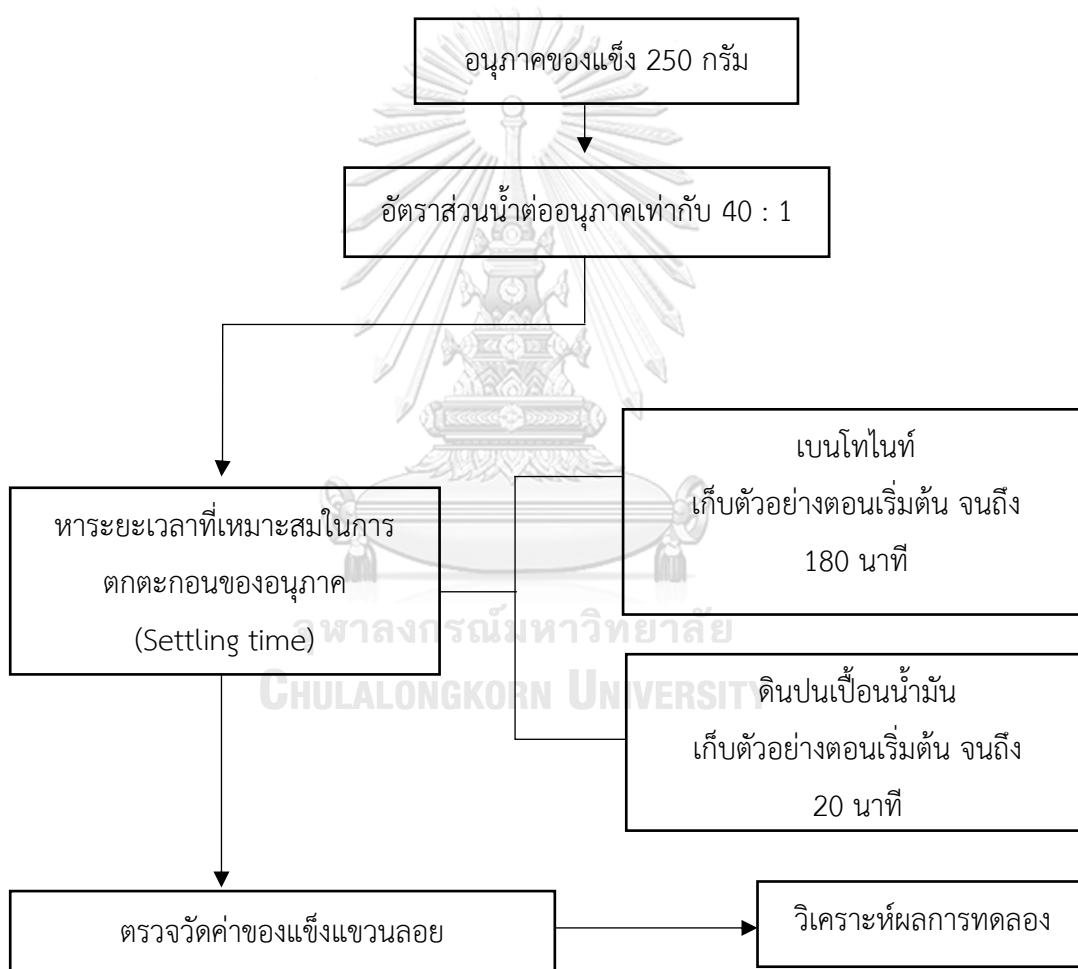
สภาวะในการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินตัวอย่าง ใช้เครื่อง Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID) คอลัมน์ HP-1 30 เซนติเมตร x 0.32 มิลลิเมตร x 0.25 ไมโครเมตร Inlet: Split (1:50) Injection volume 1  $\mu$ L Carrier gas 2 mL/min  $N_2$  Oven program 45  $^{\circ}C$  for 2 min, then 15  $^{\circ}C$ /min to 300  $^{\circ}C$  Injection temperature 300  $^{\circ}C$  และ Detector temperature 320  $^{\circ}C$



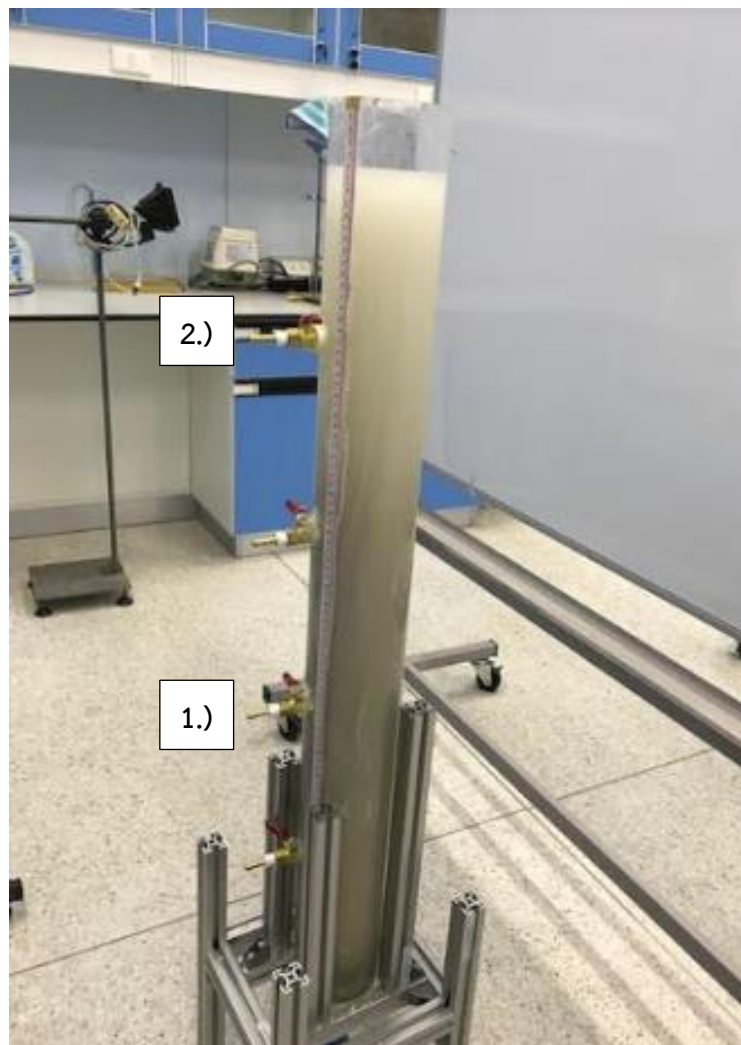
ภาพที่ 3-5 แผนผังการศึกษาลักษณะ และองค์ประกอบของดินปนเปื้อนน้ำมัน

### การทดลองที่ 1.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนของอนุภาค

การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนของอนุภาค (Column settling test) โดยจะทำการใส่น้ำประปา และอนุภาค (เบนโทไนท์ และดินปนเปื้อนน้ำมัน) ลงในคอลัมน์ ขนาด 10 ลิตร ในอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่ออนุภาคของแข็งเท่ากับ 40 ต่อ 1 และปล่อยให้ตกตะกอนตามระยะเวลา โดยนำไปตรวจวัดค่าของแข็งแขวนลอย (มันซิน ดัชนีทูลเวสท์, 2537) โดยเก็บตัวอย่างของ เบนโทไนท์ตอนเริ่มต้น จนถึง 180 นาที เก็บตัวอย่างของดินปนเปื้อนตอนเริ่มต้น จนถึง 20 นาที โดยแสดงแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-6 และแสดงภาพคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-6 แผนผังการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนของอนุภาค



คอลัมน์สูง 100 เซนติเมตร

เมื่อ 1. จุดเก็บน้ำตัวอย่างที่ความสูง 20 เซนติเมตร

2. จุดเก็บน้ำตัวอย่างที่ความสูง 60 เซนติเมตร

ภาพที่ 3-7 ภาพคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3.2 การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม

หลังจากการเตรียมตัวอย่างดิน ดินจะถูกใช้เพื่อนำมาคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม การทดลองที่ 2 จะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองที่ 2.1 การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม และการทดลองที่ 2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญ โดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

#### การทดลองที่ 2.1 การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม

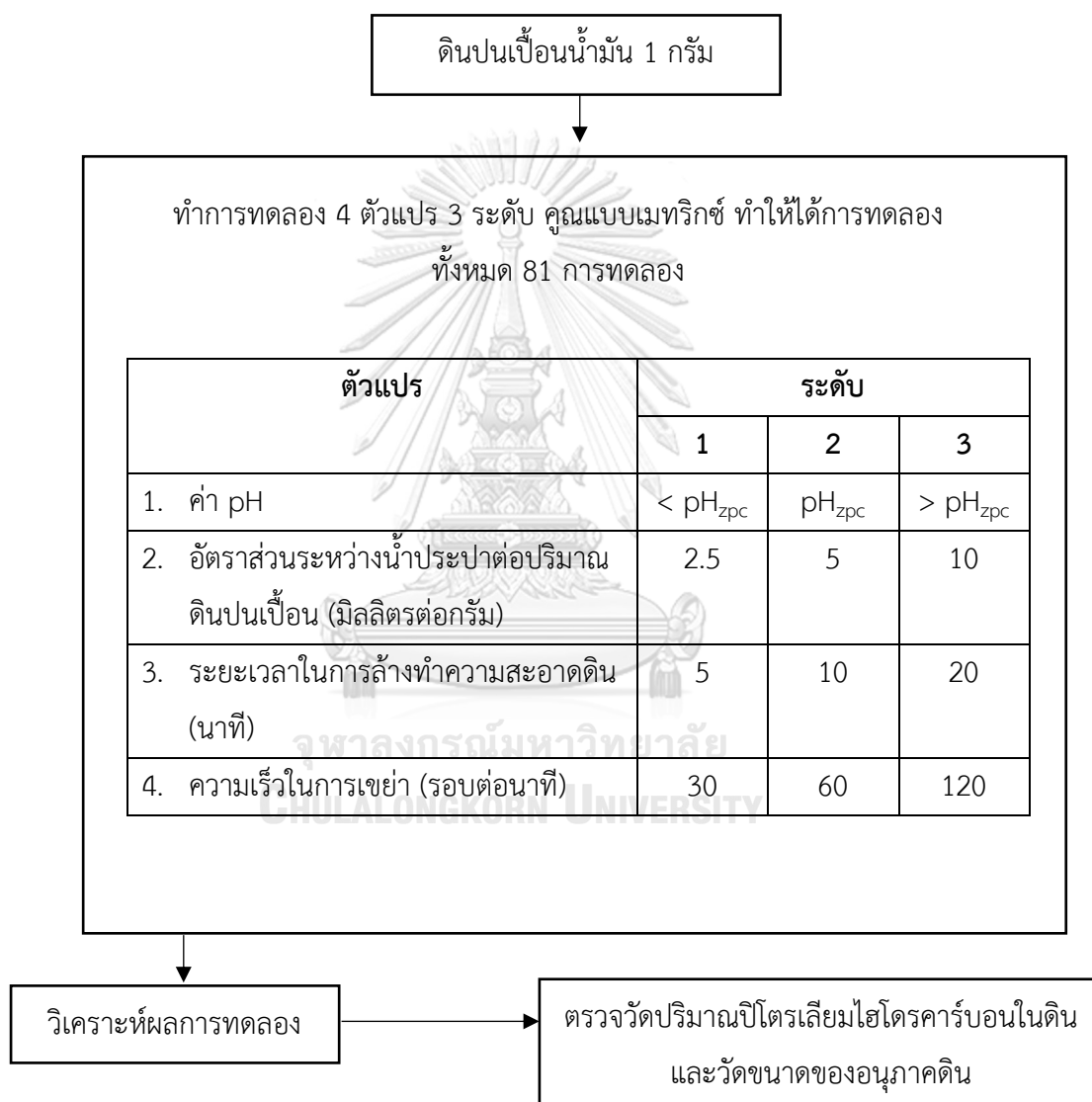
การศึกษาเพื่อเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณน้ำประปาที่เหมาะสมต่อปริมาณดินปนเปื้อน (Liquid to solid ratio) ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน (Washing time) ความเร็วการเขย่า (Mixing speed) และค่า pH ในการล้าง วิเคราะห์ตัวแปรดังตารางที่ 3-2 และแผนผังการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมแสดงดังภาพที่ 3-8

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรในการคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน

ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ	1. น้ำประปา
2. ปริมาณดินปนเปื้อนน้ำมัน	2. 1 กรัม
ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. $pH_{zpc}$	1. ค่าน้อยกว่า $pH_{zpc}$ ค่า $pH_{zpc}$ และค่ามากกว่า $pH_{zpc}$
2. อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำประปาต่อปริมาณดินปนเปื้อนน้ำมัน	2. 2.5 5 และ 10 มิลลิลิตรต่อกรัม
3. ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน	3. 5 10 และ 20 นาที
4. ความเร็วการเขย่า	4. 30 60 และ 120 รอบต่อนาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดิน	1. ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH)
2. ขนาดอนุภาคดินที่เปลี่ยนไป	2. Particle size distribution (%)

ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยเริ่มจากนำดินที่มีขนาด 2 มิลลิเมตรมาทำการทดลอง ซึ่งจะล้างทำความสะอาดในระดับห้องปฏิบัติการ ใส่ปริมาณน้ำประปาและดินในอัตราส่วนต่าง ๆ (มิลลิลิตร/กรัม) ปรับค่าพีเอช และเข้าสู่กระบวนการล้างทำความสะอาดดิน โดยทำ

การทดลองในหลอดทดลองจำนวน 2 ตัวอย่างต่อหนึ่งสภาวะ ในเครื่อง Water Bath Shaker ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นตั้งหลอดทดลองทิ้งไว้ 5 นาที และนำน้ำประปาออกนำดินภายในหลอดทดลองไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 45-50 นาทีหรือจนกว่าดินจะแห้ง หลังจากนั้น นำดินไปสกัดตามขั้นตอนที่กล่าวจากภาพที่ 3-4 ข้างต้น และนำไปวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งแผนผังการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 แผนผังการศึกษาการล้างทำความสะอาดดินโดยหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม

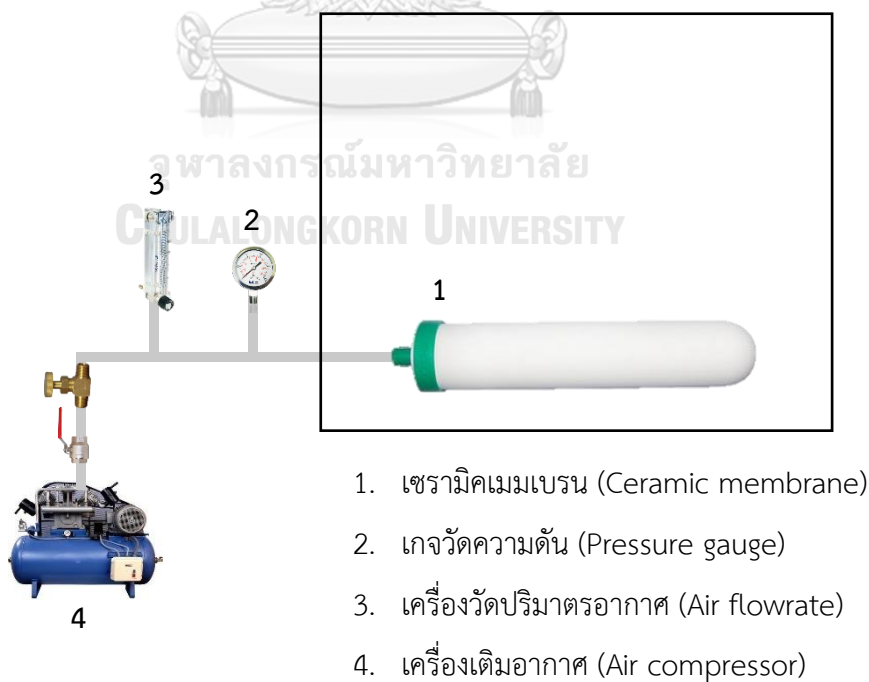


## การทดลองที่ 2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หลังจากการศึกษาในการทดลองที่ 2.1 ทำให้ได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสม การทดลองที่ 2.2 นี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสำคัญทางสถิติของตัวแปร ผ่านโปรแกรม Minitab 18 ซึ่งสามารถทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากการสร้างแบบจำลองนี้ (Nicolai, 2001) ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์มีทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ ค่า pH อัตราส่วนน้ำประปาต่อดิน ระยะเวลาในการล้าง และความเร็วในการผสม ทำให้ได้ระดับการแปรผลของตัวแปรทั้งหมด  $3^4$  การทดลอง ตัวชี้วัดของพารามิเตอร์ทั้งหมด คือ ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH removal efficiency) ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

### 3.3.3 การทดสอบการสร้างฟองอากาศโดยเซรามิคเมมเบรน

การทดลองที่ 3 จะทำการศึกษาการสร้างฟองอากาศที่เหมาะสม ผลกระทบของความดันต่อขนาดฟองอากาศและปริมาตรอากาศ และค่าความปั่นป่วนจากฟองอากาศ เพื่อช่วยล้างและป้องกันการอนุภาคจมน้ำก่อนเริ่มการทำงานของเซรามิคเมมเบรน โดยติดตั้งการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-9 ถึงปฏิกรณ์ทำจากกระจกใส ปริมาตร 22 ลิตร หรือขนาด  $0.22 \times 0.35 \times 0.30$  ลูกบาศก์เมตร (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง)

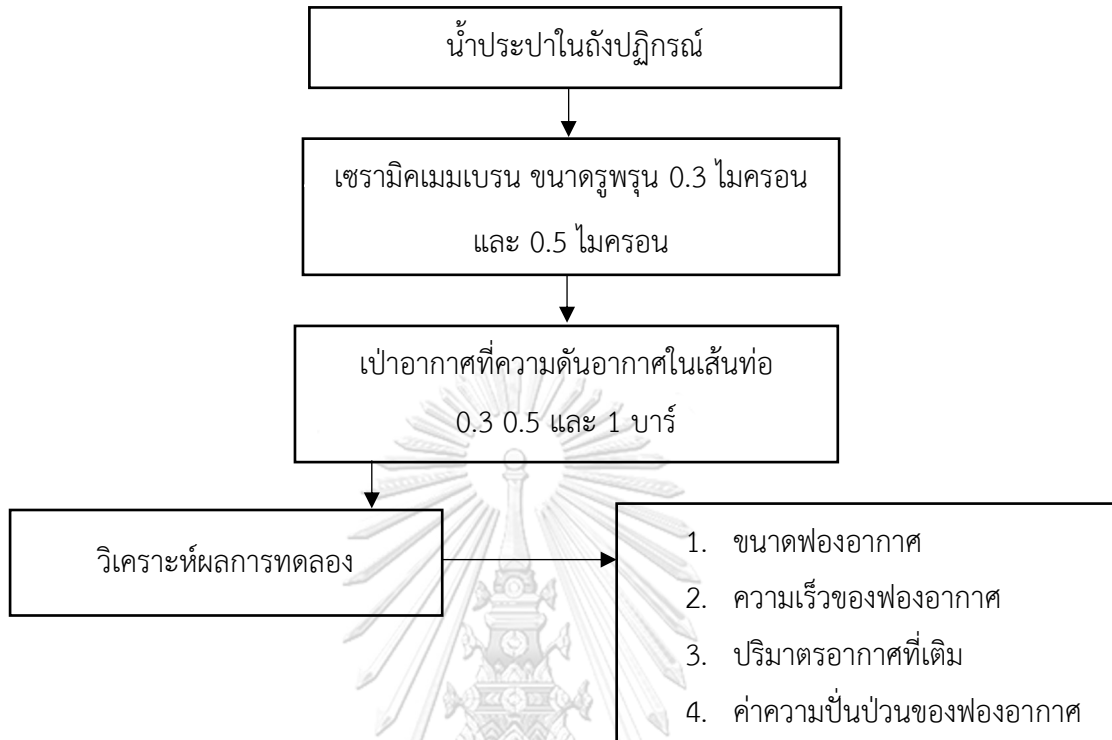


ภาพที่ 3-9 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลองการสร้างฟองอากาศ

การทดลองเริ่มจากการเติมน้ำประปาปริมาตร 7.5 ลิตร ทำการปรับความดันอากาศในเส้นท่อตั้งแต่ช่วง 0.3 0.5 1 บาร์ โดยวัดปริมาตรอากาศ ขนาดฟองอากาศ ค่าความปั่นป่วนของฟองอากาศความเร็วของฟองอากาศที่สัมพันธ์กับความดันในเส้นท่อ ซึ่งทำการคำนวณความเร็วของฟองอากาศในสมการที่ 3-2 โดยกำหนดตัวแปรที่ทำการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3-3 และแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3-10

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรที่เหมาะสมในการเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน

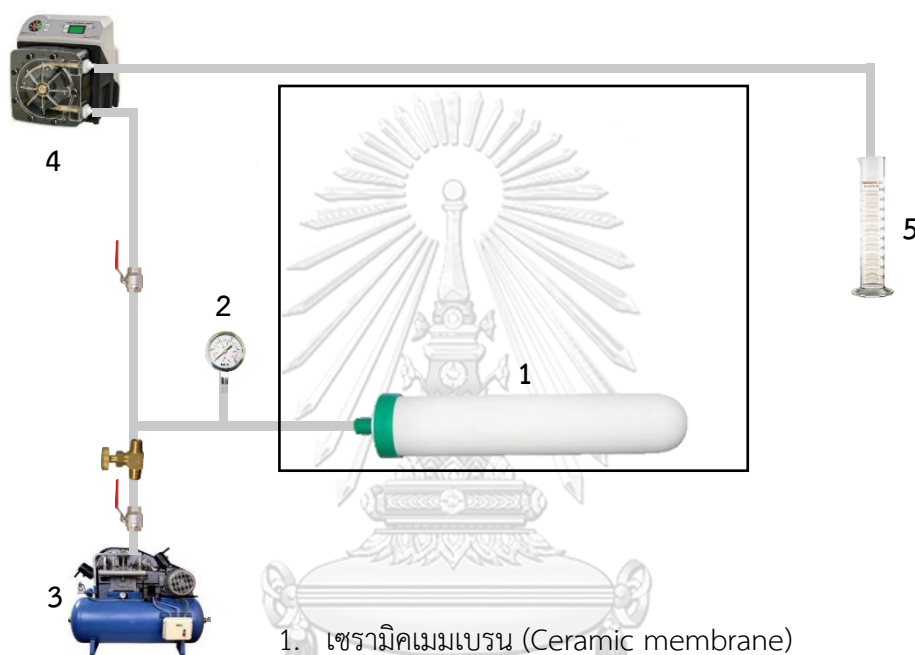
ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของน้ำ	1. น้ำประปา
ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความดันอากาศในเส้นท่อ	1. 0.3 0.5 และ 1 บาร์
2. ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางเมมเบรน	2. 4.5 8.0 และ 15.5 เซนติเมตร
3. ขนาดรูพรุนของเซรามิคเมมเบรน	3. 0.3 ไมครอน และ 0.5 ไมครอน
ตัวแปรตาม	วิธีการวัด
1. ขนาดฟองอากาศ	1. การถ่ายภาพความเร็วสูง
2. ความเร็วของฟองอากาศ	2. การคำนวณจากสมการที่ 2-6
3. ปริมาตรอากาศที่เติม	3. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ
4. ค่าความปั่นป่วนของฟองอากาศ	4. การคำนวณจากสมการที่ 2-10



ภาพที่ 3-10 แผนผังการศึกษาประสิทธิภาพการเป่าอากาศของเซรามิกเมมเบรน

### 3.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพ การกรองของเซรามิคเมมเบรน

การทดลองที่ 4 จะทำการศึกษาการกรองอนุภาคของเซรามิคเมมเบรน โดยศึกษาระยะเวลาในการกรองอนุภาค การวิเคราะห์อายุการใช้งาน และประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาค ทั้งนี้ จะควบคุมอัตราการกรองของน้ำให้คงที่ โดยติดตั้งการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-11 ถึงปฏิกรณ์ ทำจากกระจกใส ขนาด 0.15 x 0.35 x 0.30 เมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ระดับน้ำ 20 เซนติเมตร (7.5 ลิตร)



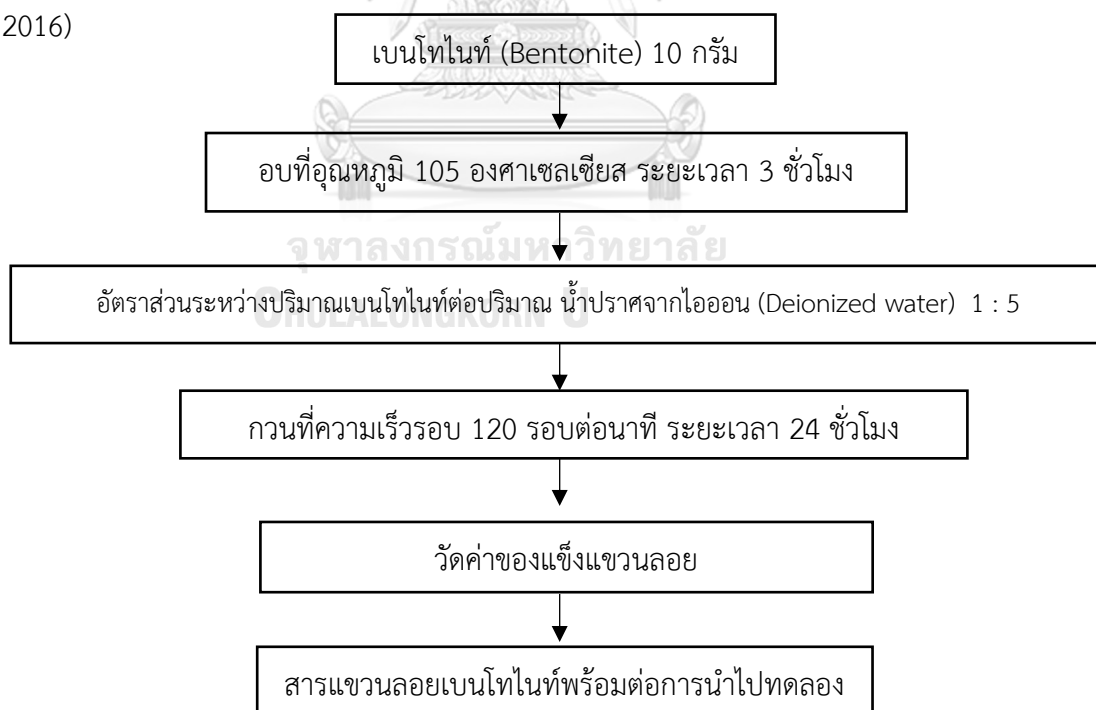
1. เซรามิคเมมเบรน (Ceramic membrane)
2. เกจวัดความดัน (Pressure gauge)
3. เครื่องเติมอากาศ (Air compressor)
4. เครื่องสูบน้ำแบบรีดสาย (Peristaltic pump)
5. กระบอกตวง (Cylinder)

ภาพที่ 3-11 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

ขนาดรูพรุนของเซรามิคเมมเบรนที่เลือกทำการศึกษา คือ 0.3 ไมครอน ติดตั้งบริเวณด้านล่างของถัง การทดสอบการกรองนั้น อนุภาคที่นำมาศึกษา ได้แก่ เบนโทไนท์ และดินปนเปื้อนน้ำมัน การเลือกใช้เบนโทไนท์เป็นหนึ่งในอนุภาคในการศึกษา เนื่องจากขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์อยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เล็กที่สุดของอนุภาคจากการศึกษาขนาดอนุภาคของ Drill cuttings จากแหล่งเดียวกัน โดยจะมีขนาดเล็กที่สุดอยู่ในช่วง 0.5 – 2 มิลลิเมตร (ทักษิณา โพธิ์ใหญ่, 2560) แต่เนื่องจากดินที่ใช้ในการทดลองจริงพบว่า ขนาดของดินส่วนใหญ่จะมีขนาดมากกว่า

0.5 มิลลิเมตร และปริมาณขนาดของดินที่น้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตร (สอดคล้องกับขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ของเบนโทไนท์) คิดเป็นร้อยละ 10.46 ซึ่งเทียบเป็น 25 กรัม จึงทำให้กำหนดปริมาณเบนโทไนท์คงที่ที่ 25 กรัม เพื่อให้ใช้ปริมาณใกล้เคียงกับดินที่ใช้ทดลองจริงมากที่สุด และกำหนดระดับน้ำคงที่ที่ 20 เซนติเมตร (7.5 ลิตร) โดยจะปรับความเข้มข้นเบนโทไนท์ต่อน้ำ 3 ระดับ ได้แก่ 3.33 กรัม/ลิตร (25 กรัมเบนโทไนท์/7.5 ลิตรของน้ำ) 2.5 กรัม/ลิตร (25 กรัมเบนโทไนท์/10 ลิตรของน้ำ) 1.67 กรัม/ลิตร (25 กรัมเบนโทไนท์/15 ลิตรของน้ำ)

การเตรียมเบนโทไนท์ก่อนการทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความผิดพลาดในการทดลอง ที่มาจากคุณสมบัติของเบนโทไนท์ที่มีการพองตัวเมื่ออยู่ในน้ำ เริ่มจากเตรียมเบนโทไนท์ปริมาณ 10 กรัม นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เบนโทไนท์แขวนลอยในน้ำปราศจากไอออน ในสัดส่วนเบนโทไนท์ต่อน้ำ คือ 1 ต่อ 5 และนำไปกวนที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง นำเบนโทไนท์ส่วนแขวนลอยไปวัดค่าของแข็งแขวนลอย และนำสารแขวนลอยเบนโทไนท์ใช้ในการทดลอง แผนผังการทดลองเตรียมเบนโทไนท์ดังภาพที่ 3-12 (Sirait และคณะ, 2016)



ภาพที่ 3-12 แผนผังการเตรียมเบนโทไนท์ก่อนนำไปทดลอง

การทดลองประสิทธิภาพการกรองของเซรามิคเมมเบรนเริ่มจากการเป่าอากาศเพื่อทำความสะอาดเซรามิคเมมเบรนก่อนเริ่มใช้งาน ที่ความดัน 1.0 บาร์ เป็นระยะเวลา 10 นาที หยุดการเป่าอากาศ โดยกำหนดให้ปริมาตรน้ำในถังคงที่อยู่ที่ 19 เซนติเมตร (7.5 ลิตร) นำอนุภาคเบนโทไนท์ ลงในถังปฏิกรณ์พร้อมกับน้ำประปา และเริ่มกรองอนุภาค โดยให้อัตราการไหลของน้ำคงที่อยู่ที่ 10 ลิตรต่อชั่วโมง โดยกำหนดตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3-4 และแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-13

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของเซรามิคเมมเบรน

ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของอนุภาค	1. เบนโทไนท์ (Bentonite) และดินปนเปื้อนน้ำมัน
2. ชนิดของน้ำ	2. น้ำประปา
3. อัตราการกรอง	3. 10 ลิตรต่อชั่วโมง
4. ระดับน้ำประปา	4. 19 เซนติเมตร (ปริมาตรน้ำ 7.5 ลิตร)
ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของเบนโทไนท์ต่อน้ำ	1. 3.33 กรัม/ลิตร 2.5 กรัม/ลิตร และ 1.67 กรัม/ลิตร
2. ขนาดรูพรุนของเซรามิคเมมเบรน	2. 0.3 ไมครอน
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. การวิเคราะห์อายุการใช้งาน	1. ระยะเวลาที่สามารถกรองอนุภาคได้
2. ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาค	2. การกำจัดของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)



ภาพที่ 3-13 แผนผังการทดสอบประสิทธิภาพการกรองของเซรามิกเมมเบรน

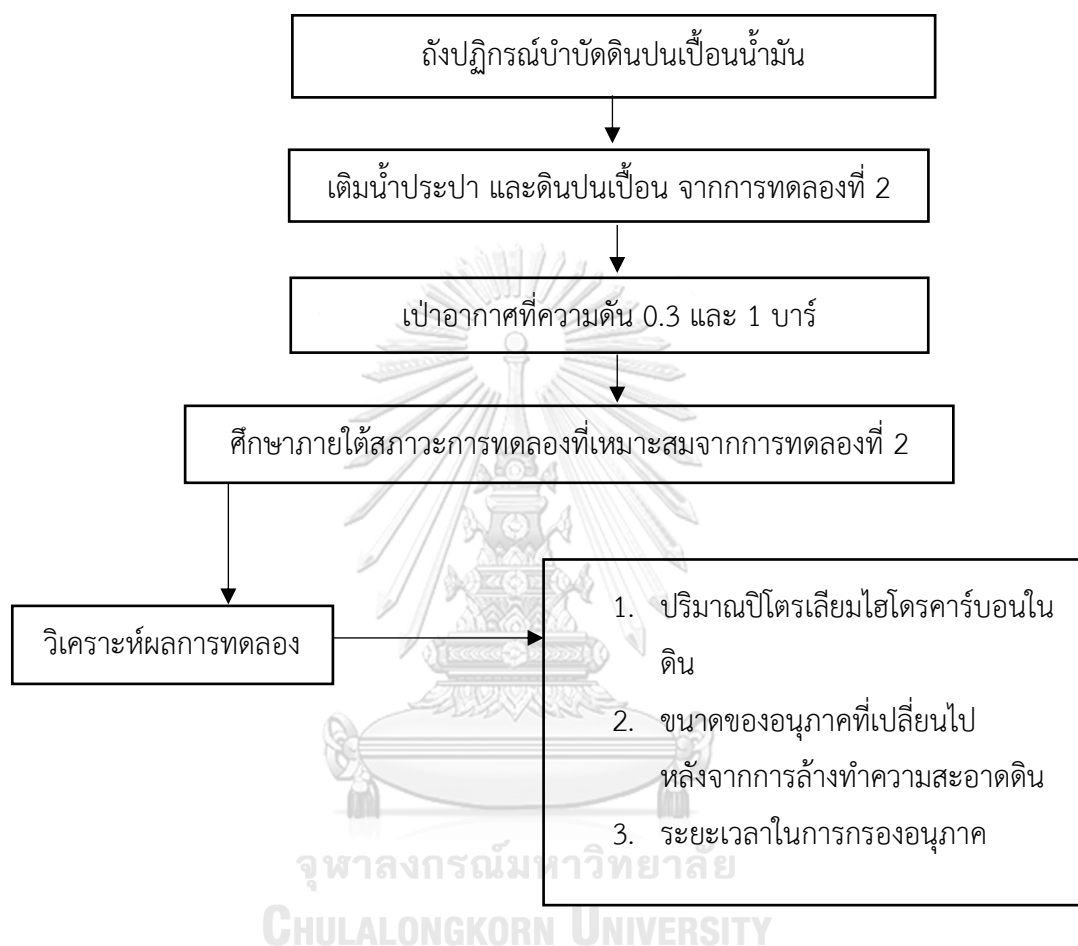
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.3.5 การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมการล้างทำความสะอาดดินจริง

หลังจากการหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 และการทดสอบประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของเซรามิกเมมเบรนจากการทดลองที่ 3 และ 4 ทำให้สามารถเลือกสภาวะการเดินระบบแบบที่ละเทภายในถังปฏิกรณ์ ขนาด 15 ลิตร โดยติดตั้งเซรามิกเมมเบรน ไว้บริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์ นำน้ำมาปรับพีเอชให้เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 และนำดินปนเปื้อน และน้ำประปาใส่ลงถังปฏิกรณ์ ในอัตราส่วนระหว่างน้ำประปา และดินปนเปื้อนที่เหมาะสม หลังจากนั้นเป่าฟองอากาศจากเซรามิกเมมเบรน (ความดันในเส้นท่อ 0.3 และ 1 บาร์) เป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วจึงกรองอนุภาคด้วยเซรามิกเมมเบรน อัตราการกรอง 10 ลิตรต่อชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นการ

ทดลองจะนำดินตัวอย่างไปวัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน และขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนไป หลังจากการล้างทำความสะอาดดิน ซึ่งแสดงแผนผังการทดลองดังภาพที่ 3-14 และทำการทดลองโดยวิเคราะห์ตัวแปรตามตารางที่ 3-5



ภาพที่ 3-14 แผนผังการศึกษารูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมจากระบวนการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน



ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษารูปแบบถังปฏิกรณ์

ตัวแปรควบคุม	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ปริมาณดินปนเปื้อนน้ำมัน	1. 750 กรัม
2. ชนิดของน้ำ	2. น้ำประปา
3. ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน	3. จากการทดลองที่ 2
4. อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำประปาต่อปริมาณดินปนเปื้อน	4. จากการทดลองที่ 2
5. ค่าพีเอชในการล้าง	5. จากการทดลองที่ 2
6. อัตราการกรอง	6. อัตราการกรอง 10 ลิตรต่อชั่วโมง
ตัวแปรต้น	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความดันในเส้นท่อในการเป่าฟองอากาศ	1. 0.3 และ 1 บาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดิน	1. ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH)
2. ขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนไป หลังจากการล้างทำความสะอาดดิน	2. Particle size distribution (%)
3. อายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรน	3. ระยะเวลาในการกรองอนุภาค

จากแผนการดำเนินงานวิจัย ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ สภาพวะการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันจากการขูดเจาะปิโตรเลียมที่เหมาะสม ได้แก่ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน (Washing time) อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อปริมาณดินปนเปื้อน (Liquid to solid ratio) และค่า pH ที่เหมาะสม หลังจากการทดสอบประสิทธิภาพเซรามิคเมมเบรน ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับความดันอากาศในเส้นท่อ ประสิทธิภาพ และระยะเวลาการใช้งานของเซรามิคเมมเบรน และทำให้ได้รูปแบบถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมในการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ในส่วนนี้นำเสนอผลการศึกษาการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันในดินโดยวิธีการล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำประปา โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก ศึกษาลักษณะดินปนเปื้อน และการคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม การวิเคราะห์พารามิเตอร์เพื่อเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม ได้แก่ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน (Washing time) ความเร็วในการเขย่า (Mixing speed) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปริมาณดินปนเปื้อน (Liquid to solid ratio) และค่า pH ในการล้าง และนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนที่สอง การศึกษาการบำบัดดินปนเปื้อนในระดับถึงปฏิบัติการ (Bench scale) เริ่มต้นจากการศึกษาการเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน การศึกษาการกรองอนุภาคของเซรามิคเมมเบรน และศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดดินปนเปื้อนในถึงปฏิบัติการ โดยการเดินระบบแบบทีละเทเพื่อหาแนวทางการออกแบบถึงปฏิบัติการสำหรับการบำบัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันด้วยวิธีการล้างดินโดยใช้น้ำและฟองอากาศขนาดเล็ก

#### 4.1 การศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อนน้ำมัน

การทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ดินปนเปื้อนน้ำมันจากแหล่งขุดเจาะปิโตรเลียมจริง ระดับความลึกตั้งแต่ 500 เมตรจากพื้นดินจนถึง 2,050 เมตร ซึ่งสามารถเป็นแบ่งเป็น 7 ระดับความลึก ได้แก่ ชั้นที่ 1 ที่ความลึกของดิน 500 – 840 เมตร ชั้นที่ 2 ที่ความลึกของดิน 840 – 1,070 เมตร ชั้นที่ 3 ที่ความลึกของดิน 1,070 – 1,270 เมตร ชั้นที่ 4 ที่ความลึกของดิน 1,270 – 1,470 เมตร ดินชั้นที่ 5 ที่ความลึกของดิน 1,470 – 1,670 เมตร ความลึกชั้นที่ 6 ที่ความลึกของดิน 1,670 – 1,900 เมตร ดินชั้นที่ 7 ที่ความลึกของดิน 1,900 – 2,050 เมตร ซึ่งดินตัวอย่างที่นำมาทำการศึกษามีลักษณะเปียก โดยดินตัวอย่างระดับชั้นที่ 2 เป็นต้นไปพบว่ามีลักษณะเป็นน้ำโคลน (Drilling mud) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำดินมาผึ่งแห้ง (Air dry soil) เพื่อไม่ให้ภายในดินมีการอมน้ำอยู่ และมีลักษณะเป็นเม็ดดินแห้งมากที่สุด เนื่องจากหากดินมีการอมน้ำปริมาณมาก ทำให้น้ำประปาเข้าไปล้างทำความสะอาดเนื้อดินได้ยาก การทดลองจะนำดินตัวอย่างมาผึ่งแห้งในร่ม (Air dry soil) โดยนำดินตัวอย่างทั้ง 7 ระดับความลึกมาผึ่งแห้งในที่ร่มในตู้ดูดควันและระบายอากาศ (Fume hood) เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง แสดงภาพการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการผึ่งแห้งในร่มของดินดังภาพที่ 4-1 และลักษณะเนื้อดินดังภาพที่ 4-2



(1) ก่อนการฝังแห้ง



(2) หลังการฝังแห้ง

ภาพที่ 4-1 ลักษณะดินตัวอย่างทั้ง 7 ระดับความลึก ก่อนการฝังแห้ง (1) และ หลังการฝังแห้ง (2)



ภาพที่ 4-2 ลักษณะเนื้อดินตัวอย่างทั้ง 7 ระดับความลึก

หลังจากการนำดินมาฝังแห้งครบ 48 ชั่วโมง พบว่าลักษณะเนื้อดินมีตั้งแต่ทรายร่วน กรวด และหิน โดยในระดับความลึกชั้นที่ 5-7 จะมีลักษณะเนื้อดินที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันจากกลุ่มดินตัวอย่างทั้งหมด

#### 4.1.1 ค่าความชื้นภายในดินตัวอย่าง

การวัดค่าความชื้นในดินจะช่วยบอกความสามารถในการอุ้มน้ำ (สถาบันส่งเสริมการ  
สอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2554) การทดลองจะทำการตรวจวัดโดยนำดินไปอบที่อุณหภูมิ 60  
องศาเซลเซียส โดยตรวจวัดค่าความชื้นที่ระยะเวลา 3 ช่วง เพื่อนำไปออกแบบการเตรียมดินในการ  
นำไปทดลอง ได้แก่ 6 ชั่วโมง 8 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง ซึ่งค่าความชื้นภายในดินหลังจาก  
การอบที่ระยะเวลาต่าง ๆ คือน้ำหนักส่วนที่ระเหยไปหลังจากการอบแห้ง แสดงตารางค่าความชื้น  
ภายในดินตัวอย่างดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าความชื้นภายในดินของดินตัวอย่าง

ระดับความลึกของดิน ตัวอย่าง	ความชื้นภายในดิน (%)		
	24 ชั่วโมง*	24 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง
ชั้นที่ 1 (500 – 840 เมตร)	1.41	1.21	1.01
ชั้นที่ 2 (840 – 1,070 เมตร)	1.39	0.79	0.56
ชั้นที่ 3 (1,070 – 1,270 เมตร)	0.26	0.22	0.18
ชั้นที่ 4 (1,270 – 1,470 เมตร)	0.30	0.20	0.15
ชั้นที่ 5 (1,470 – 1,670 เมตร)	1.14	0.85	0.72
ชั้นที่ 6 (1,670 – 1,900 เมตร)	1.18	1.02	0.96
ชั้นที่ 7 (1,900 – 2,050 เมตร)	1.51	1.15	1.10

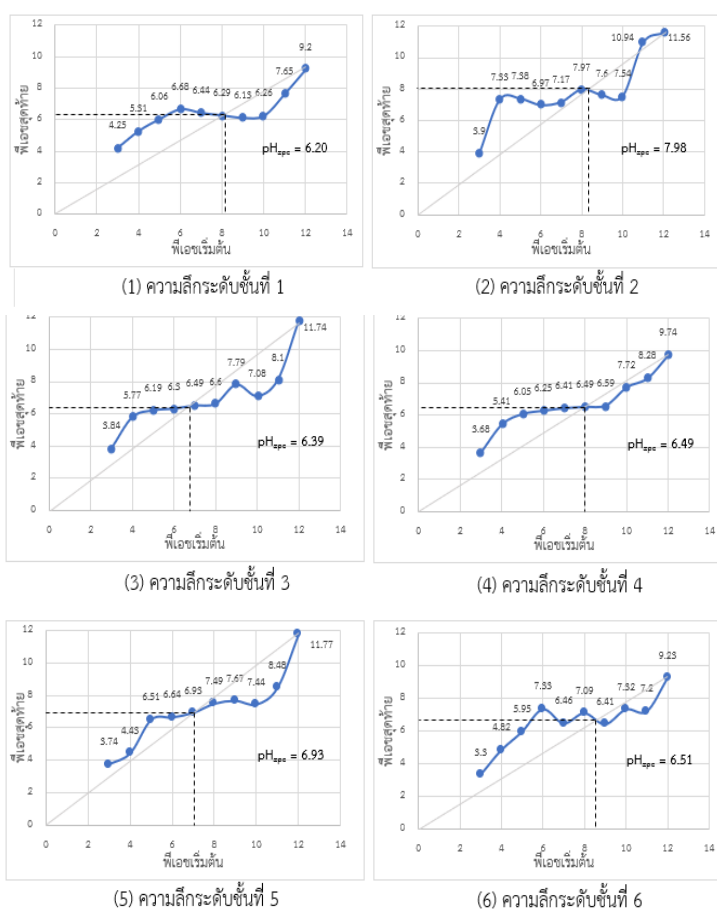
\*การรายงานค่าความชื้นภายในดินจะเลือกใช้ค่าความชื้นภายในดินหลังจากอบที่ระยะเวลา 24  
ชั่วโมงเนื่องจากเป็นระยะเวลาที่วิธีมาตรฐานใช้ในการรายงานผลค่าความชื้นภายในดิน (ASTM  
D2216)

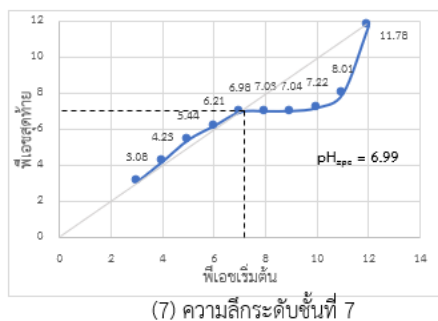
จากผลการศึกษาค่าความชื้นภายในดินพบว่า ปริมาณค่าความชื้นภายในดินอยู่ในช่วงร้อยละ 0.26 – 1.51 แต่หลังจากนำดินไปอบที่ 24 ชั่วโมง ดินยังคงมีความชื้นภายในดินอยู่ จึงเพิ่มระยะเวลาในการอบดิน (48 ชั่วโมง) เพื่อลดการรอน้ำของดินจนเป็นอันมากที่สุด

#### 4.1.2 ค่าพีเอชของดินตัวอย่าง

ค่าพีเอชของดินตัวอย่างของทั้ง 7 ระดับความลึก จะอยู่ในช่วงเบสอ่อนถึงเบสจัดมาก มีค่าพีเอชโดยเรียงจากชั้นที่ 1 ถึง 7 ได้แก่ 7.52 (เบสอ่อน) 8.10 (เบสปานกลาง) 8.64 (เบสจัด) 8.79 (เบสจัด) 9.04 (เบสจัดมาก) 8.35 (เบสปานกลาง) และ 9.19 (เบสจัดมาก) ตามลำดับ โดยจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชของดินจะอยู่ในช่วงเบสสำหรับทุกตัวอย่าง ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าดินมีเกลือจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) อยู่ปริมาณมาก ทำให้ไม่เหมาะแก่การเพาะปลูก และการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากดินที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกจะมีค่าพีเอชประมาณ 6.5 (วิรัชชัย ทอดเสียง, 2555)

#### 4.1.3 ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุนอนุภาคดินเป็นศูนย์ ( $\text{pH}_{zpc}$ )



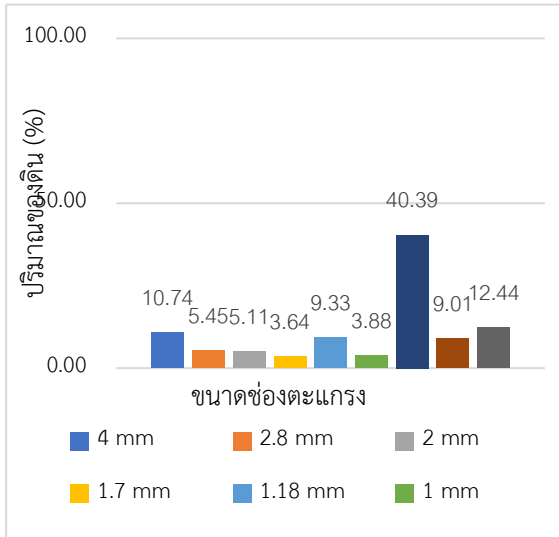


ภาพที่ 4-3 กราฟค่า  $pH_{zpc}$  ของแต่ละระดับชั้นความลึกของดินที่ระดับชั้นความลึกต่าง ๆ

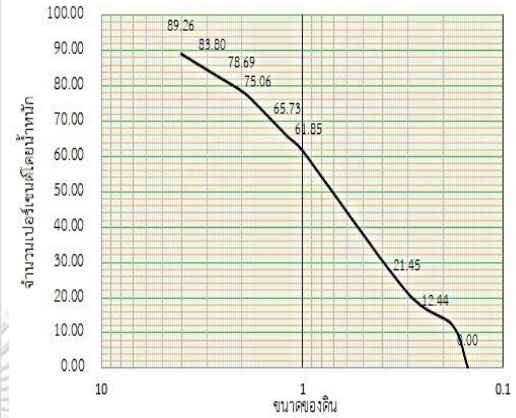
ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนอนุภาคเป็นศูนย์ ( $pH_{zpc}$ ) แสดงดังภาพที่ 4-3 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนอนุภาคเป็นศูนย์ ( $pH_{zpc}$ ) จะอยู่ในช่วงค่าพีเอชกรดอ่อนถึงเบสปานกลาง โดยค่า  $pH_{zpc}$  ของตัวอย่างดินเรียงจากชั้นที่ 1 ถึง 7 ได้แก่ 6.20 7.98 6.39 6.49 6.93 6.51 และ 6.99 ตามลำดับ โดยจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าดินทั้ง 7 ชั้นมีค่า pH ของดินมีค่ามากกว่าค่า  $pH_{zpc}$  แสดงว่าประจุรวมบนตัวดินจะเป็นลบเนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) สถานะนี้อนุภาคดินจึงสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนที่มีประจุบวกได้ดี (Lorenz-Grabowska and Gryglewicz, 2007) ซึ่งจากผลการทดลองจะทำให้ทราบถึงค่าพีเอชที่สามารถนำไปปรับค่าให้ประจุบนอนุภาคเป็นศูนย์ได้ในแต่ละระดับความลึก

#### 4.1.4 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินในแต่ละระดับความลึก (Particle size distribution)

เพื่อบ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของดินปนเปื้อนว่ามีการเกาะอยู่ของน้ำมันอยู่หรือไม่ และคัดเลือกขนาดอนุภาคของดิน เพื่อการทดลองในการล้างทำความสะอาดดิน โดยการวัดการกระจายอนุภาคผ่านเครื่องร่อนตะแกรง (Sieve analysis) โดยก่อนการทดลอง นำดินตัวอย่างที่ผ่านการผึ่งแห้ง (Air dry soil) 48 ชั่วโมง มาเข้าเครื่องร่อนตะแกรงซึ่งประกอบด้วยตะแกรงที่มีขนาดช่องตะแกรงแตกต่างกัน 9 ขนาด ได้แก่ 4 มิลลิเมตร (Mesh no.5) 2.8 มิลลิเมตร (Mesh no.7) 2 มิลลิเมตร (Mesh no.10) 1.7 มิลลิเมตร (Mesh no.12) 1.18 มิลลิเมตร (Mesh no.16) 1 มิลลิเมตร (Mesh no.18) 300 ไมครอน (Mesh no.50) 180 ไมครอน (Mesh no.80) และขนาดเล็กกว่า 0.18 ไมครอน (Pan) โดยแสดงผลการกระจายตัวของขนาดอนุภาคดินภาพที่ 4-4

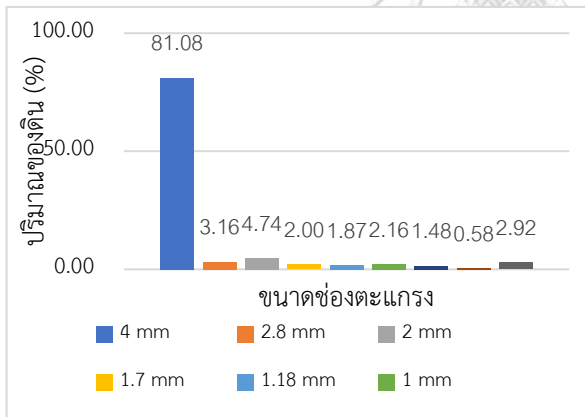


(ก) ปริมาณดินต่อขนาดดิน

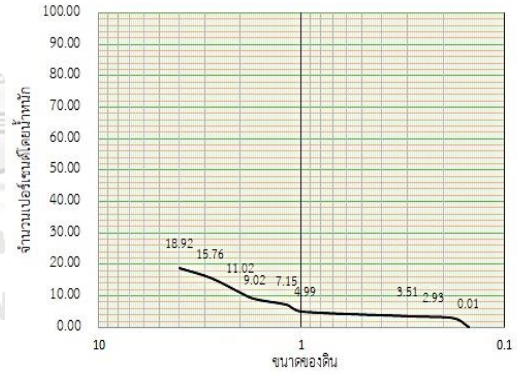


(ข) การกระจายตัวของเม็ด

(1) ความลึกระดับชั้นที่ 1

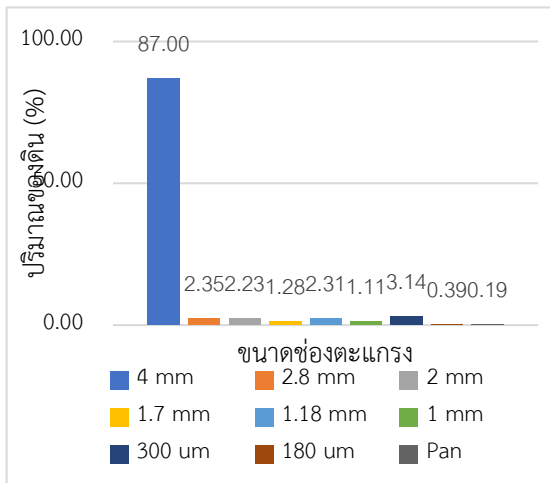


(ก) ปริมาณดินต่อขนาดดิน

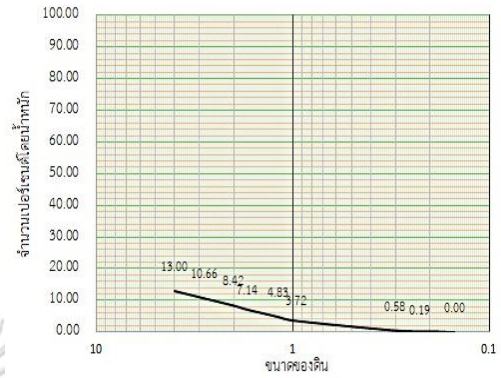


(ข) การกระจายตัวของเม็ด

(2) ความลึกระดับชั้นที่ 2

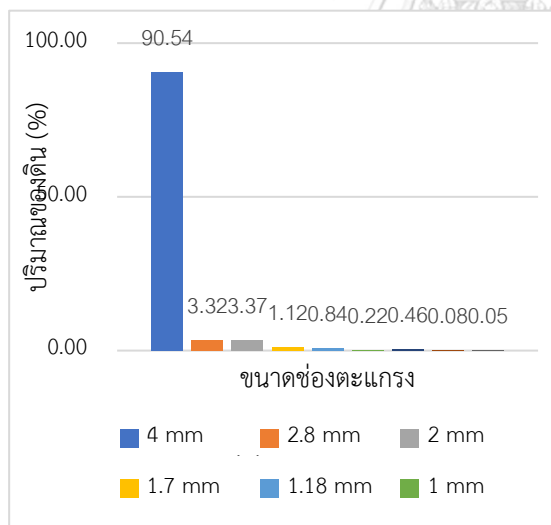


(ก) ปริมาณดินต่อขนาดดิน

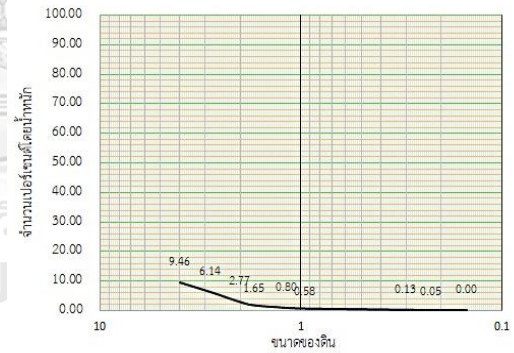


(ข) การกระจายตัวของเม็ดดิน

(3) ความลึกระดับชั้นที่ 3



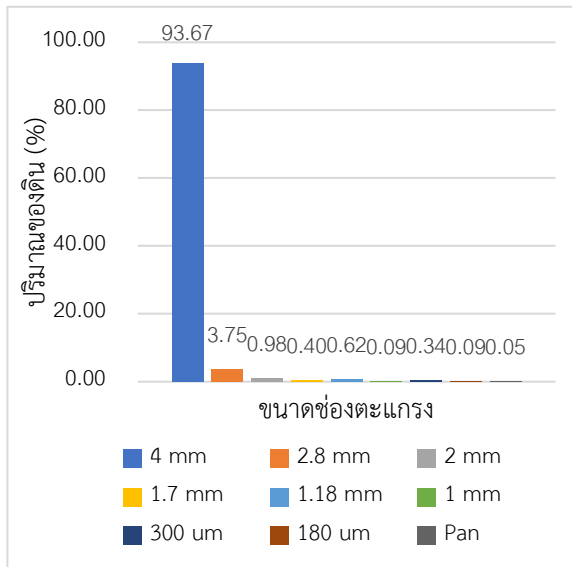
(ก) ปริมาณดินต่อขนาดดิน



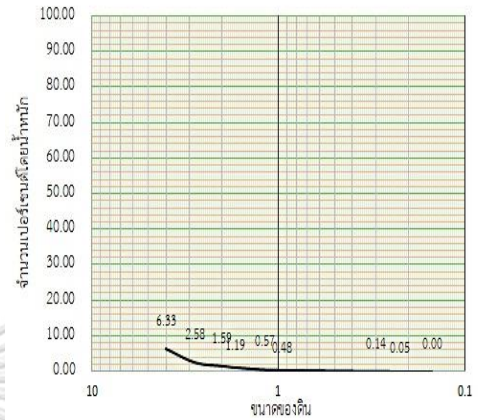
(ข) การกระจายตัวของเม็ดดิน

(4) ความลึกระดับชั้นที่ 4



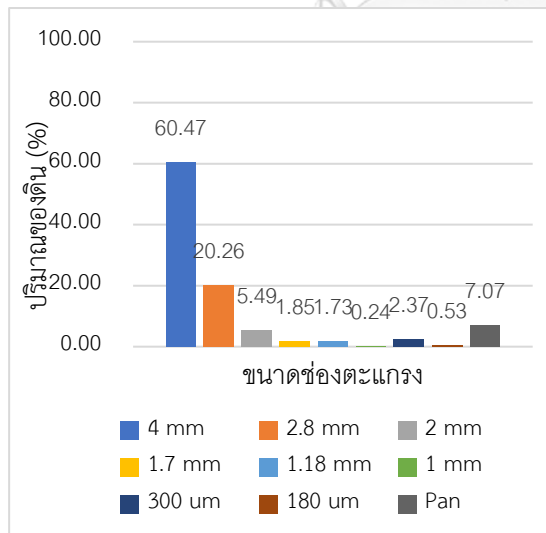


(ก) ปริมาณดินต่อขนาดดิน

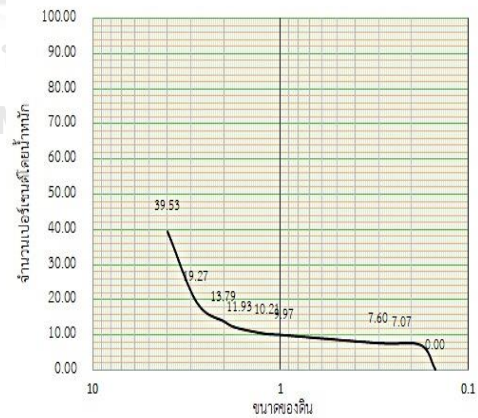


(ข) การกระจายตัวของเม็ดดิน

(5) ความลึกระดับชั้นที่ 5

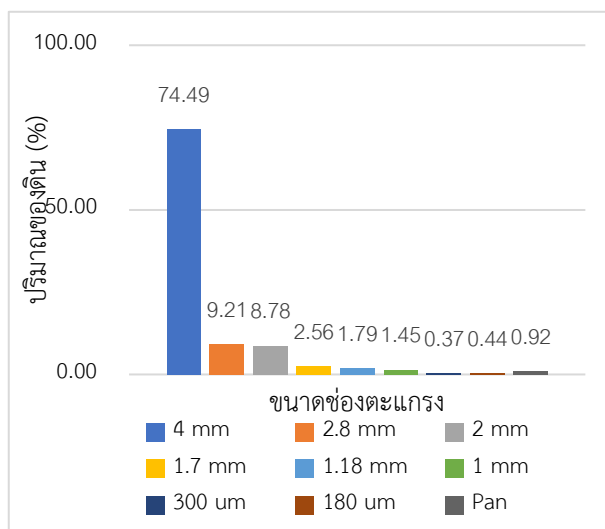


(ก) ปริมาณดินต่อขนาดดิน

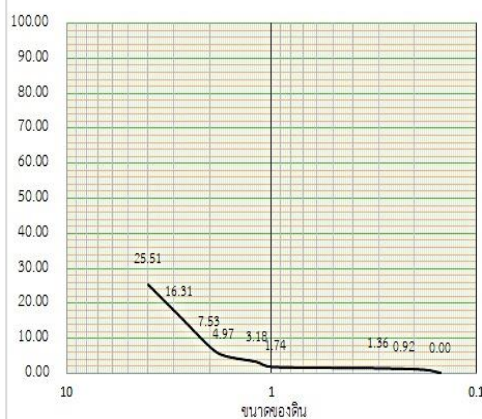


(ข) การกระจายตัวของเม็ดดิน

(6) ความลึกระดับชั้นที่ 6



(ก) ปริมาณดินต่อขนาดดิน



(ข) การกระจายตัวของเม็ดดิน

## (7) ความลึกระดับชั้นที่ 7

ภาพที่ 4-4 กราฟการกระจายตัวของอนุภาคของแต่ละระดับชั้นความลึกของดิน

จากผลการศึกษาพบว่าความลึกของดินชั้น 1 มีการกระจายตัวของอนุภาคมากที่สุด เนื่องจากลักษณะเนื้อดินเป็นทรายร่วน และดินมีการจับตัวเป็นก้อนบางส่วนทำให้ปริมาณการกระจายอนุภาคที่ขนาดต่าง ๆ มีปริมาณมากกว่าดินชั้นอื่น ๆ โดยขนาดอนุภาคที่พบมากที่สุดของดินชั้นที่ 1 คือขนาด 300 ไมครอน มีปริมาณร้อยละ 40.39 สำหรับดินชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ 7 มีขนาดอนุภาคมากกว่า 4 มิลลิเมตรเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากลักษณะเนื้อดินของดินชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ 7 มีลักษณะเป็นหินและกรวดขนาดใหญ่ จึงมีปริมาณดินที่มีขนาดเล็กกว่า 4 มิลลิเมตรมีปริมาณน้อยกว่าดินชั้นที่ 1

จากกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน พบว่าดินชั้นที่ 1 มีแนวโน้มการกระจายตัวขนาดอนุภาคคละกัันดี (Well graded) เนื่องจากลักษณะเส้นกราฟมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และมีจำนวนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพิ่มขึ้นสม่ำเสมอตามแนวโน้ม (Ahmed และคณะ, 2016) โดยดินชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ 7 จัดอยู่ในลักษณะดินที่มีขนาดคละกัันไม่ดี (Poorly graded soil) เนื่องจากปริมาณดินมากกว่าร้อยละ 60.47 ถึง 93.67 อยู่ที่ตะแกรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มิลลิเมตร ทำให้กราฟการกระจายตัวของทั้ง 6 กราฟไปในลักษณะทางเดียวกัน

นอกจากนี้ การพบอนุภาคดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตรอาจบ่งบอกได้ว่าดินปนเปื้อนมีการเกาะตัวของน้ำมันอยู่ สัดส่วนปริมาณดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตรของตัวอย่างดิน

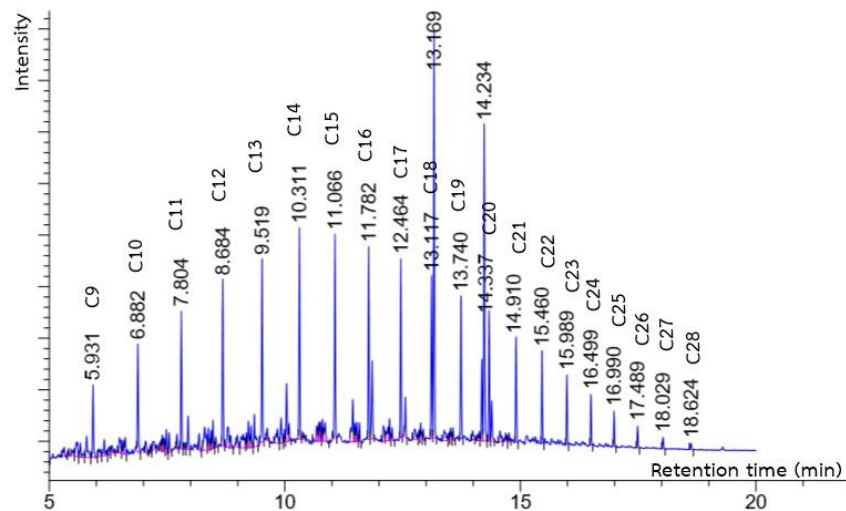
จากชั้นความลึกที่ 1 ถึง 7 ได้แก่ ร้อยละ 21.31 88.98 91.58 87.23 98.41 86.21 และ 92.47 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเทียบการปนเปื้อนของน้ำมันในดินจากลักษณะทางกายภาพ พบว่าดินชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ 7 มีปริมาณดินที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตรมากกว่าร้อยละ 85 ทั้งนี้การคัดเลือกขนาดดินเพื่อนำไปใช้การทดลอง เลือกใช้ดินที่ขนาด 2 มิลลิเมตร (Mesh no.10) หลังจากเตรียมดินโดยการผึ่งแห้ง และคัดเลือกขนาด 2 มิลลิเมตร จะนำดินทุกระดับชั้นความลึกมาตรวจวัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเริ่มต้น ก่อนการนำไปบำบัดดินปนเปื้อนด้วยการล้างทำความสะอาดดิน

#### 4.1.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินปนเปื้อน

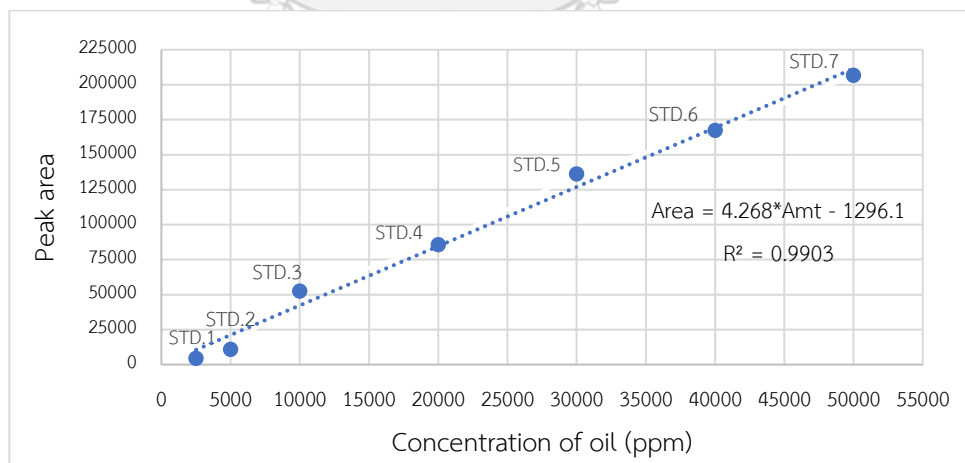
การตรวจวัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน 7 ระดับความลึก โดยใช้เทคนิคการสกัดประเภทของเหลว (Liquid-Phase Extraction) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยม เนื่องจากลดความยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง ลดปริมาณ และลดปริมาณค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย การทดลองจะนำดินที่ทำกรเตรียมไว้ไปสกัดด้วยสารไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) เนื่องจากประสิทธิภาพตัวทำละลายของการสกัดสารจำพวกโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) ของสารไดคลอโรมีเทนมีประสิทธิภาพสูงกว่าสารอะซิโตน (Acetone) และมีความเป็นอันตรายน้อยกว่าอีกด้วย (Haleyur และคณะ, 2016)

ถ้าต้องการเปรียบเทียบค่าที่ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่วัดได้กับมาตรฐานปริมาณปิโตรเลียม จะต้องนำค่าที่วัดได้มาเทียบกับค่ามาตรฐานของสารละลาย จึงมีความจำเป็นในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน (Standard Calibration Curve) ขึ้นมา โดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานจะทำให้ได้สมการมาตรฐานสำหรับหาความเข้มข้นปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน โดยแทนค่าพื้นที่ใต้กราฟนั้น ๆ ในสมการ ซึ่งเตรียมสารละลายมาตรฐานจะใช้น้ำมันดีเซล PTT Ultra Force Diesel ตามมาตรฐาน CEC F-98-08 (DW-10B) เนื่องจากเป็นกลุ่มน้ำมันที่มักพบจากการขุดเจาะปิโตรเลียมในประเทศไทย คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลที่นำมาใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐาน มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.82 (วิธีทดสอบ ASTM D1298) เตรียมสารละลายดีเซลความเข้มข้น 7 จุด ได้แก่ 2,500 5,000 10,000 20,000 30,000 40,000 และ 50,000 ppm โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้ Gas Chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID) คอลัมน์ HP-1 30 เซนติเมตร x 0.32 มิลลิเมตร x 0.25 ไมโครเมตร Inlet: Split (1:50) Injection volume 1  $\mu\text{L}$  Carrier gas 2 mL/min  $\text{N}_2$  Oven program 45°C for 2 min, then 15°C/min to 300°C Injection temperature 300°C และ Detector temperature 320°C (Suspes และคณะ, 2012) ซึ่งใช้สภาวะการในการทดลองเดียวกันในการตรวจวัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนตลอดงานวิจัย สามารถแสดงภาพ

กราฟจากเครื่อง Gas Chromatography ของสารละลายมาตรฐาน (น้ำมันดีเซล) ที่ความเข้มข้น 40,000 ppm ดังภาพที่ 4-5 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (Intensity) และระยะเวลาที่อยู่ในคอลัมน์ (Retention time, min) และแสดงภาพกราฟสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นจุดต่าง ๆ ของน้ำมันดีเซลดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-5 สารละลายมาตรฐาน (น้ำมันดีเซล) ที่ความเข้มข้น 40,000 ppm



ภาพที่ 4-6 กราฟสารละลายมาตรฐานดีเซล (Standard Calibration Curve)

จากกราฟภาพที่ 4-5 พบว่าสารละลายมาตรฐาน Diesel range organics (DRO) พบว่าจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง C<sub>9</sub> (Nonane) ถึง C<sub>28</sub> (Octacosane) โดยจำนวนคาร์บอนที่พบใน

กราฟสามารถทราบได้จากการเทียบระยะเวลาที่อยู่ในคอลัมน์ (Retention time) จากสภาวะการทดลองที่มีคอนดิชันใกล้เคียงกันมากที่สุด และการพบตำแหน่งของ C<sub>18</sub> (o-Terphenyl (surr.)) ที่ระยะเวลา 13.169 นาที และ C<sub>19</sub> (5- $\alpha$ -Androstane (I.S.)) ที่ระยะเวลา 14.234 นาที ทำให้สามารถเทียบเคียงกับจำนวนคาร์บอนที่พบ ณ เวลาต่าง ๆ (Ruzer และ Harley, 2004) สาเหตุการพบ o-Terphenyl (surr.) และ 5- $\alpha$ -Androstane (I.S.) เนื่องจากทั้งคู่เป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติที่ใส่ลงในน้ำมันดีเซล (Grinberg และ Grushka, 2008) ทั้งนี้สามารถนำตำแหน่งของกราฟที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐานเพื่อบอกชนิดของคาร์บอนได้ โดยจำนวนคาร์บอนกลุ่ม C<sub>9</sub> (Nonane) ถึง C<sub>28</sub> (Octacosane) ที่พบจะอยู่ในหมู่ฟังก์ชัน n-Alkanes นั่นคือมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ

จากกราฟภาพที่ 4-6 พบว่า สารละลายมาตรฐานเป็นค่าผลรวมพื้นที่ใต้กราฟของพีค C<sub>9</sub> (Nonane) ถึง C<sub>28</sub> (Octacosane) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่ามีค่า R-Square อยู่ที่ 0.9903 และกราฟสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นจุดต่าง ๆ ทำให้ได้สมการเส้นตรงเพื่อนำไปคำนวณปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน แสดงค่าสมการการคำนวณปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนดังสมการที่ 4-1

$$(4-1) \quad \text{Peak Area} = 4.268 * \text{Concentration of oil} - 1296.1$$

$$\text{เมื่อ} \quad \text{Peak Area} = \text{พื้นที่ใต้กราฟจากโครมาโทแกรม}$$

$$\text{Concentration of oil} = \text{ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)}$$

เมื่อนำดินตัวอย่างทั้ง 7 ระดับความลึกมาตรวจวัดปริมาณไฮโดรคาร์บอนในดิน โดยเรียงจากระดับชั้นความลึกที่ 1 ถึงระดับชั้นความลึกที่ 7 แสดงโครมาโทแกรมของดินปนเปื้อนทั้ง 7 ความลึกที่ ภาคผนวก ก. และปริมาณไฮโดรคาร์บอนในดิน แสดงดังตารางที่ 4-2 ได้แก่

ตารางที่ 4-2 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนในดินจากทุกระดับความลึก

ระดับชั้นความลึกของดิน	ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
ชั้นที่ 1 (500 – 840 เมตร)	9,727.12 ± 717.70
ชั้นที่ 2 (840 – 1,070 เมตร)	11,672.87 ± 575.40
ชั้นที่ 3 (1,070 – 1,270 เมตร)	27,046.69 ± 841.01
ชั้นที่ 4 (1,270 – 1,470 เมตร)	28,865.11 ± 773.24
ชั้นที่ 5 (1,470 – 1,670 เมตร)	34,162.41 ± 1,894.02
ชั้นที่ 6 (1,670 – 1,900 เมตร)	49,504.78 ± 1,749.70
ชั้นที่ 7 (1,900 – 2,050 เมตร)	58,8643.13 ± 527.84

จากการศึกษาพบจำนวนคาร์บอนของดินปนเปื้อนทุกระดับความลึกอยู่ในช่วง C<sub>12</sub> (Dodecane) ถึง C<sub>22</sub> (Docosane) ซึ่งอยู่ในช่วงของกลุ่มดีเซล (Diesel range organics, DROs) โดยจากการตรวจวัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนพบว่าปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 มีปริมาณน้อยกว่าชั้นอื่น ๆ เนื่องจากลักษณะเนื้อดินทางกายภาพที่เป็นทรายร่วนและหิน จึงอาจทำให้การเกาะตัวของน้ำมันบนดินมีปริมาณน้อย สำหรับดินชั้นที่ 3 ถึงดินชั้นที่ 7 มีปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่สูงกว่าดิน 2 ชั้นแรก เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเนื้อดินที่ค่อนข้างจับตัวเป็นก้อน จึงอาจส่งผลต่อการเกาะตัวของน้ำมันต่อดิน ทำให้ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนมากกว่าดินชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โดยเมื่อทราบปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเริ่มต้นของดินปนเปื้อน สามารถนำไปคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากการล้างทำความสะอาดดินในการศึกษาส่วนที่ 4.2 ได้

ซึ่งเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานดินที่มีการปนเปื้อนจำพวกก๊อตุสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินที่ยอมรับได้ของสภาพปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งชาติประเทศ

ออสเตรเลีย (National Environmental Protection Council: NEPC) สำหรับอุตสาหกรรม พบว่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทุกระดับชั้นความลึก เนื่องจากเกณฑ์ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินต้องมีค่าไม่เกิน 5,600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ต้องมีการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันเหล่านี้ ก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ

#### 4.1.6 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนแบบโอดของอนุภาค

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนแบบโอดของอนุภาค (Column settling test) เพื่อนำไปประมาณเวลาในการปล่อยตกตะกอนของดินปนเปื้อน โดยการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม ทำการทดลองกับอนุภาค 2 ชนิดได้แก่ เบนโทไนท์ และดินปนเปื้อนน้ำมัน ทำการทดลองในคอลัมน์ ซึ่งให้อนุภาคตกตะกอนตามระยะเวลา และเก็บตัวอย่างที่ระดับความสูง 20 และ 60 เซนติเมตรตามเวลาเพื่อนำไปตรวจวัดปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เปลี่ยนแปลง (มันส์ตันตัลลูลเวสท์, 2537) เนื่องจากระดับความสูง 2 ระดับแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของของแข็งแขวนลอยตามระยะเวลา โดยนอกจากอนุภาคดินที่นำมาทดสอบแล้ว ยังเลือกใช้เบนโทไนท์มาทดสอบการตกตะกอนอีกด้วย เนื่องจากขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์โดยส่วนใหญ่อยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เล็กที่สุดของอนุภาคจากการศึกษาขนาดอนุภาคของ Drill cuttings จากแหล่งเดียวกัน โดยจะมีขนาดเล็กที่สุดอยู่ในช่วง 0.5 – 2 มิลลิเมตร (Poyai, 2016) โดยอัตราส่วนระหว่างปริมาณอนุภาค (เบนโทไนท์ และดินปนเปื้อน) ต่อน้ำ เท่ากับ 1 ต่อ 40 ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการรายงานค่าผลการตกตะกอนแบบโอด ได้แก่

$C_0$  = ค่าของแข็งแขวนลอยของอนุภาคที่เวลาเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C$  = ค่าของแข็งแขวนลอยของอนุภาคที่ระยะเวลานั้น ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$h$  = ระยะความสูงที่เก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)

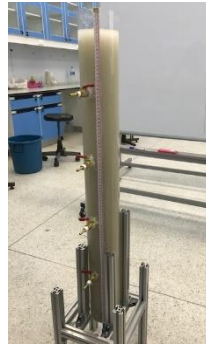
$t$  = เวลาที่เก็บตัวอย่าง (นาที)

##### 4.1.6.1 การตกตะกอนแบบโอดของเบนโทไนท์

การตกตะกอนแบบโอดของอนุภาคเบนโทไนท์ สามารถแสดงภาพการตกตะกอนของเบนโทไนท์ตามระยะเวลาแสดงดังภาพที่ 4-7 ผลการทดลองการตกตะกอนแสดงดังตารางที่ 4-3 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคที่เหลืออยู่และความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคเบนโทไนท์ แสดงดังภาพที่ 4-8



(1) 0 นาที



(2) 5 นาที



(3) 10 นาที



(4) 15 นาที



(5) 20 นาที



(6) 40 นาที



(7) 60 นาที



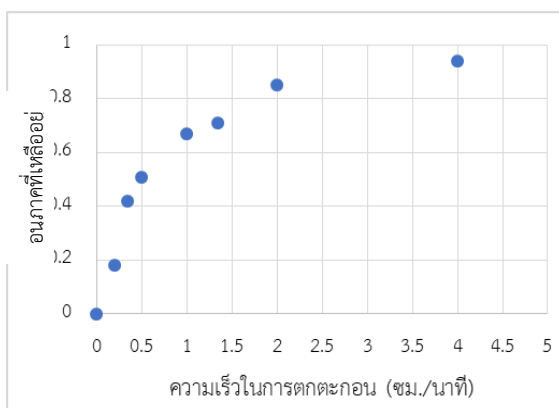
(8) 100 นาที

ภาพที่ 4-7 ภาพการตกตะกอนของเบนโทไนท์ตามระยะเวลา

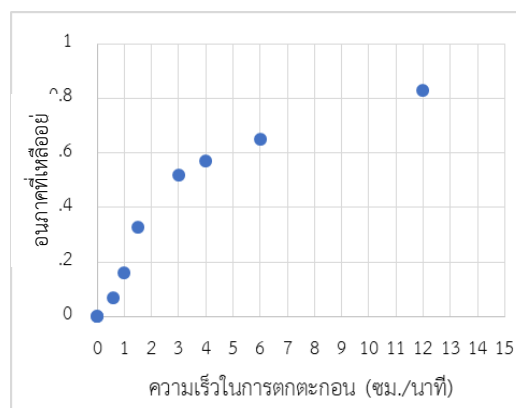
ตารางที่ 4-3 ผลการตกตะกอนแบบโดดของอนุภาคเบนโทไนท์

เวลา (นาที)	0	5	10	15	20	40	60	100
$C/C_0$ ที่ระดับ 20 ซม.	1	0.94	0.85	0.71	0.67	0.51	0.42	0.18
$h/t$ ที่ระดับ 20 ซม.	-	4	2	1.34	1.0	0.50	0.34	0.20
$C/C_0$ ที่ระดับ 60 ซม.	1	0.83	0.65	0.57	0.52	0.33	0.16	0.07
$h/t$ ที่ระดับ 60 ซม.	-	12	6	4	3	1.5	1	0.6





(1) ระดับ 20 เซนติเมตร



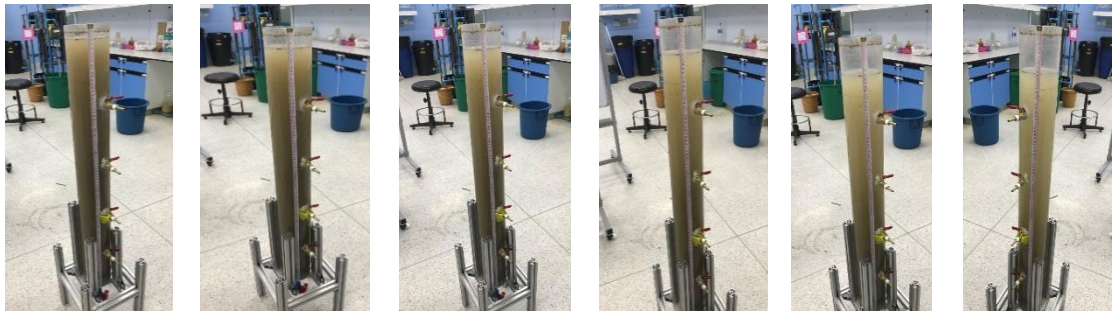
(2) ระดับ 60 เซนติเมตร

ภาพที่ 4-8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอนภาคที่เหลืออยู่และความเร็วในการตกตะกอนของอนภาค  
เบนโทไนท์

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเร็วในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น อนภาคที่เหลืออยู่จะน้อยลง นั่นหมายถึงอนภาคถูกกำจัดมากขึ้น ซึ่งจากกราฟผลการทดลอง การกำจัดของแข็งแขวนลอยมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วในการตกตะกอน

#### 4.1.6.2 การตกตะกอนแบบโตดของดินปนเปื้อนน้ำมัน

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนแบบโตดของดินปนเปื้อน จะใช้ดินปนเปื้อนที่ระดับความลึกชั้นที่ 3 ถึง 7 ผสมกัน เนื่องจากมีลักษณะเนื้อดินทางกายภาพที่ใกล้เคียงกัน และขนาดใกล้เคียงกัน การตกตะกอนแบบโตดของดินปนเปื้อน สามารถแสดงภาพการตกตะกอนของดินปนเปื้อนตามระยะเวลาแสดงดังภาพที่ 4-9 ผลการทดลองการตกตะกอนแสดงดังตารางที่ 4-4 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอนภาคที่เหลืออยู่และความเร็วในการตกตะกอนของดินปนเปื้อน แสดงดังภาพที่ 4-10



(1) 0 นาที

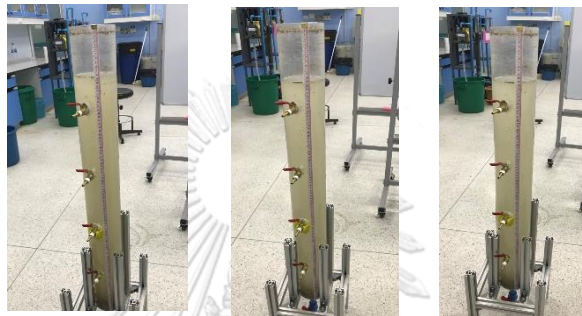
(2) 1 นาที

(3) 2 นาที

(4) 3 นาที

(5) 4 นาที

(6) 5 นาที



(7) 10 นาที

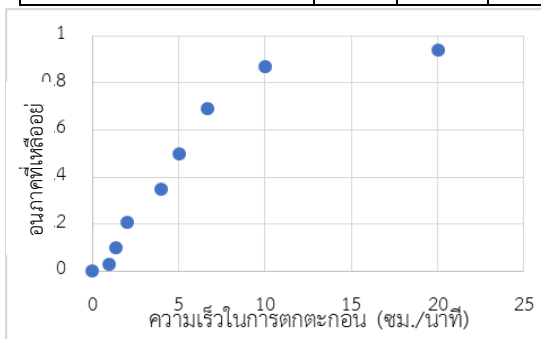
(8) 15 นาที

(9) 20 นาที

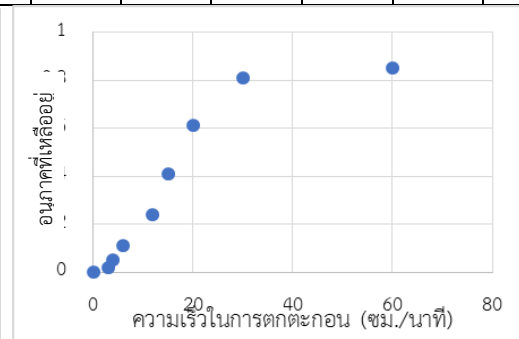
ภาพที่ 4-9 ภาพการตกตะกอนของดินปนเปื้อนตามระยะเวลา

ตารางที่ 4-4 ผลการตกตะกอนแบบโดคของอนุภาคดินปนเปื้อน

เวลา (นาที)	0	1	2	3	4	5	10	15	20
$C/C_0$ ที่ระดับ 20 ซม.	1	0.94	0.87	0.69	0.5	0.35	0.21	0.1	0.03
$h/t$ ที่ระดับ 20 ซม.	-	20	10	6.67	5	4	2	1.33	1
$C/C_0$ ที่ระดับ 60 ซม.	1	0.85	0.81	0.61	0.41	0.24	0.11	0.05	0.02
$h/t$ ที่ระดับ 60 ซม.	-	60	30	20	15	12	6	4	3



(1) ระดับ 20 เซนติเมตร



(2) ระดับ 60 เซนติเมตร

ภาพที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคที่เหลืออยู่และความเร็วในการตกตะกอนดินปนเปื้อน

จากผลการทดลองระหว่างอนุภาคเบนโทไนท์และดินปนเปื้อน ดินจะตกตะกอนเร็วที่สุดในช่วงเริ่มต้นถึง 5 นาที เมื่อได้ช่วงระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างของแต่ละอนุภาคจะนำไปทดลองในคอลัมน์ ซึ่งเก็บตัวอย่างที่จุดความสูงจากฐานด้านล่าง 20 เซนติเมตร และความสูงจากฐานด้านล่าง 60 เซนติเมตร ผลการทดลองการตกตะกอนแบบโตนของอนุภาคเบนโทไนท์

จากผลการทดลองความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ในการกำจัดอนุภาคได้ จากภาพ 4-9 และ 4-10 เมื่อทราบความเร็วในการตกตะกอน (แกน X) (ซม./นาที) สามารถลากกราฟเพื่อหาการกำจัดอนุภาคในแกน Y ได้ และผลจากการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตกตะกอนของอนุภาค พบว่าอนุภาคเบนโทไนท์ถูกกำจัดจนเห็นน้ำใสเมื่อปล่อยให้ตกตะกอนที่ระยะเวลา 60 นาที โดยมี ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยร้อยละ 92.28 และอนุภาคดินปนเปื้อนถูกกำจัดจนเห็นน้ำใส เมื่อปล่อยให้ตกตะกอนที่ระยะเวลา 20 นาที โดยมีการวัดค่าของแข็งแขวนลอย ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคร้อยละ 98.51 ทั้งนี้ ผลการตกตะกอนสามารถนำไปประมาณเวลาในการตกตะกอนของดินปนเปื้อนต่อไปได้

#### 4.2 การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม

หลังจากการศึกษาลักษณะของดินปนเปื้อนน้ำมัน นำมาสู่การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม โดยดินที่นำมาใช้ในการบำบัดดินปนเปื้อนคือดินระดับชั้นความลึกที่ 3 เนื่องด้วยระดับชั้นความลึกที่ 3 ถึง 7 ลักษณะทางกายภาพของเนื้อดินใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำดินปนเปื้อนที่ระดับความลึกที่ 3 ผึ่งแห้งเพื่อเตรียมการทดลองมีระยะเวลาน้อยกว่าระดับชั้นความลึกดินที่ 5 ถึง 7 จึงง่ายต่อการเตรียมดินปนเปื้อนในการทดลอง และระดับชั้นความลึกดินที่ 5 ถึง 7 มีปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนสูงเกินไป อาจจะต้องมีการบำบัดอื่นร่วมด้วย สามารถสรุปลักษณะดินปนเปื้อนจากดินปนเปื้อนระดับชั้นความลึกที่ 3 ได้ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ลักษณะดินปนเปื้อนจากดินปนเปื้อนระดับชั้นความลึกที่ 3

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้
1. ระดับความลึก	1,070 – 1,270 เมตร
2. สัดส่วนปริมาณขนาดของดิน	ใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ร้อยละ 89.3 เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ร้อยละ 2.2 เล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ร้อยละ 8.5
3. ค่าความชื้นภายในดิน	ร้อยละ 0.26
4. ค่าพีเอชในดิน	8.64 (เบสแก่)
5. ค่าพีเอชที่ทำให้อนุภาคดินไม่แสดงผลของประจุ (pH <sub>zpc</sub> )	6.39
6. ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (Total Petroleum Hydrocarbon, TPH)	27,046.69 ± 841.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

การทดลองที่ 4.2 จะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองที่ 4.2.1 การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม และการทดลองที่ 4.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญ

#### 4.2.1 การคัดเลือกสภาวะการทดลองที่เหมาะสม

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำประปา ที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนสูงที่สุด โดยพารามิเตอร์ที่ล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำประปาแบ่งออกเป็น 4 พารามิเตอร์ และ 3 ระดับ แสดงดังภาพที่ 3-7 ตัวชี้วัดของพารามิเตอร์ทั้งหมด คือ ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH removal efficiency) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-2

$$\text{TPH Removal efficiency (\%)} = [1 - (C_f/C_i)] \times 100\% \quad (4-2)$$

เมื่อ  $C_i$  คือ ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินเริ่มต้น (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

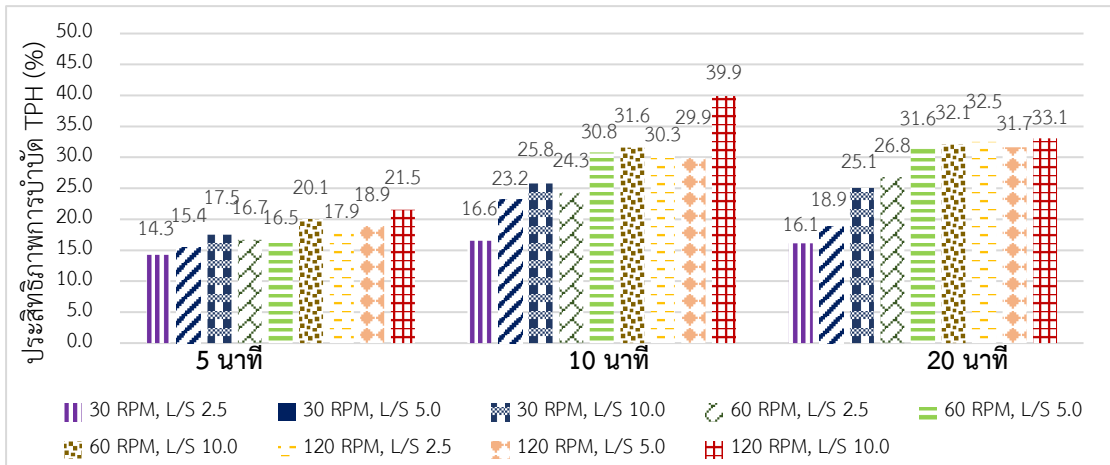
$C_f$  คือ ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินหลังล้าง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

จากผลการศึกษา สามารถแสดงประสิทธิภาพการบำบัดความเข้มข้นปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากการล้างทำความสะอาดดินที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4-6 และแสดงการคำนวณและโครมาโทแกรมที่ภาคผนวก ข

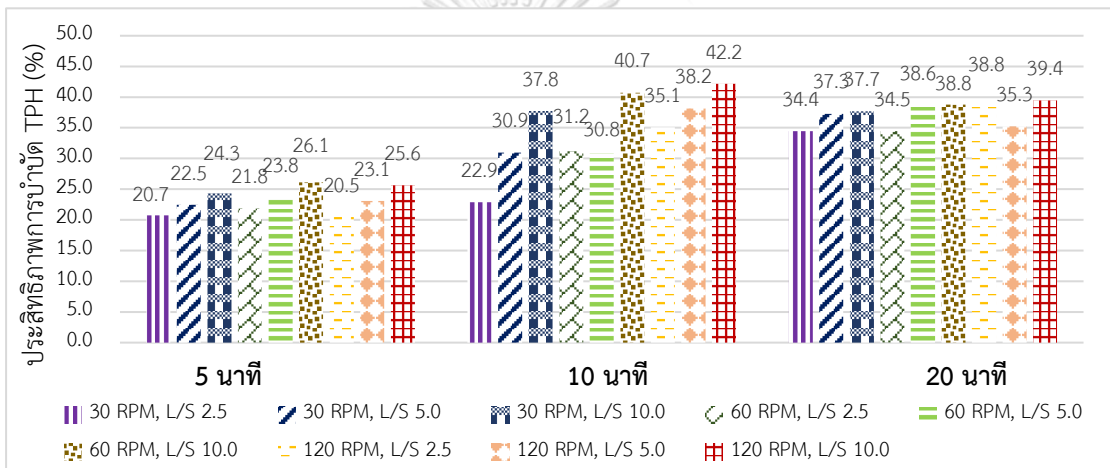
ตารางที่ 4-6 ประสิทธิภาพการบำบัดความเข้มข้นปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน

ระยะเวลา ในการ ล้าง (นาที)	ความเร็ว ในการ เขย่า (รอบต่อ นาที)	ประสิทธิภาพการบำบัด ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (ร้อยละ)								
		อัตราส่วนน้ำประปาต่อดิน 2.5 มิลลิลิตร/กรัม			อัตราส่วนน้ำประปาต่อดิน 5.0 มิลลิลิตร/กรัม			อัตราส่วนน้ำประปาต่อดิน 10.0 มิลลิลิตร/กรัม		
		<pH <sub>zpc</sub>	=pH <sub>zpc</sub>	>pH <sub>zpc</sub>	<pH <sub>zpc</sub>	=pH <sub>zpc</sub>	>pH <sub>zpc</sub>	<pH <sub>zpc</sub>	=pH <sub>zpc</sub>	>pH <sub>zpc</sub>
5	30	14.26	20.74	13.20	15.43	22.45	14.60	17.52	24.31	16.29
	60	16.69	21.82	16.85	16.46	23.75	17.51	20.06	26.12	18.16
	120	17.87	20.47	16.25	18.92	23.07	17.81	21.54	25.62	18.34
10	30	16.55	22.88	16.60	23.16	30.94	19.28	25.76	37.76	22.81
	60	24.27	31.24	18.38	30.78	30.78	22.36	31.59	40.70	25.05
	120	30.29	35.08	19.41	29.94	38.16	25.38	39.89	42.15	30.19
20	30	16.12	34.43	15.47	18.87	37.28	19.11	25.05	37.68	20.24
	60	26.80	34.46	20.65	31.60	38.59	24.40	32.07	38.76	27.68
	120	32.48	38.78	22.78	31.65	35.25	28.97	33.09	39.44	24.65

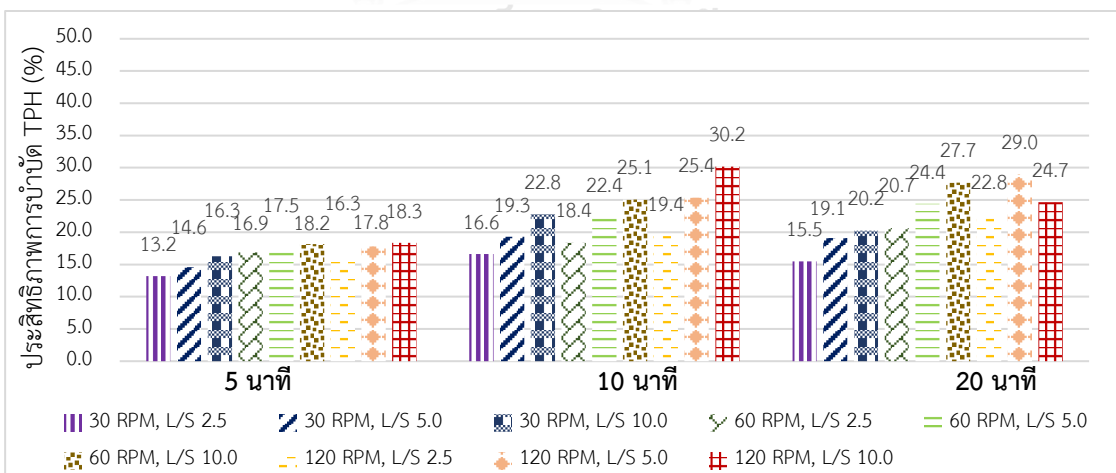
จากผลการบำบัดปริมาณปิโตรไฮโดรคาร์บอน จะแสดงผลการทดลองจำนวน 3 กราฟที่แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4-11



(1) ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้าง น้อยกว่า pH<sub>zpc</sub>



(2) ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้าง เท่ากับ pH<sub>zpc</sub>



(3) ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้าง มากกว่า pH<sub>zpc</sub>

ภาพที่ 4-11 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่สภาวะการล้างทำความสะอาดต่าง ๆ

จากภาพที่ 4-11 พบว่า สภาวะที่ดีที่สุดคือ ค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที และ อัตราส่วนระหว่างน้ำและดินปนเปื้อน 10 มิลลิลิตรต่อกรัม ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ถึงร้อยละ 42.15 สามารถอธิบายผลของพารามิเตอร์ที่ศึกษาต่อประสิทธิภาพการบำบัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนได้ ดังนี้

#### 4.2.1.1 ค่าพีเอชในการล้างทำความสะอาดดิน (pH)

ทำการทดลองโดยใช้ค่าพีเอชในการล้าง 3 ระดับที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดดิน ได้แก่ ค่าน้อยกว่า  $pH_{zpc}$  (ค่าพีเอชเท่ากับ 3) ค่าเท่ากับ  $pH_{zpc}$  (ค่าพีเอชเท่ากับ 6.39) และ ค่ามากกว่า  $pH_{zpc}$  (ค่าพีเอชเท่ากับ 11) โดยแบ่งผลการทดลองจำนวน 3 กราฟโดยเทียบกับระยะเวลาในการล้าง ได้แก่ ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 10 และ 20 นาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น เมื่อปรับค่าพีเอชในการล้างทำความสะอาดดินเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  (ค่าพีเอชที่ทำให้อนุภาคดินไม่แสดงผลของประจุ) โดยค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที และอัตราส่วนระหว่างน้ำและดินปนเปื้อน 10 มิลลิลิตรต่อกรัม ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ถึงร้อยละ 42.15 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอชในการล้าง 3 ค่า สามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากมากไปน้อยเมื่อเทียบจากสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดแต่ค่าพีเอชในการล้างแตกต่างกัน ได้แก่ ค่าพีเอชในการล้างเท่ากับ  $pH_{zpc}$  น้อยกว่า  $pH_{zpc}$  และมากกว่า  $pH_{zpc}$  ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 42.15 39.89 และ 30.19 ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อพีเอชในการล้างอยู่ในช่วงกรดจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่าช่วงพีเอชที่เป็นเบส เนื่องจากค่าพีเอชในดินปนเปื้อนอยู่ในช่วงเบส (ประจุลบ) จึงทำให้สารล้างที่มีค่าพีเอชในช่วงกรด (ประจุบวก) จับตัวกันและทำให้ประจุบนอนุภาคดินเป็นศูนย์ได้มากขึ้น ซึ่งการปรับค่าพีเอชในการล้าง ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อปรับค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  เนื่องจากเมื่อค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่าที่ทำให้ประจุบนอนุภาคเป็นศูนย์ ( $pH_{zpc}$ ) อนุภาคไม่มีประจุ ทำให้สารล้าง (น้ำประปา) เข้าจับกับดินได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากน้ำประปาและดินมีโอกาสการสัมผัสกันมากขึ้น

#### 4.2.1.2 อัตราส่วนน้ำประปาต่อดิน (L/S ratio)

ทำการทดลองโดยมีอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดิน 3 ระดับที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดดิน ได้แก่ 2.5 5.0 และ 10.0 มิลลิลิตร/กรัม พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ

ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำประปาและดินเพิ่มขึ้น โดยจากสภาวะการทดลองที่ดีที่สุด (ค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที และระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที) โดยสามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากมากไปน้อยเมื่อเทียบจากอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินแตกต่างกัน ได้แก่ 10.0 5.0 และ 2.5 มิลลิลิตร/กรัม ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ ร้อยละ 42.15 38.16 และ 35.06 ตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มความสามารถที่ทำให้น้ำมันละลายออกมาได้มากขึ้น ภายใต้ความสามารถในการละลายนั้น ๆ ของน้ำมัน โดยการทดลองมีการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำมันประปาต่อดินปนเปื้อนเป็น 15.0 มิลลิลิตรต่อกรัม พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 37.45 ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำมันประปาต่อดินปนเปื้อน 10 มิลลิลิตรต่อกรัม ซึ่งแสดงว่าน้ำจะละลายได้เฉพาะส่วนที่น้ำมันละลายได้เท่านั้น ซึ่งน้ำมันส่วนที่ละลายออกมาไม่ได้ หากเพิ่มปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้นก็ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน โดยความสามารถในการละลายของน้ำมันแต่ละตัว มาจากสมบัติเฉพาะตัวของคาร์บอนในนั้น ๆ เช่น คาร์บอนมีทั้งชนิดที่สามารถละลาย/ไม่ละลายน้ำได้ ทั้งนี้อัตราส่วนระหว่างน้ำมันประปาต่อดินปนเปื้อน 10 มิลลิลิตรต่อกรัม เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดของงานวิจัยนี้ แต่อัตราส่วนนี้ไม่สามารถอ้างอิงถึงประสิทธิภาพต่องานวิจัยอื่นได้ เนื่องจากดินแต่ละแหล่งมีความสามารถของน้ำมันที่ละลายออกมาแตกต่างกัน อัตราส่วนนี้จึงเป็นอัตราส่วนที่แนะนำเท่านั้น

#### 4.2.1.3 ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน (Washing time)

การทดลองโดยมีระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 3 ระดับที่ ได้แก่ 5 10 และ 20 นาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนสูงที่สุด เมื่อระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินเท่ากับ 10 นาที โดยเมื่อควบคุมค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที และอัตราส่วนระหว่างน้ำและดินปนเปื้อน 10 มิลลิลิตรต่อกรัม (สภาวะการบำบัดที่ดีที่สุด) แต่ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินแตกต่างกัน สามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากมากไปน้อย ได้แก่ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที 20 นาที และ 5 นาที (ร้อยละ 39.44 42.15 และ 23.26) ตามลำดับ โดยแสดงให้เห็นว่าการล้างทำความสะอาดดินที่เหมาะสม ถ้าระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินเพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาในการเจอกันระหว่างน้ำและดินก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ส่งผลให้มุมสัมผัส



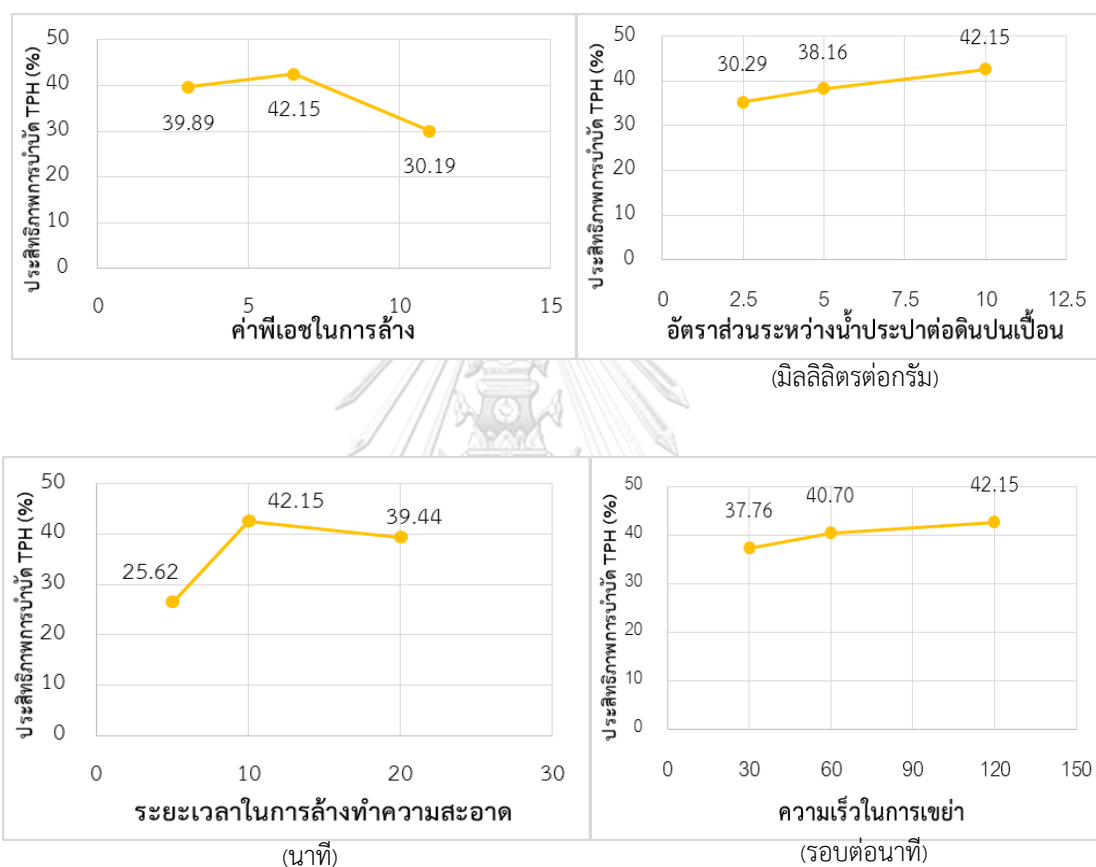
(Contact angle) ระหว่างดินกับน้ำมันเพิ่มมากขึ้น ทำให้เพิ่มโอกาสให้น้ำมันหลุดออกจากดิน ซึ่งการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดินต้องการระยะเวลาที่เพียงพอที่ทำให้น้ำมันกับดินแยกออกจากกันได้ ถ้าระยะเวลามากนี้ ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนก็จะเริ่มคงที่ (Gopur และคณะ, 2003) โดยหากระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินมากเกินไป น้ำมันที่หลุดออกจากดิน มีแนวโน้มกลับเข้ามาในดินอีกครั้ง (Urum และคณะ, 2005) ทั้งนี้ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ 10 นาที และมีแนวโน้มที่ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนไม่ค่อยเปลี่ยนที่ระยะเวลา 20 นาที

#### 4.2.1.4 ความเร็วในการเขย่า (Mixing speed)

การทดลองโดยใช้ค่าความเร็วในการเขย่าในการล้าง 3 ระดับที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดดิน ได้แก่ 30 60 และ 120 รอบต่อนาที จากการศึกษาความเร็วในการเขย่าที่ใช้ในการล้าง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการเขย่า (รอบต่อนาที) เพิ่มขึ้น โดยจากสภาวะที่ดีที่สุดคือ ค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำและดินปนเปื้อน 10 มิลลิลิตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วในการเขย่าในการล้างสามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากมากไปน้อย ได้แก่ 120 60 และ 30 รอบต่อนาที ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ ร้อยละ 42.15 40.7 และ 37.76 ตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการเขย่าที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วในการเขย่ามาก ทำให้อนุภาคดินมีการแตก ส่งผลให้พื้นที่ผิวของดินเพิ่มมากขึ้น และทำให้สารล้าง (น้ำประปา) เข้าไปล้างทำความสะอาดดินปนเปื้อนได้ดียิ่งขึ้น ถ้าความเร็วในการเขย่าน้อยเกินไป จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนต่ำ เนื่องจากน้ำประปาเข้าถึงเนื้อดินยากขึ้น ทำให้โอกาสที่น้ำประปาเข้าไปล้างทำความสะอาดในเนื้อดินต่ำลง ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนขึ้นกับความสามารถในการละลายนั้นของน้ำมันเช่นกัน โดยการทดลองมีการเพิ่มความเร็วในการเขย่าเป็น 150 180 และ 200 รอบต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเท่ากับร้อยละ 41.62 39.26 และ 35.02 ตามลำดับ แสดงโครมาโทแกรมในภาคผนวก ข. (ตารางที่ ข-19) ซึ่งค่าประสิทธิภาพของความเร็วในการเขย่า 150 ถึง 200 รอบต่อนาที ต่ำกว่าความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที แสดงให้เห็นว่าน้ำจะละลายได้เฉพาะส่วนที่น้ำมันละลายได้เท่านั้น ซึ่งน้ำมันส่วนที่ละลายออกมาไม่ได้ หาก

เพิ่มปริมาณน้ำที่เพิ่มมากขึ้นก็ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน ทั้งนี้ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที เป็นค่าความเร็วที่ดีที่สุดของงานวิจัยนี้

จากการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมทั้ง 4 พารามิเตอร์ สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนกับระดับต่าง ๆ ของพารามิเตอร์ โดยสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับระดับดังภาพที่ 4-12

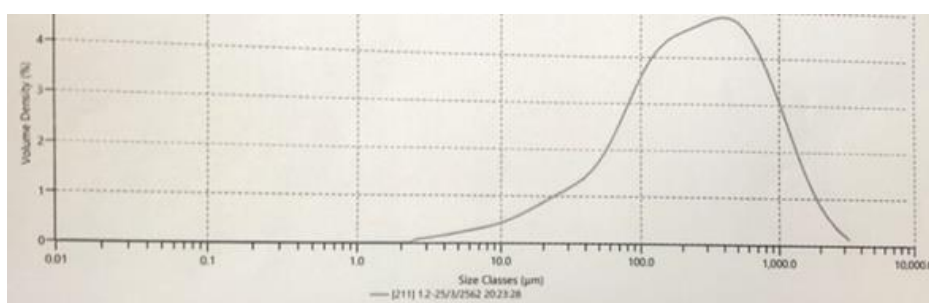


ภาพที่ 4-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน

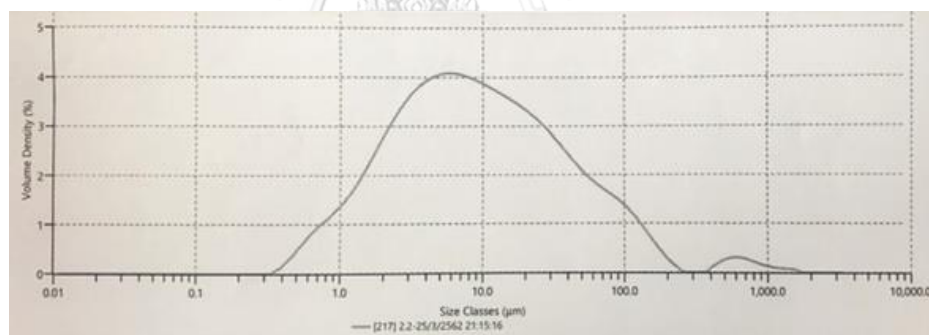
ดังนั้นการศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสม จาก 4 พารามิเตอร์ (ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้าง อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน และความเร็วในการเขย่า) สภาวะการทดลองที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนมากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 42.15 ภายใต้สภาวะ ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับพีเอช ( $pH_{zpc}$ ) อัตราส่วนระหว่าง

น้ำประปาต่อดิน 10.0 (มิลลิลิตร/กรัม) ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที

หลังจากได้สภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่ดีที่สุดมีการตรวจสอบขนาดอนุภาคดินที่เปลี่ยนไปหลังจากการล้างทำความสะอาดดิน เพื่อบ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของดินปนเปื้อนว่ามีการเกาะอยู่ของน้ำมัน โดยเปรียบเทียบขนาดอนุภาคก่อนและหลังล้างทำความสะอาดดินในสภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่ดีที่สุด นำไปตรวจวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Laser particle size distribution analyzer (PSD) แสดงกราฟดังภาพที่ 4-13



(1) ขนาดอนุภาคก่อนการล้างทำความสะอาดดิน



(2) ขนาดอนุภาคดินหลังล้างทำความสะอาดดิน

ภาพที่ 4-13 ขนาดอนุภาคของดินปนเปื้อน

จากการกราฟขนาดอนุภาคดินปนเปื้อนที่แขวนลอยในน้ำหลังล้างทำความสะอาดดิน พบว่าก่อนล้างทำความสะอาดดิน อนุภาคดินจะมีปริมาณเยอะที่สุดในช่วงขนาดอนุภาค 0.1 – 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคดินในการทดลองที่ใช้ในการทดลอง และหลังล้างทำความสะอาดดิน อนุภาคดินจะมีปริมาณเยอะที่สุดในช่วงขนาดอนุภาค 0.003 – 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งพบว่าขนาดอนุภาคของดินมีขนาดเล็กลงหลังจากล้างทำความสะอาดดิน แสดงว่าขนาดอนุภาคดินที่

เล็กลงนั้นอาจมาจากการหลุดออกของการเกาะตัวของน้ำมันหรืออนุภาคมีการแตกตัวหลังจากได้รับความเร็วในการเขย่า

ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากการทดลองทุกสภาวะนำไปสู่การศึกษาส่วนถัดไป คือ วิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในดิน และการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน

#### 4.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

การวิเคราะห์พารามิเตอร์โดยนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในส่วนที่ 4.2.1 มาวิเคราะห์ความสำคัญทางสถิติของตัวแปร ผ่านโปรแกรม Minitab 18 ซึ่งสามารถทำได้ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจากการสร้างแบบจำลองนี้ (Rajasimman และ Karthic, 2010) ตัวชี้วัดของพารามิเตอร์ทั้งหมด คือ ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH removal efficiency)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ วิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์สถิติด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองดังนี้

1. กำหนดพารามิเตอร์และค่าที่ใช้ในการทดลองจากการทดลองที่ 4.2.1 ลงในโปรแกรม Minitab 18 ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองและรวบรวมข้อมูล (Response Variable)
2. สร้างสมการตัวต้นแบบ (Model) จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์
3. พิสูจน์สมการต้นแบบ (Recheck)
4. สร้างแบบจำลองพื้นผิว (Surface Plot) และเส้นค่าระดับ (Contour Plot) เพื่อตรวจสอบช่วงหรือจุดที่เหมาะสม (Optimization)
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทดลองในการทดลองที่ 4.2.1 และประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากสมการต้นแบบ
6. สรุประดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลอง

#### 4.2.2.1 กำหนดพารามิเตอร์และค่าที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน จากการทดลองที่ 4.2.1 ซึ่งมีสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 3-7 มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 81 (3<sup>4</sup>) สภาวะ ทำการทดลองสภาวะละ 2 ครั้ง รวมเป็น 162 การทดลอง

#### 4.2.2.2 สร้างสมการตัวต้นแบบ (Model) จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์

เมื่อออกแบบการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน จากพารามิเตอร์ทั้งหมด เมื่อนำไปเข้าโปรแกรม Minitab 18 สามารถแสดงผลดังภาพที่ 4-14



### Response Surface Regression: TPH Removal efficiency .

#### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	7252.58	518.04	68.31	0.000
Linear	4	2578.84	644.71	85.01	0.000
pH	1	250.82	250.82	33.07	0.000
Mixing speed	1	555.76	555.76	73.28	0.000
Washing time	1	1401.53	1401.53	184.81	0.000
L/S ratio	1	372.28	372.28	49.09	0.000
Square	4	3359.28	839.82	110.74	0.000
pH*pH	1	2032.71	2032.71	268.04	0.000
Mixing speed*Mixing speed	1	134.52	134.52	17.74	0.000
Washing time*Washing time	1	745.43	745.43	98.29	0.000
L/S ratio*L/S ratio	1	24.91	24.91	3.28	0.073
2-Way Interaction	6	96.21	16.03	2.11	0.059
pH*Mixing speed	1	30.67	30.67	4.04	0.047
pH*Washing time	1	28.59	28.59	3.77	0.055
pH*L/S ratio	1	3.04	3.04	0.40	0.528
Mixing speed*Washing time	1	10.24	10.24	1.35	0.248
Mixing speed*L/S ratio	1	21.79	21.79	2.87	0.094
Washing time*L/S ratio	1	3.54	3.54	0.47	0.496
Error	89	674.94	7.58		
Lack-of-Fit	72	632.85	8.79	3.55	0.003
Pure Error	17	42.10	2.48		

#### Model Summary

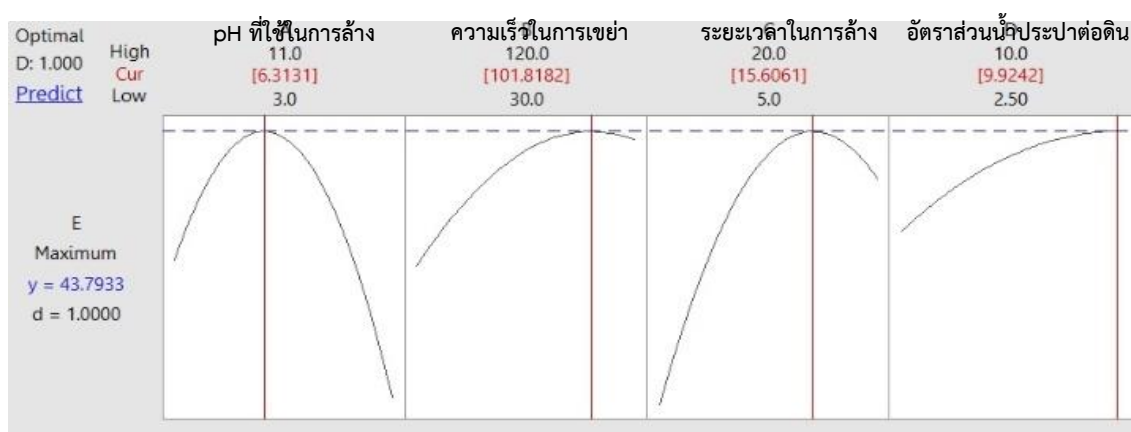
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.75384	91.49%	90.15%	88.24%

ภาพที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์ความถดถอยของพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Regression) จากการทดลองทั้ง 81 สภาวะ

จากการศึกษาการวิเคราะห์ตัวแปรด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า  $R^2$  อยู่ที่ร้อยละ 90.15 เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของพารามิเตอร์ต่าง ๆ การวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับค่า P-Value ถ้าค่า P-Value ของตัวแปรมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีนัยสำคัญ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าตัวแปรเดี่ยว นั่นคือ ค่าพีเอช ความเร็วในการเขย่า ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน และอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาและดิน ทั้งหมดล้วนมีนัยสำคัญทั้งสิ้น ตัวแปรที่มีผลมากที่สุดจากการวิเคราะห์ตัวแปรเดี่ยว สามารถแปลผลได้จากค่า F-Value ที่มากที่สุด โดยเรียงลำดับความสำคัญจากมากไปน้อย พบว่าระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินมีผลมากที่สุดจากการวิเคราะห์ตัวแปรเดี่ยว สำหรับตัวแปรยกกำลังสองที่มีผลในการทดลอง พบว่า ตัวแปรทุกตัวมีนัยสำคัญ ยกเว้นอัตราส่วนระหว่างน้ำประปากับดินเพียงซึ่งมี P-Value > 0.05 และความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรมีนัยสำคัญเพียงคู่เดียว คือ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและความเร็วในการเขย่า ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ได้สมการต้นแบบ (Model) ประสิทธิภาพการกำจัด TPH จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังสมการที่ 4-3

$$\begin{aligned}
 \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TPH (\%)} = & -19.7842 + 7.303542*(\text{พีเอช}) - 2.54527*(\text{ความเร็วในการ} \\
 & \text{เขย่า}) + 3.1194*(\text{ระยะเวลาการล้างดิน}) + 0.506*(\text{อัตราส่วน} \\
 & \text{ระหว่างน้ำประปาต่อดิน}) - 0.53347*(\text{พีเอช})*(\text{พีเอช}) \\
 & + 2.63330*(\text{ความเร็วในการเขย่า}) \\
 & - 0.10235*(\text{ระยะเวลาการล้างดิน})*(\text{ระยะเวลาการล้างดิน}) \\
 & - 0.00351(\text{พีเอช})*(\text{ความเร็วในการเขย่า}) \quad (4-3)
 \end{aligned}$$

เมื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญของตัวแปรเดี่ยว สามารถแสดงกราฟดังภาพที่ 4-15



ภาพที่ 4-15 ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์เดี่ยวต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน

จากภาพที่ 4-15 พบว่าค่าที่ดีที่สุดของพารามิเตอร์เดี่ยว จะอยู่ในจุดสูงสุดของกราฟ (Peak) พบว่าค่าพีเอชที่ใช้ในการล้าง จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงค่าพีเอชกลางและมีแนวโน้มไปทางกรด (6.5) ค่าความเร็วในการเขย่า จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อค่าความเร็วในการเขย่าสูงสุด (120 รอบต่อนาที) ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดกลาง (10 นาที) และอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดิน จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อค่าอัตราส่วนสูงสุด (10 มิลลิลิตรต่อกรัม)

#### 4.2.2.3 พิสูจน์สมการต้นแบบ (Recheck)

การพิสูจน์สมการต้นแบบ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วยสมการที่ 4-3 กับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทดลอง ซึ่งการเลือกสถานะในการทดลองเพื่อนำมาพิสูจน์ เลือกจากข้อสังเกตในสถานะการทดลองของโปรแกรมว่าควรมีการตรวจสอบเพิ่มเติมเนื่องจากนำมาแปลผลในสมการแล้วอาจมีค่าความคลาดเคลื่อน (Fits and Diagnostics for Unusual Observations) แสดงดังภาพที่ 4-16 ซึ่งคอลัมน์ E แสดงถึงประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทดลอง จึงนำพารามิเตอร์จากทั้ง 4 สถานะที่โปรแกรมแนะนำ ทำการคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากสมการที่ 4-3

### Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	E	Fit	Resid	Std Resid	
13	22.88	28.30	-5.42	-2.03	R
16	34.43	28.32	6.11	2.36	R
43	37.28	31.36	5.92	2.23	R
60	39.89	32.91	6.98	2.76	R

R Large residual

ภาพที่ 4-16 สภาวะการทดลองของโปรแกรมว่าควรมีการตรวจสอบเพิ่มเติม

(Fits and Diagnostics for Unusual Observations)

จาก Obs ลำดับสภาวะทั้ง 4 ค่า (ลำดับสภาวะที่ 13 16 43 และ 60) เมื่อนำมาทดลองในระดับปฏิบัติการ (Lab scale) เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพ สามารถแสดงผลการบำบัดปิโตรเลียมดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 สภาวะที่ใช้ตรวจสอบความแม่นยำในโปรแกรม Minitab 18

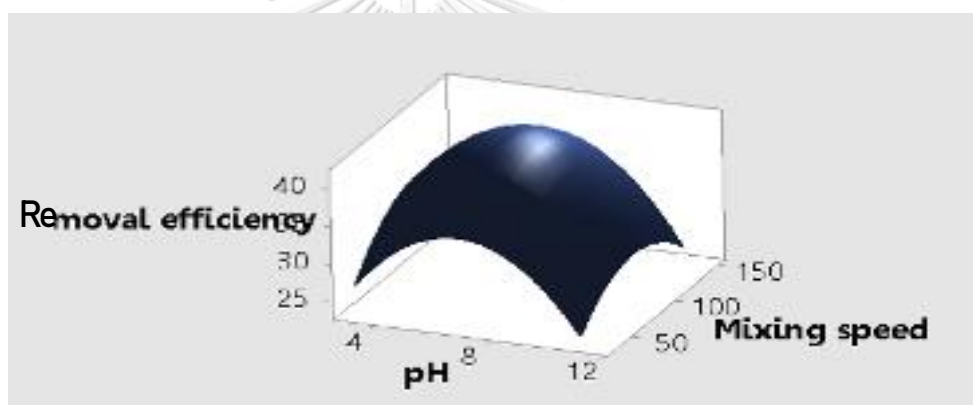
สภาวะการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัด TPH (%)		
	การทดลอง	สมการการทำนาย	ความคลาดเคลื่อน
ลำดับสภาวะที่ 13. L/S ratio 10 มิลลิลิตรต่อกรัม Washing time 10 นาที Mixing speed 30 รอบต่อนาที =pH <sub>zpc</sub>	22.88	27.62	20.72
ลำดับสภาวะที่ 16. L/S ratio 10 มิลลิลิตรต่อกรัม Washing time 20 นาที Mixing speed 60 รอบต่อนาที =pH <sub>zpc</sub>	34.43	30.73	10.75
ลำดับสภาวะที่ 43. L/S ratio 10 มิลลิลิตรต่อกรัม Washing time 20 นาที Mixing speed 30 รอบต่อนาที =pH <sub>zpc</sub>	37.28	33.47	10.22
ลำดับสภาวะที่ 60. L/S ratio 10 มิลลิลิตรต่อกรัม Washing time 10 นาที Mixing speed 120รอบต่อนาที <pH <sub>zpc</sub>	39.98	32.90	17.71



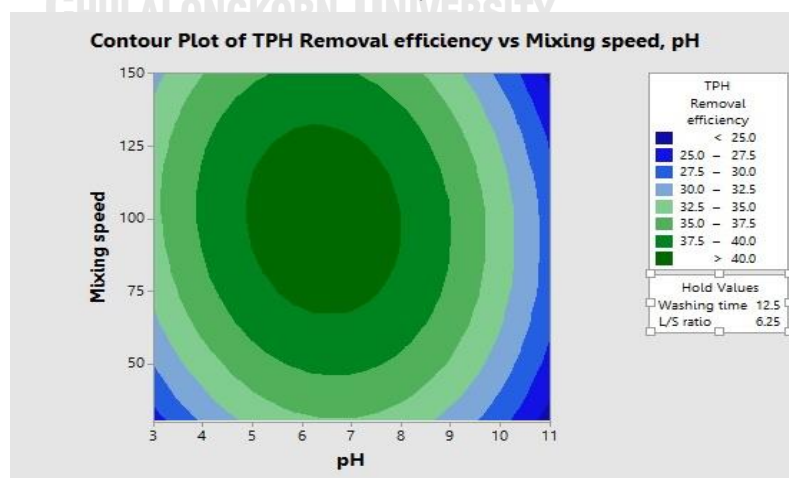
จากตารางที่ 4-7 ผลการศึกษาทั้ง 4 สภาวะที่โปรแกรมแนะนำว่าอาจมีความคลาดเคลื่อนสูงจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เมื่อนำมาคำนวณประสิทธิภาพ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 10.22 ถึง 20.72 ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง จึงอาจจะต้องมีการพิจารณาค่าในพารามิเตอร์ในการทดลองใหม่ หรือทดสอบผลการทดลองใหม่อีกครั้ง

#### 4.2.2.4 สร้างแบบจำลองพื้นผิว (Surface Plot) เส้นค่าระดับ (Contour Plot)

จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแปลผลออกมาในรูปแบบของพื้นผิว (Surface plot) โดยเลือกความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรที่มีนัยสำคัญ ได้แก่ ค่าพีเอชและความเร็วในการเขย่า พบว่าการล้างทำความสะอาดดินจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่าใกล้เคียงกับค่า  $pH_{zpc}$  ของดิน ความเร็วในการเขย่าที่ให้ประสิทธิภาพสูงจะอยู่ในช่วง 75–125 รอบต่อนาที กราฟพื้นผิวสามารถแสดงดังภาพที่ 4-17



ภาพที่ 4-17 กราฟพื้นผิวแสดงประสิทธิภาพการบำบัด TPH ระหว่างค่าพีเอช (pH) และความเร็วในการเขย่า (Mixing speed)

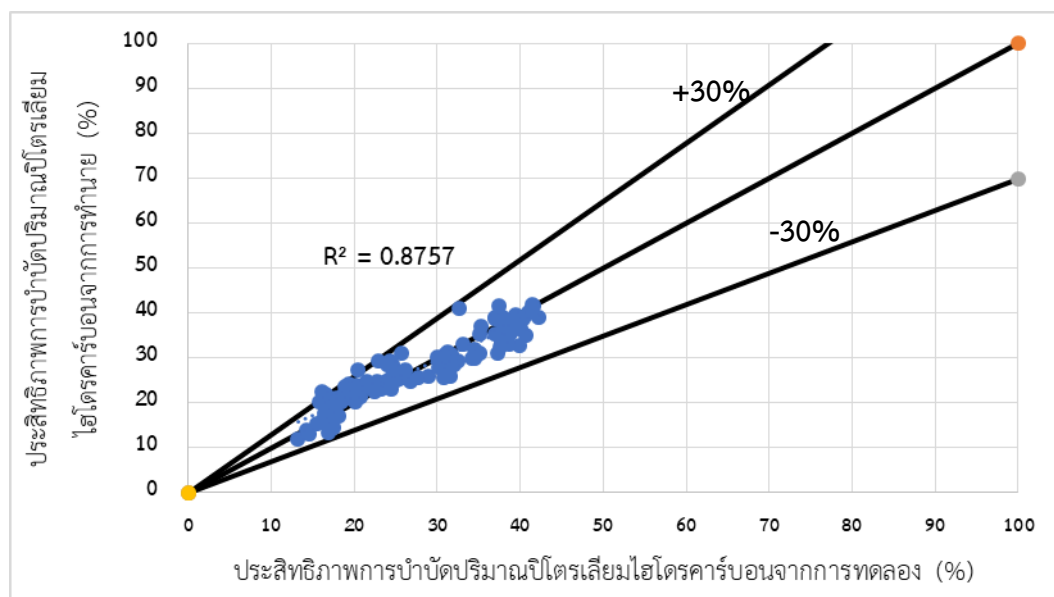


ภาพที่ 4-18 กราฟเส้นค่าระดับแสดงผลของค่าพีเอช (pH) และความเร็วในการเขย่า (Mixing speed) ต่อประสิทธิภาพการกำจัด TPH

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าพีเอชและความเร็วในการเขย่า ในรูปแบบของเส้นค่าระดับ (Contour Plot) แสดงดังภาพที่ 4-18 โดยการล้างทำความสะอาดดินที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในงานวิจัยนี้ (มากกว่าร้อยละ 40) จะอยู่ในกลุ่มสีเขียวเข้มที่สุด มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5.2 ถึง 7.8 ซึ่งอยู่ในช่วงพีเอชกลาง และเป็นค่าพีเอชช่วงเดียวกับค่า  $pH_{zpc}$  โดยความเร็วในการผสมให้ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 70–130 รอบต่อนาที โดยกลุ่มที่มีประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 25 จะอยู่ในกลุ่มสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่แนะนำในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง

#### 4.2.2.5 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองที่ 4.2.1 และค่าที่ได้จากสมการต้นแบบ

การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนจากการทดลองในการทดลองที่ 4.2.1 กับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทำนายของโปรแกรม Minitab 18 สามารถแสดงดังภาพกราฟที่ 4-19 โดยเป็นกราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทดลอง (Experimented TPH removal efficiency) และประสิทธิภาพที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ (Predicted TPH removal efficiency) มีค่า  $R^2$  อยู่ที่ร้อยละ 87.57 โดยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการการทำนายสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้น เมื่อทราบค่าที่ใช้ในการทดลองตามพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในสมการสามารถนำไปคำนวณในสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนได้ หรือในทางกลับกัน สมการนี้อาจจะใช้ในการเลือกสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนตามที่ต้องการได้



ภาพที่ 4-19 กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนระหว่างการทดลองและการทำนายจากสมการ

จากภาพกราฟที่ 4-19 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทดลองส่วนมากจะมีค่าประสิทธิภาพไปในค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 30$  เปอร์เซ็นต์ และพบสถานะที่ไม่อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน  $\pm 30$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตัวอย่างสถานะได้แก่ อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดิน 2.5 มิลลิลิตรต่อกรัม, ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที, ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที, พีเอชในการล้างเท่ากับ  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ซึ่งค่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 20.47 แต่ค่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทำนายเท่ากับ 27.28 ค่าความคลาดเคลื่อน  $+33.28$  เปอร์เซ็นต์ และสถานะอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดิน 2.5 มิลลิลิตรต่อกรัม, ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 15 นาที, ความเร็วในการเขย่า 30 รอบต่อนาที, พีเอชในการล้างน้อยกว่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ซึ่งค่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 16.12 แต่ค่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการทำนายเท่ากับ 22.36 ดังนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อน  $+38.74$  เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงการเลือกใช้พารามิเตอร์ที่อาจไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสถานะการทดลองที่หลุดออกจากแนวโน้ม  $\pm 30$  เปอร์เซ็นต์ ของประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน หรือสถานะที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง อาจมีสาเหตุมาจากพารามิเตอร์ เช่น ความคลาดเคลื่อนจากการปรับค่าพีเอช หรือพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่อาจเกี่ยวข้อง เช่น ขนาดของอนุภาคดินที่นำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งการแก้ไข สามารถแก้ไขได้จากการเพิ่มจำนวนชุดข้อมูลเพื่อเพิ่มความแม่นยำของสมการประสิทธิภาพการบำบัด

#### 4.2.2.6 สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลอง

จากผลการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลองจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ประกอบด้วยพารามิเตอร์ ค่า pH อัตราส่วนน้ำประปาต่อดิน ระยะเวลาในการล้าง และความเร็วในการเขย่า ซึ่งตัวชี้วัดของพารามิเตอร์ทั้งหมด คือ ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (TPH removal efficiency) พบว่าพารามิเตอร์เดี่ยวทุกตัวนัยสำคัญต่อการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน กล่าวคือการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมาจากข้อบ่งชี้ของ P-Value < 0.05 ซึ่งระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินมีผลมากที่สุดจากการวิเคราะห์ตัวแปรเดี่ยว จากข้อบ่งชี้ของค่า F-Value ที่มีค่ามากที่สุด

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ 2 ตัวที่ส่งผลต่อการทดลอง คือ การปรับค่าพีเอช และความเร็วในการเขย่า โดยหมายความว่า การปรับค่าพีเอชและความเร็วในการเขย่า ภายใต้อัตราส่วนน้ำประปาต่อดินที่เหมาะสมด้วย จึงจะมีประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่สูง ถ้ามีการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งที่สูงหรือต่ำ แม้จะปรับค่าไปในทิศทางเดียวกัน (ต่ำ-ต่ำ หรือ สูง-สูง) ประสิทธิภาพก็ไม่เทียบเท่าการปรับค่าพารามิเตอร์ในค่าที่เหมาะสม กล่าวคือ จากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชในช่วง 5.2 ถึง 7.8 และความเร็วในการผสมจะมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 70–130 รอบต่อนาที ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนสูง

ดังนั้นการนำผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีพื้นผิวตอบสนองนำไปใช้ประโยชน์ต่อการออกแบบพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในระดับที่ใหญ่ขึ้น (Bench scale) ทั้งนี้ค่าปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเริ่มต้นที่นำมาทดลองในถังปฏิกรณ์จะกำหนดให้เท่ากันกับการทดลองในระดับปฏิบัติการ (Lab scale) ซึ่งลักษณะดินปนเปื้อนที่นำมาทดลองในถังปฏิกรณ์จะมีลักษณะเดียวกันกับดินปนเปื้อนในระดับปฏิบัติการ เนื่องจากการศึกษาลักษณะดินปนเปื้อนในระดับปฏิบัติการไม่มีการคัดเลือกขนาด หรือลักษณะใด ๆ จึงเป็นตัวแทนของดินปนเปื้อนทั้งหมดที่นำมาทดลอง โดยการพิจารณาการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในถังปฏิกรณ์ คือ เลือกการปรับค่าพารามิเตอร์เดี่ยว โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ที่จะเลือกให้คงที่ ได้แก่ พีเอช และค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดิน เนื่องจากทราบค่าพีเอชที่เหมาะสมในการล้างอยู่แล้ว ( $pH = pH_{zpc} = 6.39$ ) จึงเลือกปรับค่าได้เลย และค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินที่เหมาะสมจากระดับปฏิบัติการคือ 10 มิลลิลิตรต่อกรัมจึงกำหนดอัตราส่วนได้เลยเช่นกัน สำหรับความเร็วในการเขย่า และระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด พารามิเตอร์ทั้งคู่จะนำไปสู่การพัฒนาถังปฏิกรณ์ โดยมีและการกรอง

อนุภาค และการสร้างฟองอากาศ เพื่อเพิ่มการผสมภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นส่วนของการศึกษาส่วนถัดไป

### 4.3 การศึกษาการเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการเกิดฟองอากาศที่สร้างจากเซรามิคเมมเบรนด้วยสภาวะต่าง ๆ เพื่อนำแนวคิดฟองอากาศขนาดเล็กเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมกันภายในถังปฏิกรณ์ และเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างดินกับสารล้าง (น้ำประปา) มากยิ่งขึ้น โดยสภาวะการทดลอง ได้แก่ ความดันอากาศในเส้นท่อ (0.3 0.5 และ 1 บาร์) ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรนในแนวยาว (4.5 8.0 และ 15.5 เซนติเมตร) และรูพรุนของเซรามิคเมมเบรน (0.3 และ 0.5 ไมครอน) โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ 22 ลิตร ประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter,  $D_b$ ) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity,  $U_b$ ) และความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient,  $G$ )

#### 4.3.1 ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter, $D_b$ )

ทำการทดลองโดยใช้เซรามิคเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.3 และ 0.5 ไมครอน เติมน้ำในระบบโดยวัดอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าถังปฏิกรณ์จากการติดตั้งเครื่องวัดปริมาตรอากาศ (Flow meter) โดยระดับน้ำในถังปฏิกรณ์มี 3 ระดับ ได้แก่ 4.5 8.0 และ 15.5 เซนติเมตร (ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรนในแนวยาว) โดยเหตุผลในการเลือกระดับน้ำมาจาก ระดับน้ำสูงเป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิคเมมเบรน ระดับน้ำสูงเป็น 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิคเมมเบรน และระดับน้ำสูงเป็น 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซรามิคเมมเบรน ตามลำดับ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ขนาดของฟองอากาศ ( $D_b$  (mm)) แสดงดังสมการที่ 2-4 โดยการวิเคราะห์ขนาดฟองอากาศจากการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยการถ่ายภาพ (Image Treatment Techniques) ผ่านโปรแกรม Image J เพื่อวัดพื้นที่ของฟองอากาศจากการถ่ายภาพ (จรรยา ชื่นรัมย์, 2558)

จากการศึกษาของฟองอากาศที่ความดันอากาศในเส้นท่อที่แตกต่างกัน โดยทดลองที่ความดัน 0.3 0.5 และ 1.0 บาร์ ซึ่งเก็บภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (240 รูปต่อวินาที) และวิเคราะห์ภาพฟองอากาศจำนวน 100 ภาพต่อการศึกษา 1 สภาวะ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของขนาดฟองอากาศ โดยแสดงผลการทดลองเรื่องขนาดฟองอากาศดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ผลการทดลองขนาดฟองอากาศเฉลี่ยของเซรามิคเมมเบรนที่ขนาดรูพรุน 0.3 และ 0.5 ไมครอน

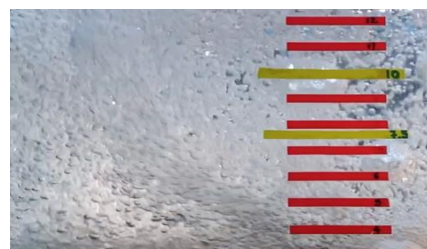
ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์*	ค่าเฉลี่ยของขนาดฟองอากาศ (มิลลิเมตร)					
	เซรามิคเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอน			เซรามิคเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.5 ไมครอน		
	ความดันใน เส้นท่อ 0.3 บาร์	ความดันใน เส้นท่อ 0.5 บาร์	ความดันใน เส้นท่อ 1.0 บาร์	ความดันใน เส้นท่อ 0.3 บาร์	ความดันใน เส้นท่อ 0.5 บาร์	ความดันใน เส้นท่อ 1.0 บาร์
4.5 ซม.	1.20 ± 0.40	1.56 ± 0.28	2.40 ± 0.65	0.30 ± 0.03	0.94 ± 0.22	1.69 ± 0.13
8.0 ซม.	1.23 ± 0.29	1.58 ± 0.22	2.42 ± 0.32	0.34 ± 0.02	1.12 ± 0.13	1.76 ± 0.18
15.5 ซม.	1.25 ± 0.17	1.59 ± 0.24	2.47 ± 0.41	0.36 ± 0.06	1.01 ± 0.25	1.71 ± 0.19

\*ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้น (Bubble shape) เนื่องจากหากอัตราการไหลของอากาศมีค่าสูง ลักษณะฟองอากาศจะเป็นทรงรี แต่ถ้าอัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำ ลักษณะฟองอากาศจะเป็นทรงกลม จากการทดลองจึงเลือกเปรียบเทียบลักษณะฟองจากความดันในเส้นท่อต่ำสุดที่ระดับน้ำต่ำสุด (อัตราการไหลต่ำ) และความดันในเส้นท่อสูงสุดที่ระดับน้ำสูงสุดภายในระบบ (อัตราการไหลสูง) แสดงดังภาพที่ 4-20 ฟองอากาศส่วนใหญ่มีลักษณะทรงกลม (Spherical bubble) แสดงว่าอัตราการไหลของอากาศภายในระบบยังจัดอยู่ในช่วงต่ำ โดยขนาดฟองอากาศทั้งคู่มีขนาดน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร



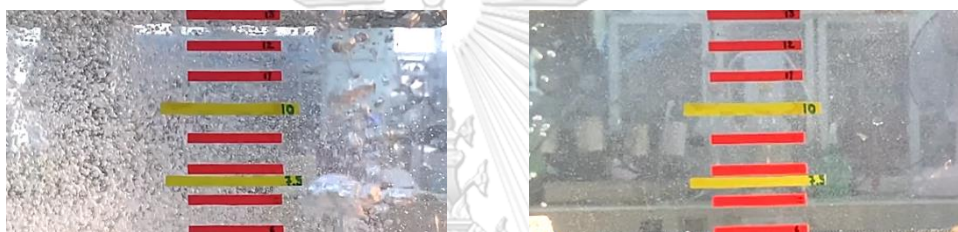
(1) ฟองอากาศรูปทรงกลมที่อัตราการไหล 8.5 ลิตรต่อนาที



(2) ฟองอากาศรูปทรงกลมที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อนาที

ภาพที่ 4-20 ลักษณะฟองอากาศที่เกิดขึ้น (Bubble shape)

จากการทดลองหาขนาดฟองอากาศเฉลี่ยของเซรามิคเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาด 0.3 และ 0.5 ไมครอน ประเด็นแรกเรื่องการเลือกใช้เซรามิคเมมเบรน พบว่าขนาดฟองอากาศเฉลี่ยที่สร้างจากเมมเบรนขนาดรูพรุนขนาด 0.5 ไมครอน มีขนาดเล็กกว่า 0.3 ไมครอน ซึ่งตามปกติแล้วขนาดรูพรุนในการปล่อยฟองใหญ่จะยิ่งสร้างฟองอากาศขนาดใหญ่ (Kurup และ Naik, 2010) สาเหตุเกิดจากข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ของเซรามิคเมมเบรนที่เป็นหัวตัดทั้งสองด้าน เนื่องจากมีการใส่โครงเพื่อวางเมมเบรน ทำให้มีรอยต่อระหว่างโครงและหัวตัด ทำให้เกิดการรั่วไหลของอากาศที่อัดเข้าไป ซึ่งเซรามิคเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอน ลักษณะเป็นหัวเกลียวจึงมีโอกาสรั่วรั้นน้อยกว่า โดยแสดงภาพการสร้างฟองอากาศของเซรามิคเมมเบรน ขนาดรูพรุนขนาด 0.3 และ 0.5 ไมครอน ดังภาพที่ 4-21



(1) เซรามิคเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอน (2) เซรามิคเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.5 ไมครอน

ภาพที่ 4-21 การสร้างฟองอากาศของเซรามิคเมมเบรนที่ระดับน้ำสูงเป็น 3 เท่าของเซรามิคเมมเบรน

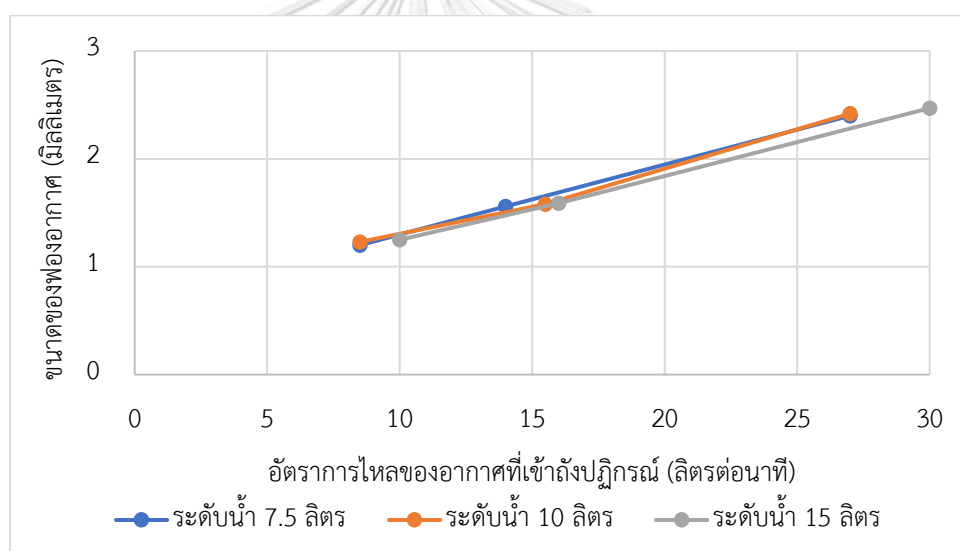
ประเด็นที่สองคือ นอกจากการทำงานในการสร้างฟองอากาศของเซรามิคเมมเบรนแล้ว ยังสามารถนำไปกรองอนุภาคได้ ซึ่งงานวิจัยจะนำไปศึกษาในส่วนถัดไป โดยเซรามิคเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็ก (เปรียบเทียบระหว่างรูพรุน 0.3 และ 0.5 ไมครอน) อาจช่วยกรองอนุภาคดินปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กได้ดี และประเด็นสุดท้ายคือค่าใช้จ่ายของเซรามิคเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.5 ไมครอน มีราคาสูงกว่าเซรามิคเมมเบรน 0.3 ไมครอนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยอ้างอิงราคาจากบริษัท Aquatek ทั้งนี้จึงเลือกใช้เซรามิคเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอนในการทดลองต่อไป

จากการศึกษาหาขนาดฟองอากาศเฉลี่ยของเซรามิคเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาด 0.3 มีการวัดปริมาตรอากาศก่อนเข้าถังปฏิกรณ์จากการติดตั้งเครื่องวัดปริมาตรอากาศ (Flow meter) โดยปริมาตรอากาศของทุกสภาวะแสดงดังตารางที่ 4-9 โดยสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศกับอัตราการไหลของฟองอากาศแสดงดังภาพที่ 4-22

ตารางที่ 4-9 อัตราการไหลของอากาศที่เข้าถึงปฏิกรณ์ผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอนที่  
สภาวะต่าง ๆ

ระดับน้ำในถัง ปฏิกรณ์*	อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)		
	0.3 บาร์	0.5 บาร์	1.0 บาร์
4.5 ซม.	8.5	14.0	27.0
8.0 ซม.	8.5	15.5	27.0
15.5 ซม.	10.0	16.0	30.0

\*ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิกเมมเบรน



ภาพที่ 4-22 ขนาดของฟองอากาศที่อัตราการไหลต่าง ๆ

จากผลการทดลองพบว่าขนาดของฟองอากาศอยู่ในช่วง 1.20 – 2.47 มิลลิเมตร  
ในช่วงอัตราการไหล 8.5 – 30.0 ลิตรต่อนาที โดยขนาดของฟองอากาศแปรผันตรงกับอัตราการไหล  
ของอากาศที่อัดเข้าไปในถังปฏิกรณ์ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ฟองอากาศจะมีขนาดใหญ่  
ขึ้นเช่นกัน



#### 4.3.2 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity, $U_b$ )

ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของอากาศ 8.5 – 30.0 ลิตรต่อวินาที ที่ระดับความดันในเส้นท่อต่าง ๆ ได้แก่ 0.3 0.5 และ 1.0 บาร์ ทำได้จากการใช้กล้องถ่ายภาพที่มีอัตราการจับภาพประมาณ 240 รูปต่อวินาที โดยใช้การจับภาพ 10 ภาพต่อหนึ่งฟองอากาศ โดยการเคลื่อนที่ของฟองอากาศเคลื่อนที่ในแนวตั้ง สามารถคำนวณความเร็วในการลอยตัวได้จากสมการที่ 2-6 โดยแสดงผลการทดลองเรื่องความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ผลการทดลองความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ

ระดับน้ำในถัง ปฏิกรณ์*	ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (เซนติเมตรต่อวินาที)					
	ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์		ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์		ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์	
	$U_x$	$U_y$	$U_x$	$U_y$	$U_x$	$U_y$
4.5 ซม.	6.8 ± 2.5	12.9 ± 3.3	9.8 ± 2.7	18.0 ± 3.6	12.0 ± 2.5	21.5 ± 4.6
8.0 ซม.	6.1 ± 1.8	15.2 ± 3.5	8.1 ± 2.6	18.7 ± 2.2	11.1 ± 2.4	3.1 ± 3.1
15.5 ซม.	5.3 ± 1.6	16.2 ± 2.5	8.0 ± 1.7	19.1 ± 3.2	9.4 ± 2.5	26.7 ± 6.1

\*ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน

จากการทดลองเรื่องความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศพบว่าความเร็วในการลอยตัว (เซนติเมตร/วินาที) แปรผันตรงกับขนาดของฟองอากาศ (มิลลิเมตร) นั่นคือยิ่งฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วในการลอยตัวก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน (Grace และ Wairegi, 1986) โดยพบว่าความเร็วในการลอยตัว ( $U_y$ ) อยู่ในช่วง 12.9 ถึง 26.7 เซนติเมตรต่อวินาที ทั้งนี้ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ จะมีความเร็วในการลอยตัวเกาะกลุ่มกันในช่วงขนาดฟองอากาศ 1.20 – 1.25 มิลลิเมตร ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ จะมีความเร็วในการลอยตัวเกาะกลุ่มกันในช่วงขนาดฟองอากาศ 1.56 – 1.59 มิลลิเมตร และความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ จะมีความเร็วในการลอยตัวเกาะกลุ่มกันในช่วงขนาดฟองอากาศ 2.40 – 2.47 มิลลิเมตร โดยเมื่อพิจารณาพบว่าความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ

(เซนติเมตร/วินาที) ที่เพิ่มขึ้นตามความสูงของระดับน้ำภายในถังปฏิกรณ์ (เซนติเมตร) เนื่องมาจากความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศที่วัดได้ ( $U_y$ ) เป็นความเร็วที่เข้าสู่ความเร็วสุดท้าย ( $U_T$ , Terminal velocity) ในการลอยตัวของฟองอากาศ เนื่องจากระดับน้ำที่เพิ่มมากขึ้น ระยะที่ฟองอากาศจะลอยขึ้นมีมากกว่าระดับน้ำที่ต่ำ ทำให้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากระดับน้ำที่เพิ่มมากขึ้นจากการทดลอง อาจยังไม่ใช่ความเร็วสุดท้ายที่แท้จริงของฟองอากาศนั่นเอง

#### 4.3.3 ความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient, G)

ความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient, G) เป็นตัวแปรที่ใช้ในการแสดงค่าความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ โดยทำการทดลองที่ความสูงของระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน 4.5 ซม. (ระดับน้ำสูงเป็น 2 เท่าของเซรามิคเมมเบรน) 8.0 ซม. (ระดับน้ำสูงเป็น 3 เท่าของเซรามิคเมมเบรน) และ 15.5 ซม. (ระดับน้ำสูงเป็น 4 เท่าของเซรามิคเมมเบรน) ที่อัตราการไหลของอากาศ 8.5 ถึง 30 ลิตรต่อนาที ตามสภาวะการทดลองต่าง ๆ ทำได้จากการคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศจากสมการที่ 2-10 โดยแสดงผลการทดลองเรื่องความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient, G) ภายในถังปฏิกรณ์ดังตารางที่ 4-11 แสดงการคำนวณภาคผนวก ค.

ตารางที่ 4-11 ผลการทดลองความเร็วในการปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์

ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์*	ความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient, G) ภายในถังปฏิกรณ์ (ต่อวินาที)		
	ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์	ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์	ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์
4.5 ซม.	134.7	173.11	240.23
8.0 ซม.	138.66	182.03	248.96
15.5 ซม.	145.76	184.56	252.69

\*ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน

จากผลการทดลองพบว่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศมีค่าแปรผันตรงกับความดันและความสูงของระดับน้ำภายในถัง ซึ่งค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศขึ้นกับความเร็วในการลอยตัวเป็นหลัก

จากการศึกษาพารามิเตอร์ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter,  $D_b$ ) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity,  $U_b$ ) และความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์ (Velocity gradient,  $G$ ) สามารถสรุปผลการทดลองได้ในตารางที่ 4-12

การศึกษาการเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรนในการศึกษาส่วนนี้ทำให้ทราบผลของความดันที่ส่งผลต่อขนาดฟองอากาศ และความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ การนำไปใช้ประโยชน์ต่อของการศึกษาส่วนนี้คือเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (ความดันอากาศในเส้นท่อที่สามารถสร้างขนาดฟองอากาศที่เหมาะสม) โดยวัตถุประสงค์ของการทดลองส่วนของการเป่าอากาศในถังปฏิกรณ์ เพื่อเพิ่มการผสมกันภายในถังระหว่างสารล้าง (น้ำประปา) และอนุภาคดิน และจากสภาวะการทดลองของการทดลองที่ 4.2 ในส่วนของการทดลองปฏิบัติการ (Lab scale) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการเขย่าสูงขึ้น (รอบต่อนาที) จึงทำให้การนำแนวคิดจากการทดลองระดับปฏิบัติการมาใช้ในระดับถังปฏิกรณ์ (Bench scale) ส่งผลให้เลือกใช้ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่และค่าความปั่นป่วนภายในถังสูง จึงเลือก ความดันอากาศในเส้นท่อ 1.0 บาร์ สำหรับสร้างฟองอากาศในการเป่าอากาศ

ตารางที่ 4-12 ผลการทดลองจากทุกพารามิเตอร์ในการศึกษาการเป่าอากาศ

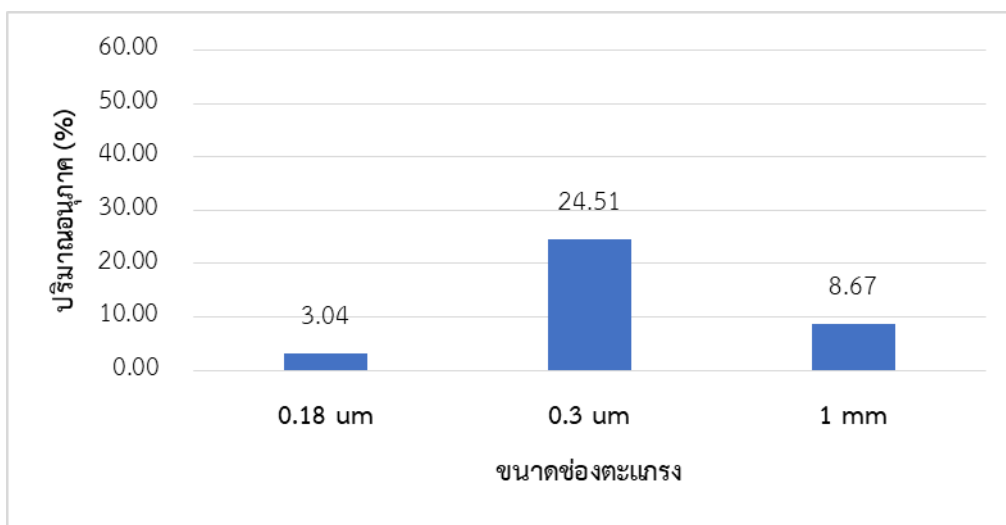
ระดับน้ำจากจุด กึ่งกลาง เมมเบรน		ความดันอากาศในเส้นท่อ								
		0.3 บาร์			0.5 บาร์			1.0 บาร์		
		4.5 ชม.	8.0 ชม.	15.5 ชม.	4.5 ชม.	8.0 ชม.	15.5 ชม.	4.5 ชม.	8.0 ชม.	15.5 ชม.
พารามิเตอร์										
ปริมาตรอากาศ (ลิตรต่อนาที)		8.5	9	10	14	15.5	16	27	29	30
ขนาดฟองอากาศ (มิลลิเมตร.)		1.2	1.23	1.25	1.56	1.58	1.59	2.4	2.42	2.47
ความเร็ว ฟองอากาศ (เซนติเมตร ต่อวินาที)	U <sub>x</sub>	6.8	6.1	5.3	9.8	8.1	8.0	12.0	11.1	9.4
	U <sub>y</sub>	12.9	15.2	16.2	18.0	18.7	19.1	21.5	23.1	26.7
ความปั่นป่วน (วินาที <sup>-1</sup> )		134.7	138.66	145.76	173.11	182.03	184.56	240.23	248.96	252.69

#### 4.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของเซรามิคเมมเบรน

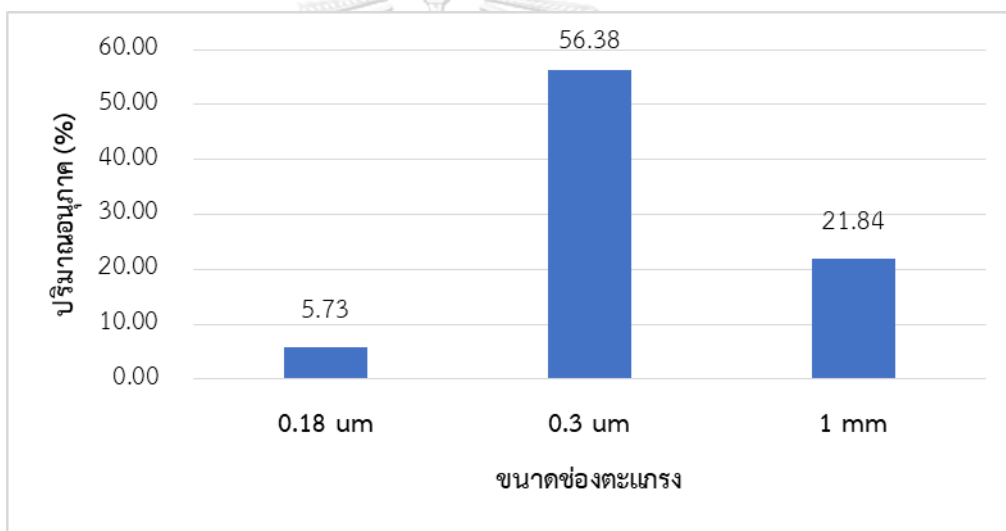
การทดลองนี้เป็นการศึกษาการกรองอนุภาคของเซรามิคเมมเบรน โดยใช้เซรามิคเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอน และอนุภาคที่นำมาศึกษา ได้แก่ เบนโทไนท์ และดินปนเปื้อนน้ำมัน

##### 4.4.1 การคัดเลือกขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์

การคัดเลือกขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์ เนื่องจากดินที่ใช้ในการทดลองจริงพบว่า ขนาดของดินส่วนใหญ่จะมีขนาดมากกว่า 1 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดอนุภาคของเบนโทไนท์ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร จึงเทียบปริมาณของดินที่มีขนาด 0.18 ไมครอน ถึง 1 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 4.64 จากภาพที่ 4-5 ซึ่งเทียบเป็น 25 กรัม จึงทำให้กำหนดปริมาณเบนโทไนท์คงที่ที่ 25 กรัม เพื่อต้องการใช้ปริมาณใกล้เคียงกับดินที่ใช้ทดลองจริงมากที่สุด โดยขนาดอนุภาคดินปนเปื้อนและเบนโทไนท์ตั้งแต่ 0.18 ไมครอนถึง 1.0 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4-23



(1) ดินปนเปื้อน



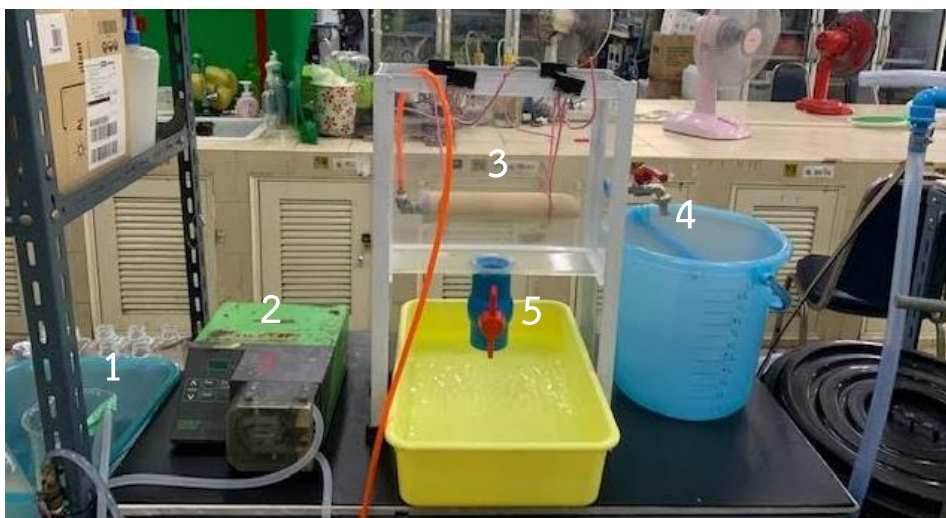
(2) เบนโทไนท์

ภาพที่ 4-23 ขนาดอนุภาคของดินปนเปื้อนและเบนโทไนท์

จากการกำหนดปริมาณอนุภาคเบนโทไนท์ที่ต้องการคือ 25 กรัม โดยมีการคัดเลือกขนาดอนุภาคเบนโทไนท์ที่จะนำไปใช้อยู่ในช่วง 0.18 ไมครอน ถึง 1.0 มิลลิเมตร การเตรียมเบนโทไนท์ จากที่กล่าวในบทที่ 3 จึงเตรียมในขนาดอนุภาคระหว่าง 0.18 ไมครอน ถึง 1.0 มิลลิเมตร

จากระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 4.3 พบว่าระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางเมมเบรนที่ 8.0 และ 15.5 เซนติเมตร ไม่แตกต่างกันมาก การทดลองนี้จึงเลือกใช้ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรนที่ 11.5 เซนติเมตร ซึ่งจะเท่ากับปริมาตรน้ำ 7.5 ลิตร โดยจะปรับความ

เข้มข้นเบนโทไนท์ต่อน้ำ 3 ระดับ ได้แก่ 1.67 กรัม/ลิตร (25 กรัมเบนโทไนท์/7.5 ลิตรของน้ำ) 2.5 กรัม/ลิตร (25 กรัมเบนโทไนท์/10 ลิตรของน้ำ) 3.33 กรัม/ลิตร (25 กรัมเบนโทไนท์/15 ลิตรของน้ำ) โดยแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 4-24



- เมื่อ
1. กระบอกลง สำหรับวัดปริมาตรน้ำ
  2. ปั๊มสูบน้ำสายรัด (Peristaltic pump) สำหรับการสูบน้ำออกจากถังปฏิกรณ์
  3. เซรามิกเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.3 ไมครอน
  4. วาล์วเปิดปิด สำหรับปล่อยน้ำออกหลังจากเป่าอากาศเสร็จแล้ว
  5. วาล์วเปิดปิด สำหรับปล่อยอนุภาคหลังจากเดินระบบเสร็จแล้ว

ภาพที่ 4-24 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองการกรองอนุภาค

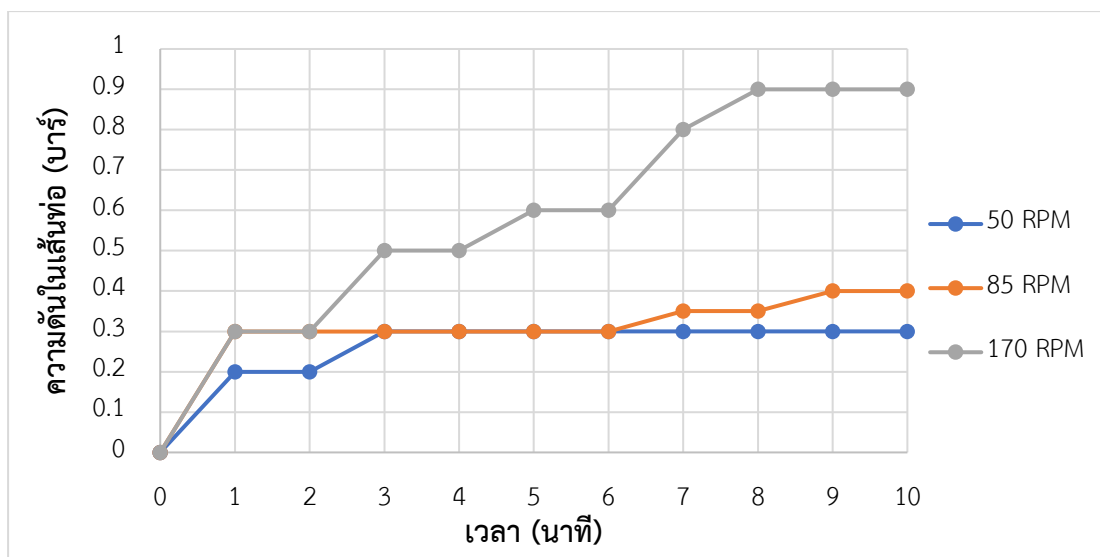
#### 4.4.2 การคัดเลือกอัตราการกรองอนุภาคที่เหมาะสม

การคัดเลือกอัตราการกรอง มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอัตราการไหลในการเดินระบบจากอัตราการกรองที่เหมาะสม เพื่อรองรับการทำงานของปั๊มสูบน้ำ และความสามารถในการกรองของอนุภาค โดยศึกษาอัตราการกรอง 3 ระดับ ได้แก่ 50 85 และ 170 รอบต่อนาที (เลือกช่วงจากช่วงต่ำ กลาง สูง ของการทำงานปั๊มสูบน้ำ) โดยการทดลองจะกำหนดระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิกเมมเบรนที่ 11.5 เซนติเมตร ระยะเวลาในการกรอง 10 นาที ซึ่งจะเก็บค่าความดันในเส้นท่อ

(บาร์) และอัตราการไหลทุก 1 นาที แสดงผลการทดลองอัตราการกรองดังตารางที่ 4-13 และภาพกราฟที่ 4-25

ตารางที่ 4-13 ผลการทดลองอัตราการกรองที่ระดับต่าง ๆ

ระยะเวลา (นาที)	ความดันในเส้นท่อ (บาร์)			อัตราการไหลของน้ำ (ลิตรต่อนาที)		
	จำนวนรอบใน การกรอง 50 รอบต่อนาที	จำนวนรอบใน การกรอง 85 รอบต่อนาที	จำนวนรอบใน การกรอง 170 รอบต่อนาที	จำนวนรอบใน การกรอง 50 รอบต่อนาที	จำนวนรอบใน การกรอง 85 รอบต่อนาที	จำนวนรอบ ในการกรอง 170 รอบต่อนาที
0	0	0	0	0.2	0.3	0.4
1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.25	0.28
2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.25
3	0.3	0.3	0.5	0.2	0.2	0.22
4	0.3	0.3	0.5	0.18	0.18	0.15
5	0.3	0.3	0.6	0.14	0.12	0.12
6	0.3	0.3	0.6	0.1	0.12	0.1
7	0.3	0.35	0.8	0.1	0.1	0.1
8	0.3	0.35	0.9	0.1	0.1	0.1
9	0.3	0.4	0.9	0.08	0.1	0.1
10	0.3	0.4	0.9	0.04	0.1	0.1



ภาพที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันในเส้นท่อและเวลาที่อัตราการกรองระดับต่าง ๆ

จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการไหลเฉลี่ยที่อัตราการกรอง 50 85 และ 170 รอบต่อนาที ได้แก่ 0.15 0.18 และ 0.20 ลิตรต่อนาที ศึกษาในระยะเวลา 10 นาทีเท่ากัน โดยอัตราการกรอง 170 รอบต่อนาที ความดันในเส้นท่อมียุคสูงขึ้นตั้งแต่ช่วงระยะเวลา 3 นาที ซึ่งอัตราการกรอง 50 และ 85 รอบต่อนาทีค่อนข้างคงที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากอายุการใช้งานของปั๊มสูบน้ำแล้ว อัตราการกรองจึงไม่เหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากความดันที่สูงขึ้นโดยเร็ว จะเพิ่มการทำงานของปั๊มมากขึ้น ทำให้ลดอายุการใช้งานของปั๊มสูบน้ำ และอัตราการกรองระหว่าง 50 และ 85 รอบต่อนาที มีความดันสูญเสียในเส้นท่อที่ใกล้เคียงกัน จึงเปรียบเทียบจากอัตราการไหลของน้ำ พบว่าอัตราการกรอง 85 รอบต่อนาที สามารถกรองน้ำในปริมาตรที่เยอะกว่า ทำให้ลดระยะเวลาในการทดลองได้ ดังนั้นจากเหตุผลทั้งหมดข้างต้น จึงเลือกใช้อัตราการกรอง 85 รอบต่อนาที หรืออัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ 0.18 ลิตรต่อนาที (10.62 ลิตรต่อชั่วโมง)

#### 4.4.3 การทดลองหาความต้านทานของเซรามิคเมมเบรน

การหาความต้านทานของเซรามิคเมมเบรน ทำการทดลองโดยการสูบน้ำปราศจากไอออน (DI Water) ที่ค่าความดันต่าง ๆ ที่ผ่านเซรามิคเมมเบรน ( $R_{m0}$ ) และบันทึกค่าเพอร์มิเอทพล็กซ์และความดันที่เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อคำนวณความต้านทานเริ่มต้นของเซรามิคเมมเบรน เพื่อประเมินอายุการใช้งานเริ่มต้น โดยจะนำเซรามิคเมมเบรนมาเป่าอากาศเพื่อทำความสะอาดอนุภาคที่ติดอยู่บนผิวหน้าของเซรามิคเมมเบรน ซึ่งเมื่อถึงจุดเซรามิคเมมเบรนต้องล้างย้อน (Backwash) จึงนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาและวัดความต้านทานเริ่มต้นอีกครั้ง ( $R_{m1}$ ) ซึ่งค่าความต้านทานเริ่มต้นของระบบจะนำไปใช้คำนวณค่าระดับการอุดตันถาวร (Degree of fouling) (อังสนา, 2010)



#### 4.4.4 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน

การเดินระบบมีการเก็บน้ำภายในถังปฏิกรณ์เพื่อคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอย โดยเก็บน้ำก่อนเริ่มการเดินระบบ และหลังเดินระบบเสร็จแล้ว เพื่อนำไปหาค่าของแข็งแขวนลอย

การเดินระบบเริ่มต้น ได้กล่าวไว้ในภาพ 3-12 นั่นคือเริ่มจากการเป่าอากาศด้วยเซรามิคเมมเบรน 10 นาทีก่อนการเริ่มการกรองอนุภาคทุกครั้ง (ระยะเวลาในการเป่าอากาศใช้ระยะเวลาเดียวกับการทดลองการเป่าอากาศที่ 4.3) หยุดการเป่าอากาศ ปล่อยน้ำส่วนด้านบนผ่านวาล์วเปิดปิดที่ติดตั้งมาพร้อมกับถังปฏิกรณ์ประมาณ 5 นาที วัตถุประสงค์เพื่อลดภาระการทำงานของกรองของเซรามิคเมมเบรน เพิ่มอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนมากยิ่งขึ้น หลังจากนั้นระบบเริ่มทำการกรองด้วยระยะเวลา 10 นาที (ระยะเวลาเดียวกันกับการเป่าอากาศ)

การทดลองการเดินระบบทำการบันทึกค่าความดันผ่านเซรามิคเมมเบรนและอัตราการกรองน้ำ เพื่อนำมาคำนวณค่าความต้านทานรวม ( $R_T$ ) นอกจากนี้จะหยุดการทดลองเมื่อเซรามิคเมมเบรนมีความดันสูญเสียเริ่มคงที่จะหยุดการเดินระบบและถอดเซรามิคเมมเบรนมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า ทั้งนี้เมื่อเดินระบบพบช่วงการคงที่ของความดันในระบบ จึงกำหนดระยะเวลาในการเดินระบบเพื่อนำเซรามิคเมมเบรนมาล้างทำความสะอาดเดียวกันทุกสภาวะ ได้แก่ 190 240 และ 290 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้การเดินระบบจะหาค่าความต้านทานของหัวกระจายอากาศ ซึ่งมีการวัดค่าของแข็งแขวนลอยก่อน-หลังเดินระบบ

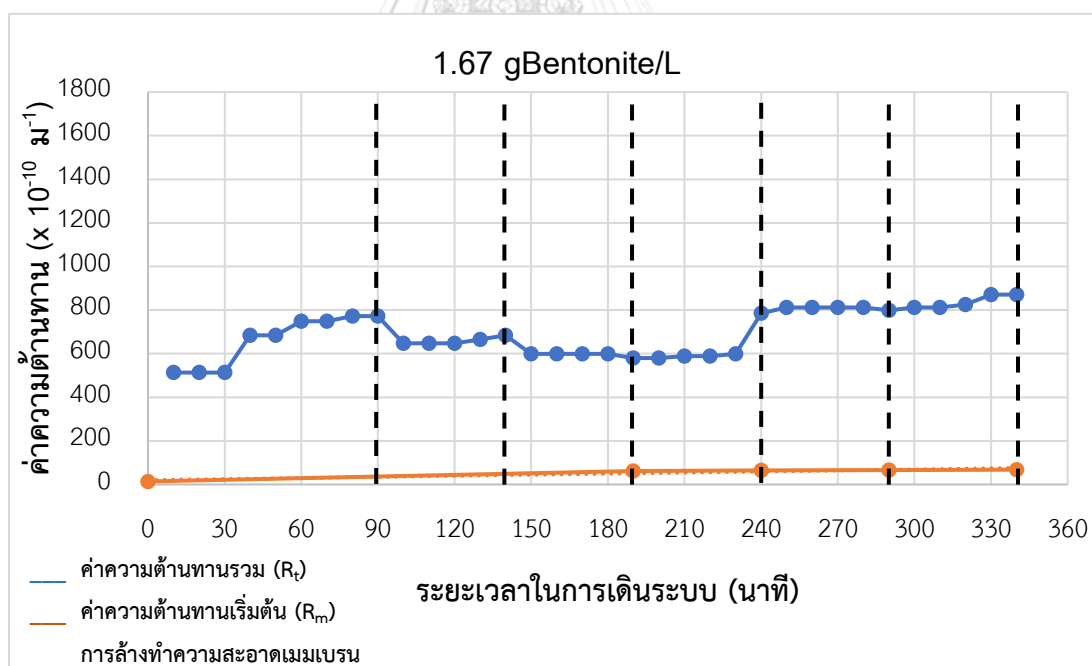
จากการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาการเดินระบบผ่านไป 10 นาที เริ่มมีการเพิ่มขึ้นของความดันในเส้นท่อ ซึ่งหลังจากการนำเซรามิคเมมเบรนไปเป่าอากาศเพื่อล้างทำความสะอาด พบว่าค่าความดันในถังปฏิกรณ์ลดลง 0.1 0.2 และ 0.3 บาร์ ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นกับค่าความเข้มข้นในถังปฏิกรณ์ และเซรามิคเมมเบรนในการเป่าอากาศไม่สามารถกำจัดสิ่งอุดตันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งถังปฏิกรณ์มีระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรนที่ 11.5 เซนติเมตร หลังจากเป่าอากาศจะมีความดันในเส้นท่อดลดลงเพียง 0.1 ซึ่งน้อยที่สุดจากถังปฏิกรณ์อื่น ๆ อาจเกิดจากความเข้มข้นในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาณสูงที่สุด เมื่อเทียบจากถังปฏิกรณ์ทั้งหมด ทั้งนี้ความค่าความดันในเส้นท่อจะแปรผกผันกับอัตราการกรองภายในระบบ นั่นคือ เมื่อเดินระบบไปสักพัก ความดันในเส้นท่อจะเพิ่มขึ้น และอัตราการกรองน้ำจะลดลง เนื่องจากการทำงานของเซรามิคเมมเบรนที่หนักขึ้น การทดลองจึงมีการปรับรอบของเครื่องสูบน้ำให้ได้อัตราการไหลคงที่ (10 ลิตรต่อชั่วโมง) และรักษาอัตรา

การกรองให้คงที่อีกด้วย โดยการเดินระบบจะเริ่มเดินระบบที่อนุภาคเบนโทไนท์ และตามด้วยอนุภาคดินปนเปื้อน

#### 4.4.4 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน

##### 4.4.4.1 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ

การเดินระบบที่ความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซรามิคเมมเบรนเท่ากับ  $13.8 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  โดยเมื่อคำนวณความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนหลังจากการเดินระบบ 190 240 และ 290 นาที ความดันในเส้นท่ออยู่ที่ 0.3 0.4 และ 0.4 บาร์ ค่าความต้านทานรวมอยู่ที่  $57.94 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$   $78.53 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  และ  $79.84 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง. ซึ่งเมื่อวัดค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนหลังจากล้างทำความสะอาด จะมีค่าความต้านทานดังนี้  $61.94 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$   $64.32 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  และ  $65.32 \times 10^{10}$  ตามลำดับ โดยแสดงภาพกราฟผลการทดลองจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนกับระยะเวลาในการเดินระบบ แสดงดังภาพที่ 4-26



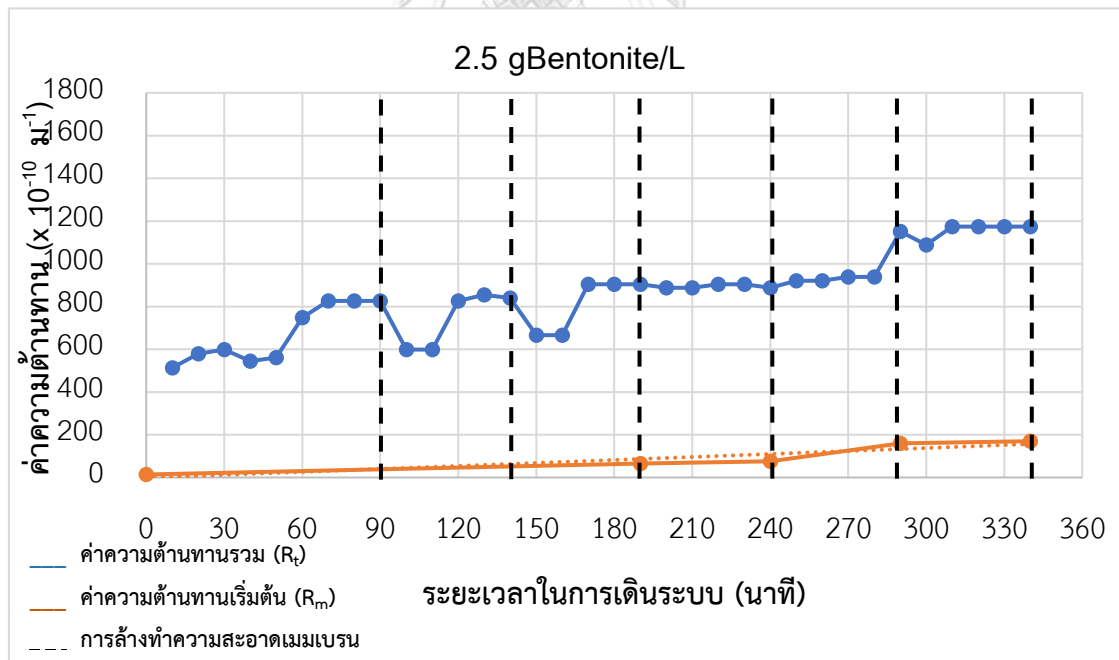
ภาพที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเซรามิคเมมเบรนและระยะเวลาเดินระบบ ที่ความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์ต่อลิตร

จากกราฟพบว่า การเดินระบบในสภาวะนี้ยังคงมีการลดลงของค่าความต้านทานรวม (Rp) เมื่อมีการล้างทำความสะอาดเซรามิคเมมเบรน แสดงว่าเซรามิคเมมเบรนยังไม่มี

จุดต้นตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ ทั้งนี้อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำอยู่ที่ 0.15 ลิตรต่อนาที แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำมีการลดลงจากเริ่มต้น 9.70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสภาวะในการเดินระบบของถังปฏิกรณ์นี้ พบว่าเมื่อเดินระบบครบ 350 นาที และความดันในเส้นท่อเริ่มคงที่อยู่ที่ 0.3-0.4 บาร์

#### 4.4.4.2 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ

การเดินระบบที่ความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซรามิคเมมเบรนเท่ากับ  $13.81 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  โดยเมื่อคำนวณความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนหลังจากการเดินระบบ 190 240 และ 290 นาที ความดันในเส้นท่ออยู่ที่ 0.4 0.4 และ 0.4 บาร์ ค่าความต้านทานรวมอยู่ที่  $88.71 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$   $90.38 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  และ  $115.15 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง. ซึ่งเมื่อวัดค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนหลังจากล้างทำความสะอาด จะมีค่าความต้านทานดังนี้  $65.32 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$   $75.32 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  และ  $159.82 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ โดยแสดงภาพกราฟผลการทดลองจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนกับระยะเวลาในการเดินระบบ แสดงดังภาพที่ 4-27

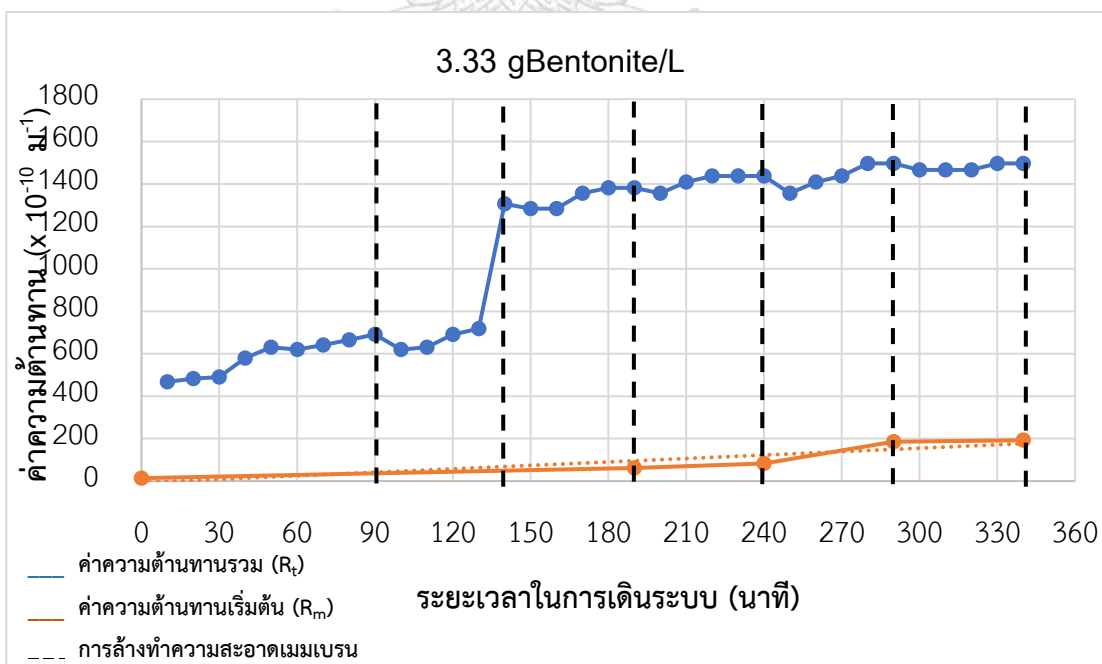


ภาพที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเซรามิคเมมเบรนและระยะเวลาเดินระบบ ที่ความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์ต่อลิตร

จากกราฟพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไปค่าความต้านทานรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อนำเซรามิคเมมเบรนมาล้างทำความสะอาด ค่าความต้านทานจะลดลง แสดงว่าการล้างทำความสะอาดเซรามิคเมมเบรนยังสามารถเพิ่มความสามารถในการกรองได้ ทั้งนี้อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำอยู่ที่ 0.14 ลิตรต่อนาที แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำมีการลดลงจากเริ่มต้น 20.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสภาวะในการเดินระบบของถังปฏิกรณ์นี้ พบว่าเมื่อเดินระบบ 320 นาที เซรามิคเมมเบรนมีการรั่วและความดันในเส้นท่อเริ่มคงที่อยู่ที่ 0.3 ถึง 0.5 บาร์

#### 4.4.4.3 การเดินระบบการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ

การเดินระบบที่ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซรามิคเมมเบรนเท่ากับ  $13.81 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  โดยเมื่อคำนวณความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนหลังจากการเดินระบบ 190 240 และ 290 นาที ความดันในเส้นท่ออยู่ที่ 0.6 0.6 และ 0.6 บาร์ ค่าความต้านทานรวมอยู่  $138.18 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$   $143.71 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  และ  $149.70 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง. ซึ่งเมื่อคำนวณค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนหลังจากล้างทำความสะอาด จะมีค่าความต้านทานดังนี้  $61.94 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$   $83.55 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  และ  $185.54 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ โดยแสดงภาพกราฟผลการทดลอง แสดงดังภาพที่ 4-28

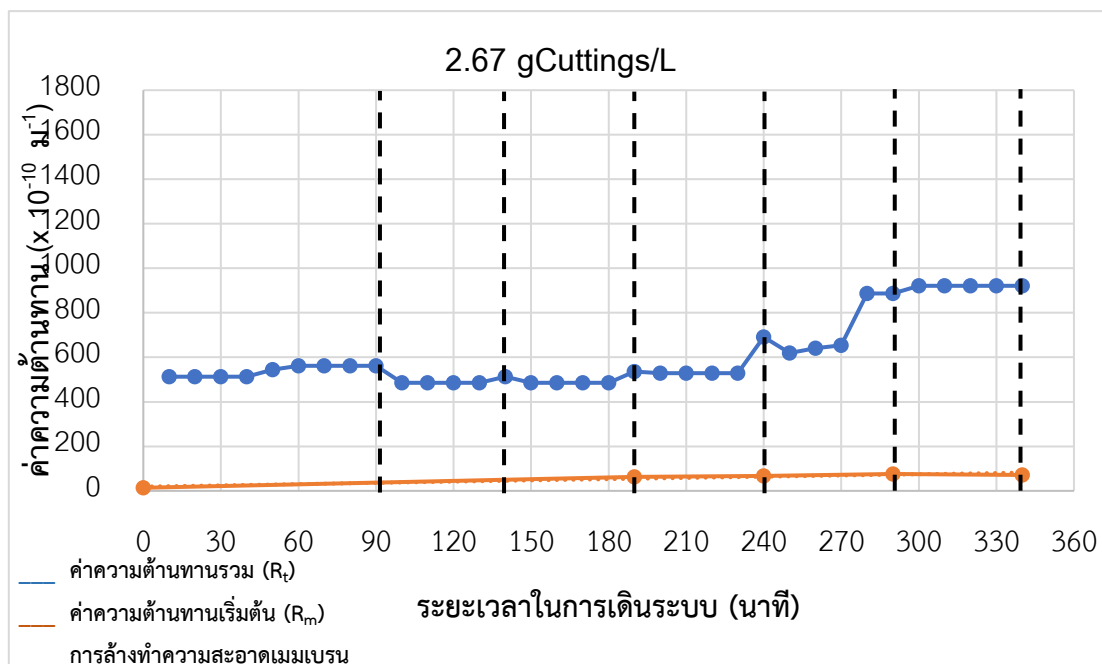


ภาพที่ 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเซรามิคเมมเบรนและระยะเวลาเดินระบบ ที่ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์ต่อลิตร

จากกราฟพบว่าค่าความต้านทานรวม ( $R_t$ ) ของเซรามิคเมมเบรนสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลา 130 ถึง 140 นาที โดยเมื่อมีการล้างทำความสะอาดที่เซรามิคเมมเบรน ค่าความต้านทานรวมก็ยังคงไม่มีการลดลง อาจเนื่องมาจากเซรามิคเมมเบรนเริ่มเกิดการอุดตัน การล้างทำความสะอาดเซรามิคเมมเบรนจึงไม่มีผลต่อความต้านทาน ทั้งนี้อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำอยู่ที่ 0.134 ลิตรต่อนาที แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำมีการลดลงจากเริ่มต้น 23.42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสภาวะในการเดินระบบของถังปฏิกรณ์นี้ พบว่าเมื่อเดินระบบ 310 นาที เซรามิคเมมเบรนมีการรั่ว และความดันในเส้นท่อเริ่มคงที่อยู่ที่ 0.5 ถึง 0.6 บาร์ ซึ่งการเดินระบบที่ระยะเวลาการกรองที่สั้น แสดงถึงความสามารถในการกรองน้ำที่น้อย โดยแสดงภาพกราฟผลการทดลองจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนกับระยะเวลาในการเดินระบบ ซึ่งสังเกตได้ว่าถังปฏิกรณ์ในสภาวะนี้จะมีผลการเดินระบบใกล้เคียงกับสภาวะก่อนหน้า เนื่องจากความเข้มข้นในถังปฏิกรณ์มีความใกล้เคียงกัน

#### 4.4.4.4 การเดินระบบการกรองอนุภาคดินปนเปื้อนด้วยเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 2.67 กรัมดิน/ลิตรของน้ำ

การเดินระบบที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อดินปนเปื้อน 10.0 (ลิตรต่อกิโลกรัม) อัตราส่วนจากสภาวะการทดลองของอัตราส่วนระหว่างดินปนเปื้อนและน้ำที่สภาวะดีที่สุด จากผลการทดลองที่ 4.2 ค่าความต้านทานเริ่มต้นของเซรามิคเมมเบรนเท่ากับ  $13.81 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  โดยเมื่อวัดความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนหลังจากการเดินระบบ 190 240 และ 290 นาที ความดันในเส้นท่ออยู่ที่ 0.3 0.3 และ 0.4 บาร์ ค่าความต้านทานรวมอยู่ที่  $53.62 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$   $69.09 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  และ  $88.71 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง. ซึ่งเมื่อวัดค่าความต้านของเซรามิคเมมเบรนหลังจากล้างทำความสะอาด จะมีค่าความต้านทานดังนี้  $63.32 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$   $67.47 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  และ  $75.85 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4-29



ภาพที่ 4-29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นเซรามิคเมมเบรนและระยะเวลาเดินระบบของอนุภาคดินปนเปื้อนที่ความเข้มข้น 2.67 กรัมดินปนเปื้อนต่อลิตร

จากกราฟพบว่า การเดินระบบในสภาวะนี้การล้างทำความสะอาดเซรามิคเมมเบรนยังสามารถเพิ่มความสามารถในการกรองได้ เนื่องจากนำเซรามิคเมมเบรนมาล้างทำความสะอาด ค่าความขุ่นลดลง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป 270 นาที การนำเซรามิคเมมเบรนมาล้างทำความสะอาดไม่มีผลต่อการลดค่าความขุ่นรวมของเซรามิคเมมเบรน แสดงให้เห็นว่าเซรามิคเมมเบรนอาจเริ่มมีการอุดตัน ทั้งนี้อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำอยู่ที่ 0.16 ลิตรต่อนาที แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำมีการลดลงจากเริ่มต้น 8.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสภาวะในการเดินระบบของถังปฏิกรณ์นี้ พบว่าเมื่อเดินระบบครบ 350 นาที และความดันในเส้นท่อเริ่มคงที่อยู่ที่ 0.3-0.4 บาร์

การเดินระบบการกรองของอนุภาคทั้ง 4 สภาวะ ได้แก่ ความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ ความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ และอนุภาคดินปนเปื้อน 2.67 กรัมดินปนเปื้อน/ลิตรของน้ำ (1:10) ตามลำดับพบว่าสภาวะสุดท้ายของเบนโทไนท์ (3.33 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ) มีการอุดตันเร็วที่สุด โดยการล้างทำความสะอาดเซรามิคเมมเบรนไม่มีผลต่อการลดค่าความขุ่นรวม (R<sub>t</sub>) และค่าความขุ่นรวมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ แสดงถึงการอุดตันที่เร็วขึ้นของเซรามิคเมมเบรน เนื่องจากการทำงานในการกรองของเซรามิคเมมเบรนที่เพิ่มมากขึ้นโดยมาจากอนุภาคมีขนาดเล็ก จึงเข้าไปอุดตันได้เร็ว และมีความเข้มข้นสูงกว่าสภาวะอื่น ๆ ของเบนโทไนท์ สภาวะ ความเข้มข้น 1.67 กรัมเบน

โทไนท์/ลิตรของน้ำ ความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ ยังคงสามารถลดค่าความต้านทานรวมของระบบได้จากการล้างทำความสะอาด เมื่อเปรียบเทียบการเดินระบบการกรองระหว่างอนุภาคเบนโทไนท์และดินปนเปื้อน พบว่าการกรองอนุภาคดินปนเปื้อนมีแนวโน้มในการอุดตันน้อยกว่าอนุภาคเบนโทไนท์ เนื่องจากเมื่อเดินระบบ 350 นาที ค่าความต้านทานรวมน้อยกว่าสถานะของเบนโทไนท์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคดินปนเปื้อนที่นำมากรองมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าเบนโทไนท์ ทำให้อนุภาคเข้าไปอุดตันที่พื้นผิวเซรามิคเมมเบรนได้น้อย

นอกจากการประเมินค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนในการเดินระบบแล้ว การกำจัดอนุภาคก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการกรองอนุภาคของแต่ละสถานะได้ ตัวชี้วัดการกำจัดอนุภาคของเซรามิคเมมเบรนในการเดินระบบ คือ ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended solid) โดยแสดงผลการวัดค่าของแข็งแขวนลอยดังตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 ผลการศึกษาการกำจัดอนุภาคของแข็งแขวนลอย

สถานะการทดลอง	ค่าของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพการ กำจัดอนุภาค ของแข็งแขวนลอย (%)
	ก่อน เดินระบบ	หลัง เดินระบบ	
1. ความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ	1,260	80	93.65
2. ความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ	1,980	160	91.92
3. ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ	2,300	190	91.74
4. ความเข้มข้น 2.67 กรัมดินปนเปื้อน/ ลิตรของน้ำ	1,570	120	92.36

จากการผลการกำจัดอนุภาคของแข็งแขวนลอยจาก 4 สถานะ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ 91.74 ถึง 93.65 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าสถานะความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ มีประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของแข็งแขวนลอยมากที่สุดถึง 93.65

เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีความเข้มข้นของสารที่ต่ำที่สุดจากทุกสภาวะ ทำให้การทำงานของเซรามิคเมมเบรนในการกรองอนุภาคจะสูงที่สุดด้วย ซึ่งผลการทำงานในการกำจัดอนุภาคสอดคล้องกับอัตราการกรองหลังจากเสร็จสิ้นการเดินระบบที่มีอัตราการกรองสุดท้ายมากที่สุดจากทุกสภาวะ

#### 4.4.5 การประมาณอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรน

การประมาณอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนแสดงถึงการทำนายอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรน โดยมาจากการประเมินระดับการอุดตันที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการทำความสะอาดที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งการคำนวณระดับการอุดตันถาวร (Degree of fouling) สามารถแสดงดังสมการที่ 3-11 แสดงการคำนวณภาคผนวก ง. แสดงผลระดับการอุดตันถาวรของทุกสภาวะดังตารางที่ 4-15 ถึง 4-18

ตารางที่ 4-15 ระดับการอุดตันสภาวะของสภาวะความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ

พารามิเตอร์	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาที)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)	$R_m$ ( $\times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ )	ระดับการอุดตันถาวร
ความต้านทานเริ่มต้น	-	-	1.38	13.81
ถอดล้างครั้งที่ 1	190	445	61.90	-
ถอดล้างครั้งที่ 2	240	465	64.32	0.0019
ถอดล้างครั้งที่ 3	290	520	65.32	0.0028

ตารางที่ 4-16 ระดับการอุดตันถาวรของสภาวะความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ

พารามิเตอร์	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาที)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)	$R_m$ ( $\times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ )	ระดับการอุดตันถาวร
ความต้านทานเริ่มต้น	-	-	1.38	13.81
ถอดล้างครั้งที่ 1	190	450	65.32	-
ถอดล้างครั้งที่ 2	240	520	75.32	0.0023
ถอดล้างครั้งที่ 3	290	690	159.82	0.0044



ตารางที่ 4-17 ระดับการอุดตันสภาวะของสภาวะความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ

พารามิเตอร์	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาทีก)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)	$R_m$ ( $\times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ )	ระดับการอุดตันถาวร
ความต้านทานเริ่มต้น	-	-	1.38	13.81
ถอดล้างครั้งที่ 1	190	450	61.94	-
ถอดล้างครั้งที่ 2	240	580	83.55	0.0023
ถอดล้างครั้งที่ 3	290	725	185.54	0.0055

ตารางที่ 4-18 ระดับการอุดตันสภาวะของสภาวะความเข้มข้น 2.67 กรัมดินปนเปื้อน/ลิตรของน้ำ

พารามิเตอร์	ระยะเวลาที่ทำการทดลอง (นาทีก)	จำนวนรอบการทำงาน (รอบ)	$R_m$ ( $\times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ )	ระดับการอุดตันถาวร
ความต้านทานเริ่มต้น	-	-	1.38	13.81
ถอดล้างครั้งที่ 1	190	380	63.32	-
ถอดล้างครั้งที่ 2	240	425	67.47	0.0014
ถอดล้างครั้งที่ 3	290	475	71.85	0.0023

จากตารางระดับการอุดตันจากทุกสภาวะ พบว่าจำนวนรอบในการทำงานของปั๊มที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงการอุดตันของเซรามิคเมมเบรนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้การเปรียบเทียบความเหมาะสมของระยะเวลาในการกรอง ไม่สามารถใช้ระดับการอุดตันเทียบได้โดยตรง เนื่องจากแต่ละรอบของการทำงานของเซรามิคเมมเบรนมีระยะการสูบล้างไม่เท่ากัน จึงนำไปสู่การคำนวณอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรน โดยใช้ค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้  $4.60 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$  ซึ่งเป็นค่าที่เซรามิคเมมเบรนไม่สามารถกรองได้แล้ว และนำค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ไปประมาณอายุการใช้งาน แสดงดังตารางที่ 4-19 การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ง.

ตารางที่ 4-19 การประมาณอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนด้วยค่าระดับการอุดตันถาวร

สถานะถังปฏิกรณ์	ระดับการ อุดตัน ถาวรเฉลี่ย	ความต้านทาน เริ่มต้น ( $\times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ )	อายุการใช้งาน ของเซรามิค เมมเบรน (ชั่วโมง)
1.) 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ	0.0023	2.3	1,128
2.) 2.5 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ	0.0033	2.3	792
3.) 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ	0.0039	2.3	680
4.) 2.67 กรัมดิน/ ลิตรของน้ำ	0.0018	2.3	1,433

จากการประมาณอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนพบว่าสถานะความเข้มข้น 2.67 กรัมดิน/ลิตรของน้ำ มีอายุการใช้งานมากที่สุดคือ 1,433 ชั่วโมง และอายุการใช้งานที่สั้นที่สุดคือสถานะความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ มีอายุการใช้งาน 680 ชั่วโมง แสดงว่าสถานะการเดินระบบที่ความเข้มข้นของอนุภาคสูงส่งผลต่ออายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนที่เพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคส่งผลต่อการอุดตันของเซรามิคเมมเบรน เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็ก สามารถเข้าไปอุดตันที่เซรามิคเมมเบรนทำให้จำนวนรอบการทำงานของปั๊มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนลดลงเช่นกัน (Andreadkis, 2008) ทั้งนี้ปัญหาที่พบระหว่างการทดลองที่พบบ่อยที่สุดคือ การเกิดการตกค้างของอากาศที่อยู่ในท่อ เนื่องจากการเดินระบบ มีการเป่าอากาศเพื่อล้างทำความสะอาดผิวหน้าของเซรามิคเมมเบรนและกรองอนุภาค ทำให้อากาศตกค้างอยู่ในเซรามิคเมมเบรน ส่งผลให้ความดันภายในเซรามิคเมมเบรนมากขึ้น และเกิดการระเบิด ดังนั้นก่อนการเริ่มเดินระบบทุกครั้งจึงต้องปล่อยอากาศที่ตกค้างออกไปก่อน

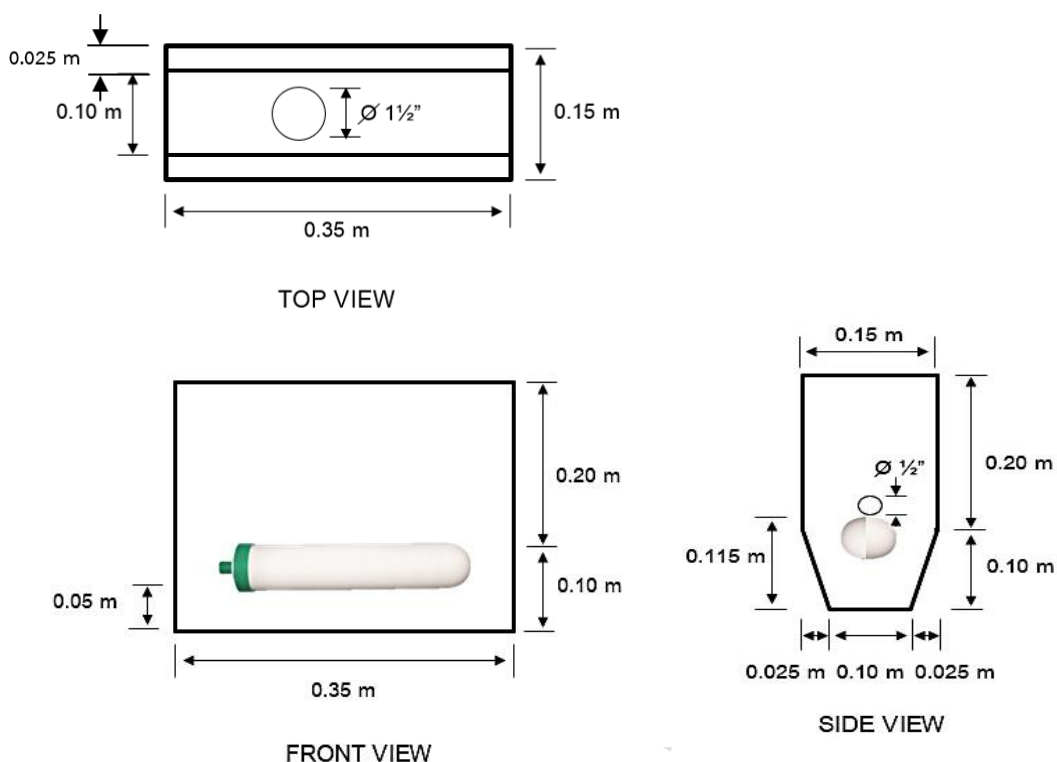
การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของเซรามิคเมมเบรน การกรองอนุภาคดินปนเปื้อนด้วยเซรามิคเมมเบรน (2.67 กรัมดิน/ลิตรของน้ำ) สามารถประเมินอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนอยู่ที่ 1,433 ชั่วโมง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า หากเดินระบบของดินปนเปื้อนตามขั้นตอนเดียวกัน (กล่าวในภาพที่ 3-12) อายุการใช้งานก็จะอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยสถานะการกรองดิน

ปนเปื้อนมีประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคอยู่ที่ร้อยละ 92.36 แสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน (ลิตรต่อกิโลกรัม) มีประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคสูง (มากกว่าร้อยละ 90) จึงเป็นการยืนยันในการเลือกใช้เซรามิคเมมเบรนในการเดินระบบ โดยการใช้จำนวนรอบในการกรองอนุภาคที่น้อยลง แต่เพิ่มระยะเวลาในการกรองมากขึ้น อาจเพิ่มอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรน จึงเป็นทางเลือกในการเดินระบบต่อไป

#### 4.5 การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดจริง

##### 4.5.1 การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน

การออกแบบถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน โดยถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดินมีหลักการคือเกิดการผสมกันระหว่างสารล้าง (น้ำประปา) กับดินปนเปื้อน จึงทำให้เลือกใช้เซรามิคเมมเบรนติดตั้งภายในถังปฏิกรณ์ เพื่อใช้ในการเป่าฟองอากาศทำให้เกิดการผสมกันระหว่างน้ำประปาและดินปนเปื้อน นอกจากนี้เซรามิคเมมเบรนยังสามารถกรองน้ำที่ปนเปื้อนหลังจากการล้างทำความสะอาดเพื่อให้อนุภาคดินภายในถังปฏิกรณ์มีความแห้งมากยิ่งขึ้น โดยรูปแบบถังปฏิกรณ์จะออกแบบให้ถังปฏิกรณ์มีสัดส่วนรองรับขนาดของเซรามิคเมมเบรน เพื่อให้ฟองอากาศที่สร้างจากเซรามิคเมมเบรน ปั่นกวาดให้เกิดการสัมผัสของสารล้าง (น้ำประปา) และดินปนเปื้อนมากที่สุด รูปทรงของถังปฏิกรณ์จะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนบนจะเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยติดตั้งวาล์วเปิดปิดบริเวณด้านข้างของถัง เพื่อปล่อยน้ำที่ล้างทำความสะอาดดินส่วนบนออกไป เพื่อช่วยลดภาระการกรองของเซรามิคเมมเบรน และส่วนล่างจะเป็นทรงสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อช่วยเพิ่มการสัมผัสระหว่างฟองอากาศและดินปนเปื้อน แสดงภาพการออกแบบถังปฏิกรณ์ดังภาพที่ 4-30



ภาพที่ 4-30 แบบถังปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมัน

จากภาพที่ 4-30 ถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกใส ขนาด  $0.15 \times 0.35 \times 0.30$  ลูกบาศก์เมตร (กว้าง  $\times$  ยาว  $\times$  สูง) โดยควบคุมระยะความสูงของดินปนเปื้อนที่ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ และปรับระดับน้ำตามอัตราการระหว่างน้ำประปาต่อดินตามสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองที่ 4.2 ตำแหน่งการวางเซรามิคเมมเบรน เลือกวางตำแหน่งที่อยู่สูงจากบริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์เล็กน้อย (0.05 เมตร) เพื่อให้ตำแหน่งใกล้เคียงกับดินปนเปื้อนที่ตกตะกอนอยู่ด้านล่าง เพื่อทำดินให้แห้งมากที่สุด โดยการเดินระบบจะสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา ได้แก่ การเป่าฟองอากาศจากการทดลองที่ 4.3 และการกรองอนุภาคจากการทดลองที่ 4.4

การเดินระบบเริ่มต้นจากเติมน้ำประปาและดินปนเปื้อน เป่าอากาศ (ล้างทำความสะอาดดิน) และกรองอนุภาคให้น้ำในถังปฏิกรณ์เหลือน้อยที่สุด หรือจนกว่าเซรามิคเมมเบรนไม่สามารถสูบลูกกรองได้ โดยการเดินระบบทุกครั้งจะใช้เซรามิคเมมเบรนใหม่ทุกครั้ง ไม่มีการใช้เซรามิคเมมเบรนซ้ำ

#### 4.5.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดดิน

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดดิน จะนำสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองระดับปฏิบัติการ (Lab scale) ในการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนนำมาเดินระบบ โดยดินปนเปื้อนที่นำมาทดลอง มาจากดินที่ระดับความลึกชั้นที่ 3 แบ่งจำนวนเป็น 8 ชุด ไม่มีการคัดเลือกขนาดอนุภาค เพื่อเทียบเคียงกับการนำดินปนเปื้อนจากแหล่งขุดเจาะปิโตรเลียมมาใช้งานจริง โดยแสดงตารางปริมาณดินที่ขนาดต่าง ๆ ดังตารางที่ 4-20

ตารางที่ 4-20 ปริมาณดินที่ขนาดต่าง ๆ

ขนาดของ เส้นผ่านศูนย์กลาง ช่องตะแกรง	ปริมาณดิน (%)							
	ดินชุด 1	ดินชุด 2	ดินชุด 3	ดินชุด 4	ดินชุด 5	ดินชุด 6	ดินชุด 7	ดินชุด 8
4 มิลลิเมตร	88.72	93.92	91.20	93.28	92.37	91.17	90.18	89.78
2.8 มิลลิเมตร	5.35	2.00	2.97	2.94	3.21	2.46	3.82	2.16
2 มิลลิเมตร	3.37	1.02	1.02	1.23	1.47	1.61	1.71	1.74
1.7 มิลลิเมตร	1.72	1.08	2.71	1.23	0.23	0.96	0.95	1.00
1.18 มิลลิเมตร	0.84	1.23	1.42	0.59	1.45	1.22	0.87	1.82
1 มิลลิเมตร	0.32	0.08	0.46	0.45	1.40	1.31	1.27	1.15
0.3 ไมครอน	0.52	0.37	0.65	0.23	0.31	1.73	1.72	1.42
0.18 ไมครอน	0.05	0.23	0.06	0.02	0.08	0.05	0.10	0.79
เล็กกว่า 0.18 ไมครอน	0.01	0.33	0.07	0.10	0.05	0.01	0.01	0.09

จากปริมาณดินทั้ง 8 ชุด พบว่าขนาดอนุภาคส่วนมากขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับ 4 มิลลิเมตร การเดินระบบหลังจากเสร็จสิ้นการเป่าฟองอากาศ จะปล่อยให้ดินปนเปื้อนตกตะกอน ซึ่งจะใช้เวลาในการตกตะกอนน้อยมาก ประมาณ 5-10 นาที จากภาพที่ 4-10 จึงเริ่มการกรองอนุภาคได้ทันที

สภาวะในการล้างทำความสะอาดดินจากการศึกษาที่ 4.2 คือ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที และอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (มิลลิลิตรต่อกรัม) ทั้งนี้เมื่อนำสภาวะมาปรับใช้จริงในถังปฏิกรณ์ ตัวชี้วัดการล้างทำความสะอาดดินคือ ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนและขนาดอนุภาคที่เปลี่ยนไป ซึ่งการเดินระบบในถังปฏิกรณ์จะควบคุมตัวแปร ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้าง

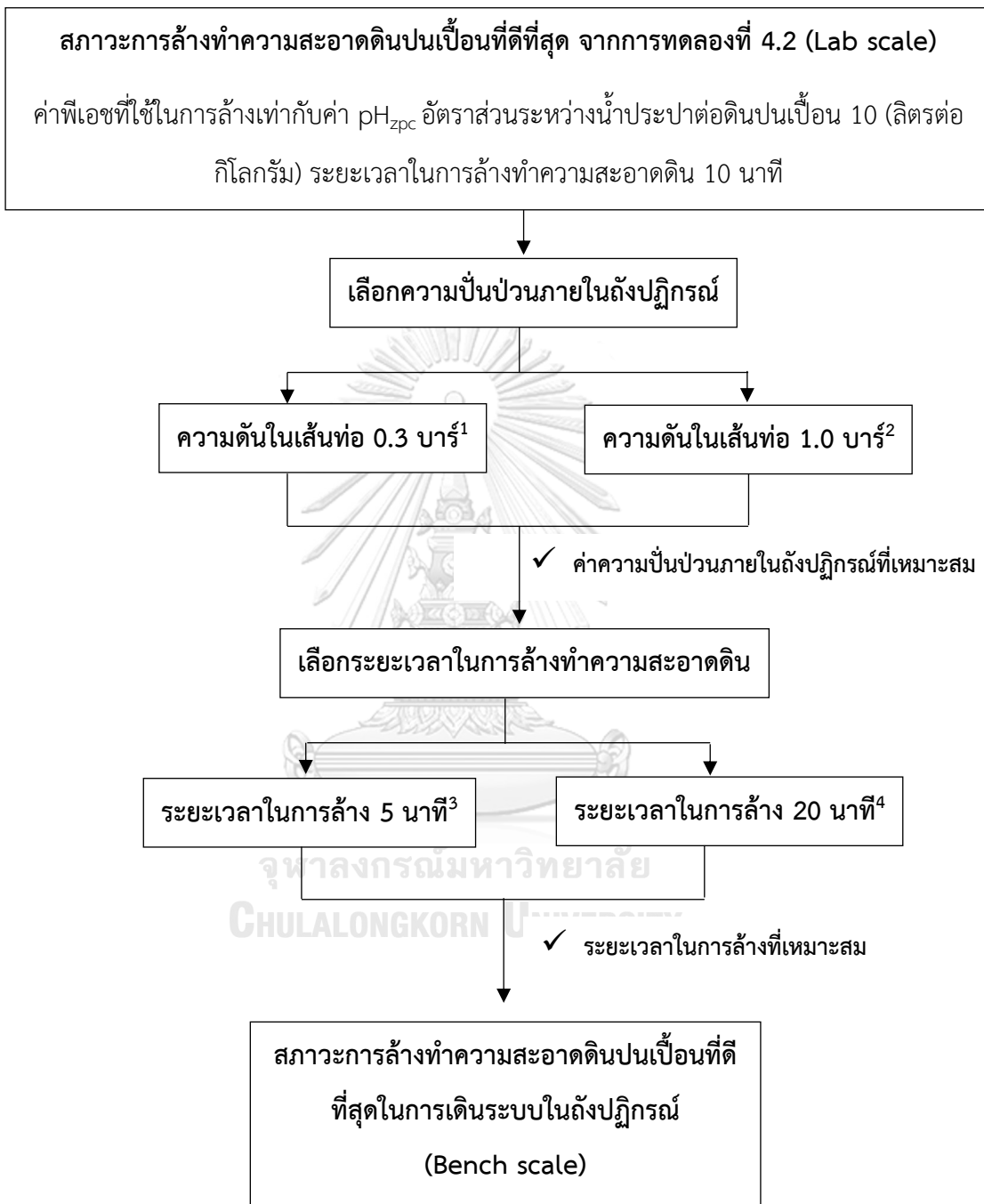
เท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  และอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม) และตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น และระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน ในที่นี้ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายในระบบจะเป็นฟองอากาศที่สร้างจากเซรามิคเมมเบรนเพื่อเพิ่มการผสมกันแทนการใช้ Water bath ของการทดลองระดับปฏิบัติการ (Lab scale) ทั้งนี้มีการเทียบเคียงค่าความเร็วในการเขย่ากับความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient, G) เพื่อให้สภาวะการผสมกันภายในถังปฏิกรณ์ใกล้เคียงกันมากที่สุด พบว่าความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที มีค่าความเร็วเกรเดียนท์เท่ากับ 45.22 ต่อกวินาที แสดงการคำนวณในภาคผนวก จ. ซึ่งจากขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ที่นำมาทดลองในการศึกษาส่วนนี้ (ใหญ่กว่าหรือเท่ากับ 4 มิลลิเมตร) ซึ่งขนาดอนุภาคดินที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดในถังปฏิกรณ์ใหญ่กว่าขนาดอนุภาคดินที่ใช้ในระดับปฏิบัติการ ซึ่งการที่อนุภาคดินมีขนาดใหญ่ขึ้น ความปั่นป่วนของฟองอากาศต้องเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน การศึกษาส่วนนี้จึงเลือกค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวจากค่าที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดของความดันในเส้นท่อที่สามารถเดินระบบได้ (0.3 บาร์ และ 1.0 บาร์) เพื่อดูประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน โดยแสดงข้อมูลในการฟองของความดันในเส้นท่อของ 0.3 และ 1.0 บาร์ดังตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4-21 ข้อมูลการสร้างฟองของความดันในเส้นท่อของ 0.3 และ 1.0 บาร์

พารามิเตอร์	ความดันในเส้นท่อ	
	0.3 บาร์	1.0 บาร์
ขนาดฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	1.20	2.40
ค่าความเร็วเกรเดียนท์ของ ของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (G, ต่อกวินาที)	134.7	250.13

การเดินระบบในถังปฏิกรณ์จะคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเดินระบบเนื่องจากปริมาณดินปนเปื้อนมีจำกัด เหลือดินจำนวน 8 ชุด จึงเพียงพอต่อการเดินระบบเพียง 4 สภาวะ สภาวะละ 2 ชั่วโมง การเดินระบบจะเลือกค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจาก

ฟองอากาศก่อน และนำไปสู่การคัดเลือกระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินที่เหมาะสม สภาวะการเดินระบบ 4 สภาวะแสดงดังภาพที่ 4-31



ภาพที่ 4-31 การเลือกสภาวะการเดินระบบภายในถังปฏิกรณ์  
จากผลการศึกษารการคัดเลือกค่าความดันภายในถังปฏิกรณ์ที่เกิดจาก  
ฟองอากาศที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4-22

ตารางที่ 4-22 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน

สภาวะการเดินระบบ	ประสิทธิภาพการบำบัด ปริมาณปิโตรเลียม ไฮโดรคาร์บอน (%)
สภาวะที่ 1 ค่าความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์ที่เกิดจาก ฟองอากาศที่มาจากความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที	15.44
สภาวะที่ 2 ค่าความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์ที่เกิดจาก ฟองอากาศที่มาจากความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที	27.31

จากตารางที่ 4-22 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน สภาวะที่ค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 0.3 บาร์ เนื่องมาจากขนาดฟองอากาศที่ใหญ่ ส่งผลให้ความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศมีค่าสูง ทำให้การขัดสีและการสัมผัสกันระหว่างสารล้าง (น้ำประปา) และดินปนเปื้อนมากขึ้น ดังนั้นจะเลือกใช้ฟองอากาศขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มการผสมภายในถังปฏิกรณ์ นั่นคือขนาดฟองอากาศที่เกิดจากความดันในเส้นท่อ 1 บาร์

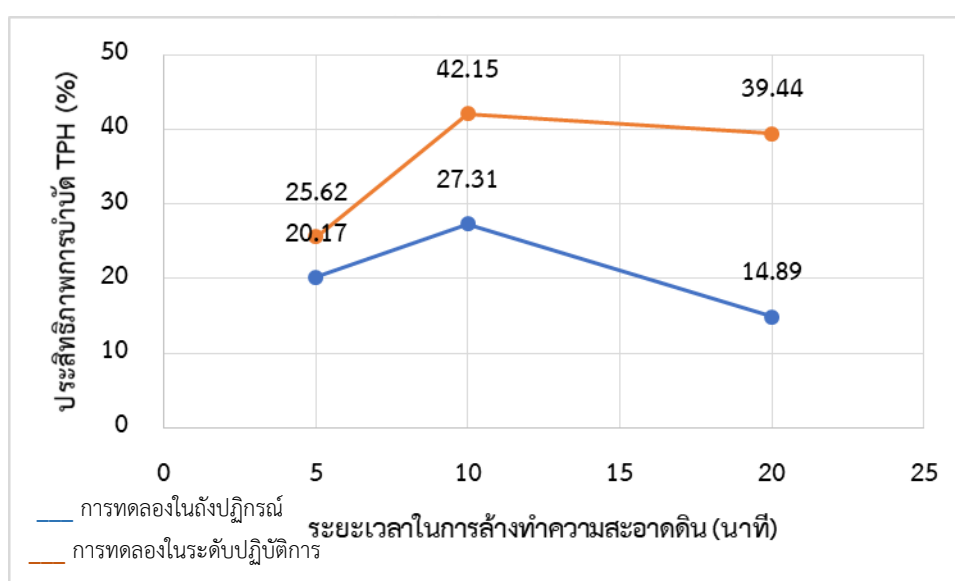
เมื่อทราบความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศที่เหมาะสม จึงนำไปสู่การคัดเลือกระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินที่เหมาะสม ดังสภาวะที่ 3 และ 4 และนำมาเปรียบเทียบกับสภาวะที่ 2 โดยผลการศึกษาการการคัดเลือกระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4-23

ตารางที่ 4-23 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน

สภาวะการเดินระบบ	ประสิทธิภาพการบำบัด ปริมาณปิโตรเลียม ไฮโดรคาร์บอน (%)
สภาวะที่ 3 ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที	20.17
สภาวะที่ 2 ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที	27.31
สภาวะที่ 4 ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 20 นาที	14.89



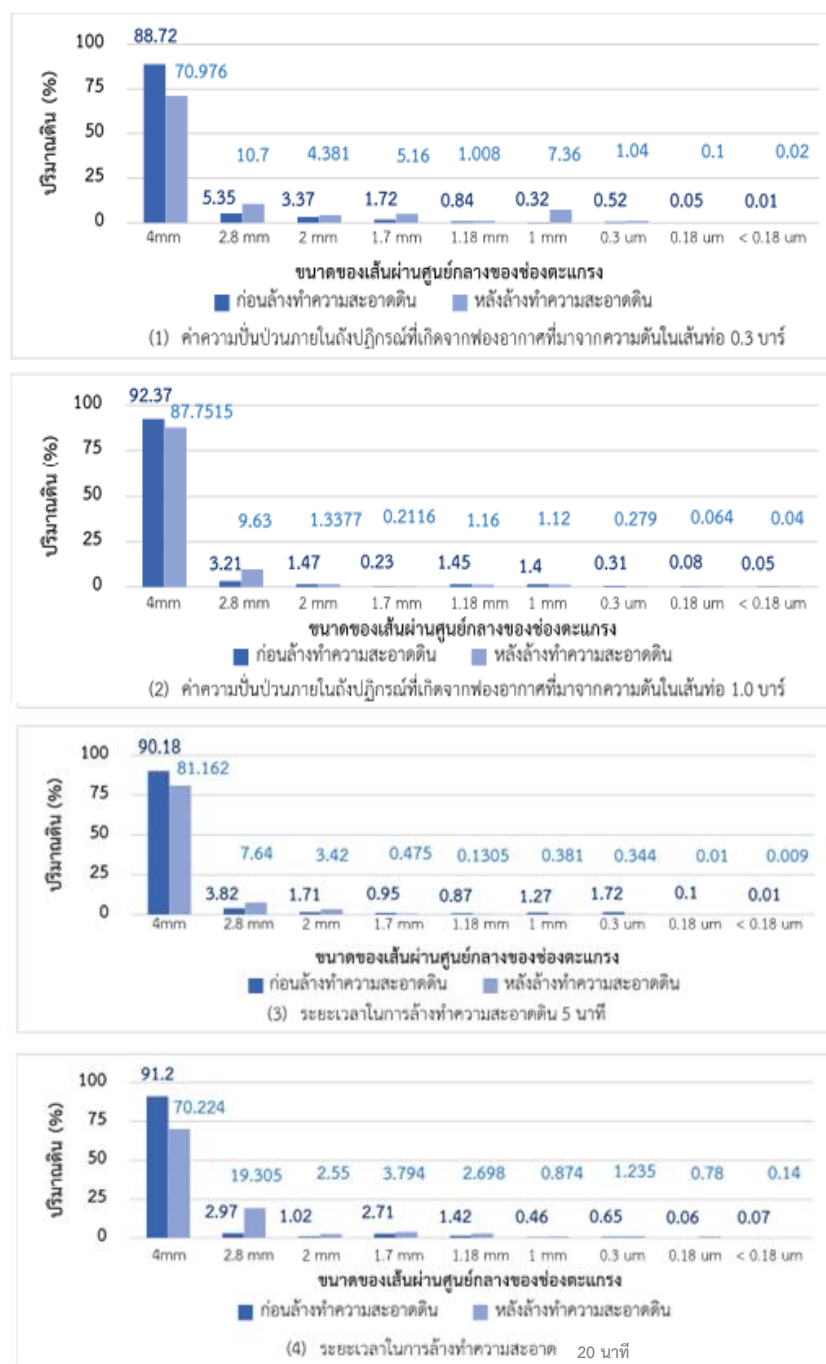
จากตารางที่ 4-23 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ระยะเวลา 5 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 20 นาที เนื่องมาจากอนุภาคส่วนใหญ่ยังไม่จมนตัวในช่วงระยะเวลาที่สั้น การเจอกันระหว่างสารล้าง (น้ำประปา) และดินปนเปื้อนจึงมีโอกาสมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้นเช่นกัน เมื่อนำประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของการทดลองในระดับปฏิบัติการและเดินระบบในถังปฏิกรณ์มาเปรียบเทียบกัน จะแสดงดังภาพที่ 4-32



ภาพที่ 4-32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนกับระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินระหว่างการทดลองในระดับปฏิบัติการและเดินระบบในถังปฏิกรณ์

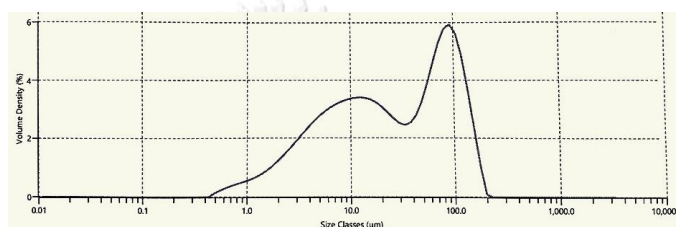
จากภาพที่ 4-32 พบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของการเดินระบบในถังปฏิกรณ์ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเลยถึงจุดหนึ่งที่ความสามารถของน้ำเข้าไปล้างทำความสะอาดดินไม่ได้แล้ว จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนลดลง จึงเป็นสาเหตุให้ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 20 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนลดลง หลังจากการล้างทำความสะอาดดินทั้ง 4 สภาวะจะมีการตรวจสอบปริมาณดินที่ขนาดต่าง ๆ เพื่อบ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของดินปนเปื้อนว่ามีเกาะอยู่ของ

น้ำมัน โดยเปรียบเทียบขนาดอนุภาคก่อนและหลังล้างทำความสะอาดดินในสภาวะต่าง ๆ แสดงกราฟ  
 ดังภาพที่ 4-33

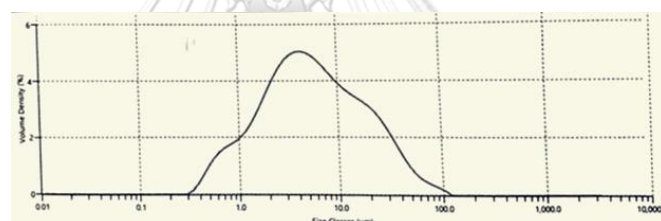


ภาพที่ 4-33 กราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาคก่อนและหลังล้างทำความสะอาดดินในสภาวะต่าง ๆ

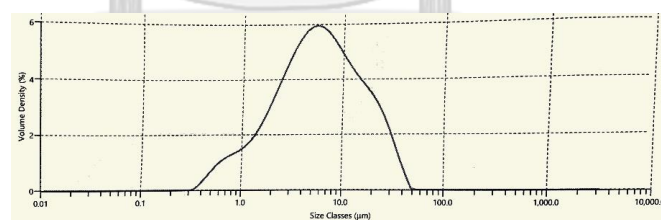
จากการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคก่อนและหลังล้างทำความสะอาดดินในสภาวะต่าง ๆ พบว่าขนาดอนุภาคของดินปนเปื้อน มีการลดลงไม่มาก อาจเนื่องมาจากอนุภาคที่นำมาล้างทำความสะอาดดินมีขนาดใหญ่จำนวนมาก ทำให้อนุภาคบางส่วนเกิดการการรวมตัว การขัดสีระหว่างน้ำประพากับดินปนเปื้อนขนาดใหญ่จึงเกิดได้น้อย แต่ก็ยังพบขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 4.0 มิลลิเมตรเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าดินปนเปื้อนยังได้รับการขัดสีระหว่างน้ำประพากับดินปนเปื้อน นั่นอาจหมายถึงการเกาะตัวของน้ำมันที่อนุภาคดิน มีการหลุดออก จึงทำให้ดินปนเปื้อนมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ น้ำประปา หลังจากการล้างทำความสะอาดดินทั้ง 4 สภาวะไปตรวจวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Laser particle size distribution analyzer (PSD) แสดงกราฟดังภาพที่ 4-34



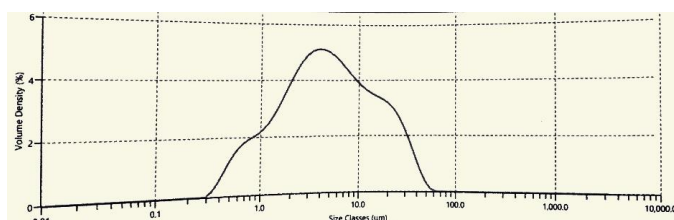
(1) สภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่ 1



(2) สภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่ 2



(3) สภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่ 3



(4) สภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่ 4

ภาพที่ 4-34 กราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาคก่อนและหลังล้างทำความสะอาดดินในสภาวะต่าง ๆ

จากกราฟขนาดอนุภาคดินปนเปื้อนที่แขวนลอยในน้ำหลังล้างทำความสะอาดดินพบว่าสภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่ 1 (ค่าความปั่นป่วนที่เกิดจากฟองอากาศที่มาจากความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์) อนุภาคดินจะมีปริมาณเยอะที่สุดในช่วงขนาดอนุภาค 0.1 มิลลิเมตร อาจเนื่องมาจากความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศไม่เพียงพอต่อการปั่นกววนในระบบทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ยังคงแขวนลอยในระบบอยู่ และสภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่ 2 ถึง 4 (ค่าความปั่นป่วนที่เกิดจากฟองอากาศที่เกิดจากฟองอากาศที่มาจากความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์) พบว่าขนาดอนุภาคดินมีปริมาณเยอะที่สุดในช่วงขนาดอนุภาค 0.002 – 0.005 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นถึงความปั่นป่วนที่เกิดจากฟองอากาศที่ปั่นกววนทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคหลังล้างทำความสะอาดจากสภาวะที่ 1 (0.3 บาร์) แสดงว่าค่าความปั่นป่วนที่เกิดจากฟองอากาศที่เกิดจากฟองอากาศมีผลต่อการล้างทำความสะอาดดิน ถ้าการเดินระบบมีการปั่นกววนมากขึ้น ส่งผลให้สารล้าง (น้ำประปา) เข้าไปล้างทำความสะอาดดินปนเปื้อนได้ดียิ่งขึ้น จากผลของขนาดอนุภาคดินปนเปื้อนหลังล้างทำความสะอาด จึงเป็นที่มาของค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศในการเดินระบบที่เหมาะสมคือ 252.69 ต่อวินาที โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นขนาด 2.4 มิลลิเมตร ซึ่งมาจากความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ การเลือกระยะเวลาในการเดินระบบ ข้อสังเกตคือระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนมากกว่าระยะเวลา 20 นาที ซึ่งการทดลองในระดับปฏิบัติการ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด 20 นาที ประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด 5 นาที พบว่าค่าปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนหลังจากการบำบัดแล้วมีความเบี่ยงเบนสูง แสดงให้เห็นว่าดินที่นำมาทดลองอาจมีลักษณะเฉพาะของดินที่แตกต่างกันไป ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำมันของดินแต่ละจุดไม่เท่ากัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินเพิ่มขึ้นจาก 5 นาที ไปยัง 10 นาที พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน พบว่าระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อนมากที่สุดถึงร้อยละ 27.31 ซึ่งเป็นสภาวะเดียวกับการทดลองในระดับปฏิบัติการ (Lab scale) จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินที่ 10 นาที จากการเดินระบบในส่วนของการล้างทำความสะอาดดินได้สภาวะที่เหมาะสม ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของการเดินระบบในถังปฏิกรณ์เมื่อเทียบกับการทดลองในระดับปฏิบัติการมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 35 ถึง 56 เปอร์เซ็นต์ อาจเนื่องมาจากการเป่าอากาศไม่ทั่วถึงดินปนเปื้อนภายในถังปฏิกรณ์ครบทั้งหมด มี

บางส่วนที่ไม่ได้รับการเป่าอากาศ (Dead zone) บริเวณมุมถังปฏิกรณ์ ทำให้สารล้าง (น้ำประปา) เข้าไปล้างทำความสะอาดดินปนเปื้อนภายในถังปฏิกรณ์ไม่ทั่วถึง

สำหรับการกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน ทุกสภาวะกรองอนุภาคด้วยระยะเวลา 20 นาที เซรามิคเมมเบรนจะไม่สามารถกรองอนุภาคได้แล้วเนื่องจากระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าตำแหน่งเซรามิคเมมเบรน ซึ่งมีการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคของเซรามิคเมมเบรน มีตัวชี้วัดคือ ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) แสดงผลการกำจัดอนุภาคดังตารางที่ 4-24

ตารางที่ 4-24 ผลการศึกษาการกำจัดอนุภาคของแข็งแขวนลอย

สภาวะการทดลอง	ค่าของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพการ กำจัดอนุภาค ของแข็งแขวนลอย (%)
	ก่อน เดินระบบ	หลัง เดินระบบ	
<b>สภาวะการเดินระบบที่ 1</b> ค่าความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์ที่เกิด จากฟองอากาศที่มาจากความดัน ในเส้นท่อ 0.3 บาร์	1,910	105	96.60
<b>สภาวะการเดินระบบที่ 2</b> ค่าความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์ที่เกิด จากฟองอากาศที่มาจากความดัน ในเส้นท่อ 1.0 บาร์	1,965	100	96.95
<b>สภาวะการเดินระบบที่ 3</b> ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที	1,860	130	95.70
<b>สภาวะการเดินระบบที่ 4</b> ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 20 นาที	1,780	85	98.03

ผลการกำจัดอนุภาคของแข็งแขวนลอยจาก 4 สภาวะ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดอยู่ที่ 95.70 ถึง 98.03 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าสภาวะการเดินระบบที่ 4 มีประสิทธิภาพการกำจัด

อนุภาคของแข็งแขวนลอยมากที่สุดถึง 98.03 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศนาน อนุภาคภายในถังปฏิกรณ์ส่วนมากจึงมีการตกตะกอน ภาระในการกรองของเซรามิคเมมเบรนจึงมีน้อยกว่าสภาวะอื่น ๆ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดอนุภาคสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าการปล่อยให้อนุภาคตกตะกอน สามารถช่วยลดภาระในการกรองของเซรามิคเมมเบรน ทำให้ประสิทธิภาพการกรองอนุภาคมีเพิ่มมากขึ้น และเพิ่มอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนได้อีกด้วย

จากการศึกษาการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดจริง สรุปได้ว่าการเดินระบบทั้ง สภาวะการล้างทำความสะอาดในถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมคือ ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม) ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที และค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศที่มาจากความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ซึ่งการปล่อยให้อนุภาคตกตะกอนก่อนเริ่มกรอง สามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนได้



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการล้างทำความสะอาดดินปนเปื้อนน้ำมันด้วยน้ำประปา โดยมีพารามิเตอร์ในการศึกษา ได้แก่ ค่าพีเอชในการล้าง ความเร็วในการเขย่า (รอบต่อนาที) ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน (นาที) และอัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดิน (มิลลิลิตรต่อกรัม) ซึ่งจะนำสภาวะที่เหมาะสมเดิกระบบในถึงปฏิกรณ์สำหรับล้างทำความสะอาดดินปนเปื้อนน้ำมัน ตัวชี้วัดคือ ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

##### 5.1.1 ลักษณะดินปนเปื้อนน้ำมัน

จากการศึกษาลักษณะดินปนเปื้อนน้ำมันที่นำมาใช้ในการล้างทำความสะอาดดินพบว่า สัดส่วนปริมาณของดินส่วนใหญ่มีขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร (มากกว่าร้อยละ 89.35) ความชื้นในดิน ร้อยละ 0.26 ค่าพีเอชในดิน 8.04 (เบสแก่) ค่าพีเอชที่ทำให้อนุภาคบนประจุเท่ากับศูนย์ 6.39 และปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเริ่มต้น  $27,046.69 \pm 841.01$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง  $C_{12}$  (Dodecane) ถึง  $C_{22}$  (Docosane) ซึ่งอยู่ในช่วงของกลุ่มดีเซล (Diesel range organics, DROs)

##### 5.1.2 สภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่เหมาะสม

การล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำประปาสามารถล้างทำความสะอาดดินได้ โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนสูงสุดที่ ร้อยละ 42.15 ภายใต้สภาวะที่ดีที่สุด คือ ค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที และอัตราส่วนระหว่างน้ำและดินปนเปื้อน 10 มิลลิลิตรต่อกรัม โดยค่าพีเอชในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  ส่งผลให้อนุภาคดินไม่มีประจุ ทำให้น้ำประปาเข้าจับอนุภาคดินได้ดียิ่งขึ้น (Ismaie, 2013) ความเร็วในการเขย่าที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวของอนุภาคดิน ส่งผลให้น้ำประปาเข้าจับอนุภาคดินได้ดี ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดินที่เพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาในการเจอกันระหว่างน้ำประปาและดินเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน (Gopur และคณะ, 2003) และอัตราส่วนระหว่างน้ำและดินปนเปื้อนที่เพิ่มมากขึ้น จะเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำมันออกมาจากดิน ทั้งนี้จากทุกพารามิเตอร์ น้ำจะละลายได้เฉพาะส่วนที่น้ำมันละลายได้เท่านั้น น้ำมันส่วนที่ละลาย

ออกมาไม่ได้ หากเพิ่มระดับในพารามิเตอร์ ก็ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน

การล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำประปาจึงเป็นหนึ่งในทางเลือกในการนำมาบำบัดขั้นต้นในการล้างดินปนเปื้อนน้ำมัน ก่อนที่จะนำไปบำบัดดินปนเปื้อนน้ำมันด้วยสารเคมีต่อไป เพื่อลดค่าใช้จ่ายจากการใช้สารเคมีและการตกค้างของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม

### 5.1.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

พารามิเตอร์ตัวแปรเดียวมีนัยสำคัญทั้งหมด โดยเรียงลำดับพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนมากไปน้อย ได้แก่ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน (นาทิจ) ความเร็วในการเขย่า (รอบต่อนาที) อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดิน (มิลลิลิตรต่อกรัม) และค่าพีเอชในการล้าง ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนระหว่างการค่าที่ทำนายจากสมการและการทดลอง  $R^2$  เท่ากับ 0.8757 แสดงดังสมการที่ 5-1

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TPH (\%)} = & -19.7842 + 7.303542*(\text{พีเอช}) - 2.54527*(\text{ความเร็วในการ} \\ & \text{เขย่า}) + 3.1194*(\text{ระยะเวลาการล้างดิน}) + 0.506* \\ & (\text{อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาและดิน}) - 0.53347*(\text{พีเอช})*(\text{พีเอช}) \\ & + 2.63330*(\text{ความเร็วในการเขย่า}) - 0.10235*(\text{ระยะเวลาการล้าง} \\ & \text{ดิน})*(\text{ระยะเวลาการล้างดิน}) - 0.00351(\text{พีเอช})* \\ & (\text{ความเร็วในการเขย่า}) \end{aligned} \quad (5-1)$$

### 5.1.4 การเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน

การเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน ประกอบด้วยความดันในเส้นท่อ 0.3 0.5 และ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรนในแนวยาว (4.5 8.0 และ 15.5 เซนติเมตร)

- ขนาดของฟองอากาศ (Bubble diameter,  $D_B$ ) ลักษณะฟองอากาศเป็นทรงกลม เมื่อเทียบจากอัตราการไหลของอากาศที่เดินระบบที่มีค่าต่ำ ขนาดฟองอยู่ที่ 1.2 ถึง 2.47 มิลลิเมตร

- ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity,  $U_B$ ) ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (เซนติเมตร/วินาที) อยู่ในช่วง 12.9 ถึง 26.7 เซนติเมตรต่อวินาที ยิ่งฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วในการลอยตัวก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน



- ความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient, G) ความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ อยู่ในช่วง 134.7 ถึง 252.69 ต่อวินาที โดยมีค่าแปรผันตรงกับค่าความดันและความสูงของระดับน้ำภายในถัง ซึ่งค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศขึ้นกับความเร็วในการลอยตัวเป็นหลัก

#### 5.1.5 การกรองอนุภาคด้วยเซรามิคเมมเบรน

การประมาณอายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนพบว่าสภาวะความเข้มข้น 2.67 กรัมดิน/ลิตรของน้ำ มีอายุการใช้งานมากที่สุดคือ 1,433 ชั่วโมง และอายุการใช้งานที่สั้นที่สุดคือ สภาวะความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ลิตรของน้ำ มีอายุการใช้งาน 680 ชั่วโมง ขนาดอนุภาค ส่งผลต่อการอุดตันของเซรามิคเมมเบรน เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็ก สามารถเข้าไปอุดตันที่เซรามิค เมมเบรนทำให้จำนวนรอบการทำงานของปั๊มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของเซรามิค เมมเบรนลดลงเช่นกัน สามารถวิเคราะห์ได้ว่า หากเดินระบบของดินปนเปื้อนตามขั้นตอนเดียวกัน อายุการใช้งานจะอยู่ในช่วงเดียวกัน

#### 5.1.6 ถึงปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน และสภาวะที่เหมาะสมในการล้าง ทำความสะอาดจริง

- ถึงปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน เลือกใช้เซรามิคเมมเบรน ติดตั้งภายในถังปฏิกรณ์ เพื่อใช้ในการเป่าฟองอากาศทำให้เกิดการผสมกันระหว่างน้ำประปาและดินปนเปื้อน นอกจากนี้เซรามิคเมมเบรนยังสามารถกรองน้ำที่ปนเปื้อนหลังจากการล้างทำความสะอาด เพื่อให้อนุภาคดินภายในถังปฏิกรณ์ โดยรูปแบบถังปฏิกรณ์จะออกแบบให้ถังปฏิกรณ์มีสัดส่วนรองรับ ขนาดของเซรามิคเมมเบรน เพื่อเพิ่มการสัมผัสระหว่างฟองอากาศและดินปนเปื้อน

- สภาวะการเดินระบบที่เหมาะสม ในการล้างทำความสะอาดในถังปฏิกรณ์ พีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม) ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที และค่าความปั่นป่วนที่เกิดจากฟองอากาศ ที่มาจากความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนสูง ที่สุทธ้อยู่ละ 27.13

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน จากการล้างทำความสะอาดดินด้วยน้ำประปา มีข้อเสนอแนะ ได้แก่

- ควรศึกษาประสิทธิภาพการล้างทำความสะอาดดิน เมื่อนำน้ำประปาไปล้างทำความสะอาดดินเบื้องต้นและล้างทำความสะอาดดินด้วยสารเคมี ตามลำดับ
- การเป่าอากาศของเซรามิคเมมเบรน โดยใช้ความดันในเส้นท่อแตกต่างกันขณะเดินระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจับตัวของอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกัน การเพิ่มใบพัดหรือหัวกระจายอากาศลงในถังปฏิกรณ์เพื่อลดปัญหาการเป่าอากาศที่ไม่เท่ากันในถังปฏิกรณ์ ซึ่งอาจเกิดจากพื้นที่ภายในถังปฏิกรณ์บางบริเวณเกิดการหยุดนิ่งของของเหลว (Dead zone) การปั่นกววนของฟองอากาศ จึงไม่สมบูรณ์
- ควรมีการทดลองเพิ่มเติมในถังปฏิกรณ์นี้ ในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การเดินระบบต่อเนื่อง เพื่อหาทางเลือกในการบำบัดดินปนเปื้อนจากการใช้งานจริง
- ข้อควรระวังจากการทดลอง คือการปรับค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดดิน ควรมีการวัดค่าพีเอชซ้ำ เพื่อความแม่นยำในการทดลอง และลดค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจมาจกข้อจำกัดของการแสดงผลค่าของเครื่องวัดพีเอช





## ผลการศึกษาลักษณะทั่วไปของดินปนเปื้อน

ตารางที่ ก-1 ค่าพีเอชของดิน

ระดับความลึก	การทดลอง			ค่าพีเอชของดิน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
ชั้นที่ 1	7.56	7.23	7.76	7.52
ชั้นที่ 2	7.67	8.38	8.27	8.10
ชั้นที่ 3	8.79	8.49	8.64	8.64
ชั้นที่ 4	8.81	8.71	8.85	8.79
ชั้นที่ 5	8.98	9.09	9.06	9.04
ชั้นที่ 6	8.23	8.43	8.41	8.35
ชั้นที่ 7	8.73	9.39	9.47	9.19

ตารางที่ ก-2 ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุบนอนุภาคเป็นศูนย์

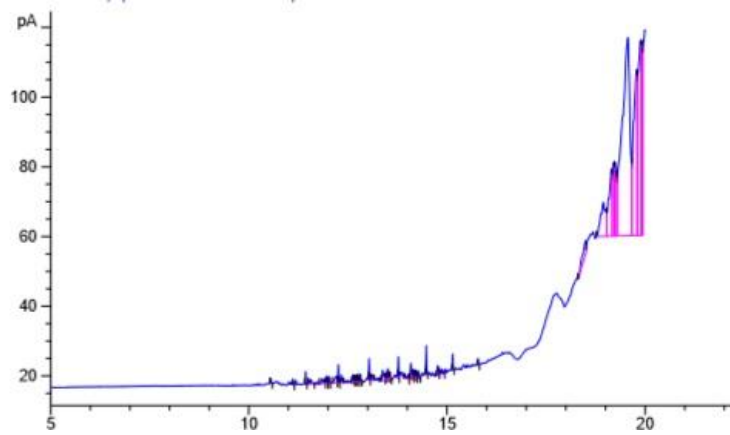
ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชสุดท้าย						
	ดินชั้นที่ 1	ดินชั้นที่ 2	ดินชั้นที่ 3	ดินชั้นที่ 4	ดินชั้นที่ 5	ดินชั้นที่ 6	ดินชั้นที่ 7
3.0	4.25	3.90	3.84	3.68	3.74	3.30	3.08
4.0	5.31	7.33	5.77	5.41	4.43	4.82	4.23
5.0	6.06	7.38	6.19	6.05	6.51	5.95	5.44
6.0	6.68	6.97	6.30	6.25	6.64	7.33	6.21
7.0	6.44	7.17	6.49	6.41	6.93	6.46	6.98
8.0	6.29	7.97	6.60	6.49	7.49	7.09	7.03
9.0	6.13	7.60	6.79	6.47	7.67	6.41	7.04
10.0	6.26	7.54	7.08	6.72	7.44	7.32	7.22
11.0	7.65	10.94	8.10	7.28	8.48	7.20	8.01
12.0	9.20	11.56	11.74	9.74	11.77	9.23	11.78
pH <sub>zpc</sub>	6.20	7.98	6.39	6.49	6.93	6.51	6.99

ตารางที่ ก-3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคในดินแต่ละระดับความลึก

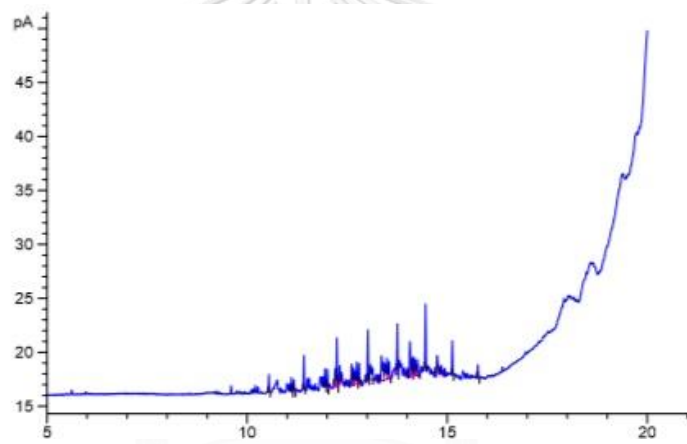
ลำดับ	ขนาดช่อง ตะแกรง	ปริมาณดิน (%)						
		ดินชั้น ที่ 1	ดินชั้น ที่ 2	ดินชั้น ที่ 3	ดินชั้น ที่ 4	ดินชั้น ที่ 5	ดินชั้น ที่ 6	ดินชั้น ที่ 7
1	4 มิลลิเมตร	10.74	81.08	87.00	90.54	93.67	60.47	74.49
2	2.8 มิลลิเมตร	5.45	3.16	2.35	3.32	3.75	20.26	9.21
3	2 มิลลิเมตร	5.11	4.74	2.23	3.37	0.98	5.49	8.78
4	1.7 มิลลิเมตร	3.64	2.00	1.28	1.12	0.40	1.85	2.56
5	1.18 มิลลิเมตร	9.33	1.87	2.31	0.84	0.62	1.73	1.79
6	1 มิลลิเมตร	3.88	2.16	1.11	0.22	0.09	0.24	1.45
7	0.3 ไมครอน	40.39	1.48	3.14	0.46	0.34	2.37	0.37
8	0.18 ไมครอน	9.01	0.58	0.39	0.08	0.09	0.53	0.44
9	<0.18 ไมครอน	12.44	2.92	0.19	0.05	0.05	7.07	0.92

ตารางที่ ก-4 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนทุกระดับชั้น

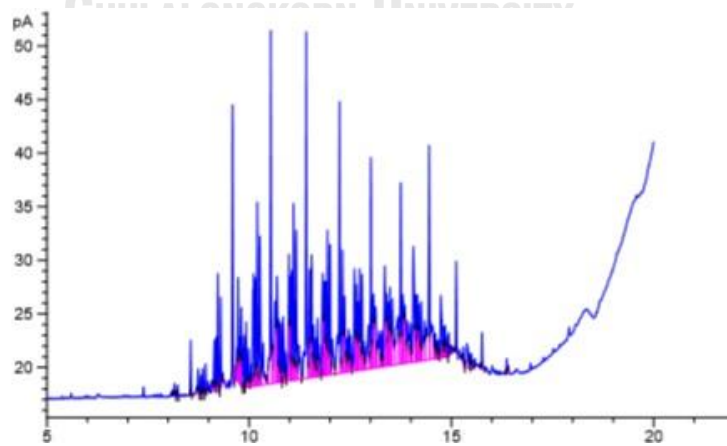
ระดับชั้น ความลึก	ความเข้มข้นของ น้ำมัน (ppm)	ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
ชั้นที่ 1	314.87 ± 1.51	9,219.61	10,234.64	9,727.12 ± 717.7
ชั้นที่ 2	316.02 ± 0.92	11,265.95	12,079.80	11,672.87 ± 575.4
ชั้นที่ 3	308.78 ± 0.14	27,641.37	26,452.04	27,046.69 ± 841.01
ชั้นที่ 4	306.87 ± 0.17	28,865.11	29,411.83	28,865.11 ± 773.24
ชั้นที่ 5	312.02 ± 0.99	35,501.69	32,823.14	34,162.41 ± 1,894.02
ชั้นที่ 6	312.70 ± 1.84	50,742.09	48,267.56	49,504.78 ± 1,749.7
ชั้นที่ 7	306.82 ± 0.55	58,269.13	59,016.38	58,8643.13 ± 527.84



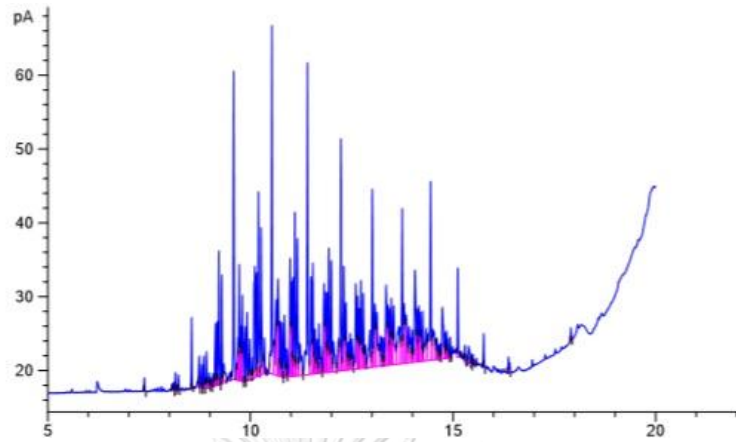
(1) ดินชั้นที่ 1



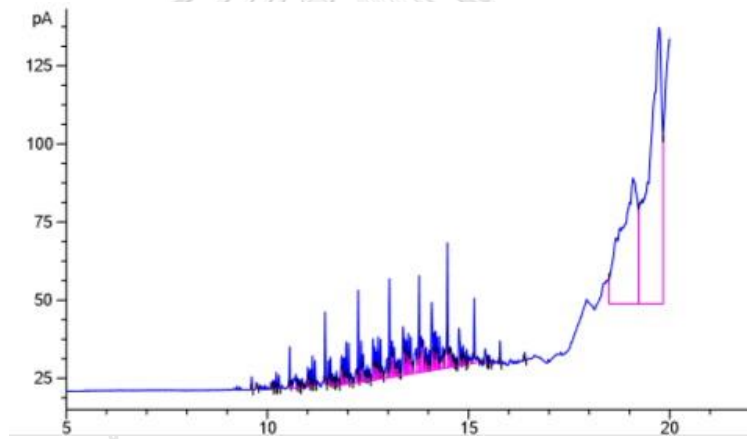
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2) ดินชั้นที่ 2 ล้อย



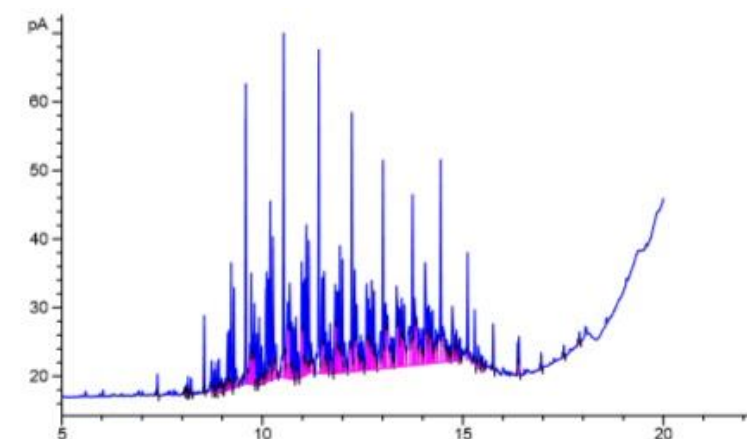
(3) ดินชั้นที่ 3



(4) ดินชั้นที่ 4

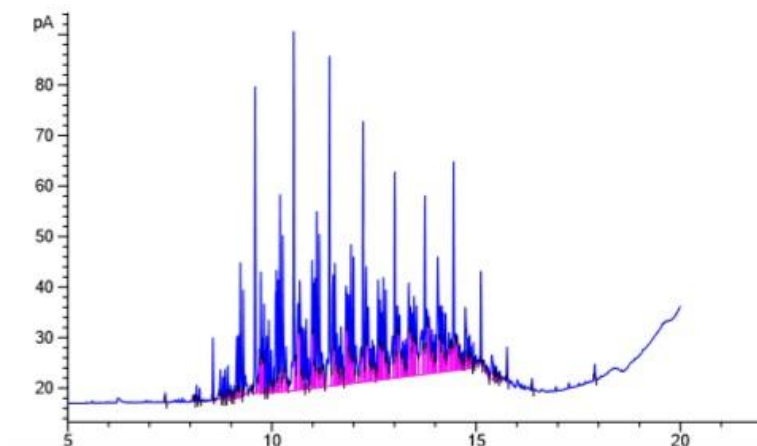


CHULALONGKORN UNIVERSITY (5) ดินชั้นที่ 5



(6) ดินชั้นที่ 6





(7) ดินชั้นที่ 7

รูป ก-1 โครมาโทแกรมของดินปนเปื้อนทุกระดับชั้น

ตารางที่ ก-5 ค่าของแข็งแขวนลอยของเบนโทไนท์ที่ความสูงต่าง ๆ

ค่าของแข็ง แขวนลอย (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ระยะเวลา (นาที)							
	0	5	10	15	20	40	60	100
ความสูง 20 ซม.	17.22	16.18	14.63	12.22	11.53	8.78	7.23	3.09
ความสูง 60 ซม.	17.06	14.16	11.08	9.72	8.87	5.63	2.73	1.19

ตารางที่ ก-6 ค่าของแข็งแขวนลอยของดินปนเปื้อนที่ความสูงต่าง ๆ

ค่าของแข็ง แขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ระยะเวลา (นาที)									
	0	1	2	3	4	5	10	15	20	
ความสูง 20 ซม.	39.8	37.4	34.6	27.4	19.9	13.9	8.36	3.98	1.19	
ความสูง 60 ซม.	38.6	32.8	31.2	23.5	15.8	9.26	4.24	1.93	0.77	



ตารางที่ ข-1 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที ความเร็วในการเขย่า 30 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปา ต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตร ต่อกรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	381.1049	391.8646	386.4848
		= $pH_{zpc}$	465.9455	486.7091	476.3273
		> $pH_{zpc}$	528.3238	514.9854	521.6546
	5.0	< $pH_{zpc}$	515.8469	500.6866	508.2668
		= $pH_{zpc}$	473.5378	458.5841	466.0610
		> $pH_{zpc}$	488.1538	538.3423	513.2481
	10.0	< $pH_{zpc}$	476.3324	515.0613	495.6968
		= $pH_{zpc}$	350.8301	331.5156	341.1728
		> $pH_{zpc}$	493.0216	513.1590	503.0903

ตารางที่ ข-2 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที ความเร็วในการเขย่า 30 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปา ต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตร ต่อกรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	23213.114	22530.898	22872.006
		= $pH_{zpc}$	21309.202	20636.288	20972.746
		> $pH_{zpc}$	21966.924	24225.405	23096.164
	5.0	< $pH_{zpc}$	23213.114	22530.898	22872.006
		= $pH_{zpc}$	21309.202	20636.288	20972.746
		> $pH_{zpc}$	21966.924	24225.405	23096.164
	10.0	< $pH_{zpc}$	21434.959	23177.759	22306.359
		= $pH_{zpc}$	21049.808	19890.939	20470.374
		> $pH_{zpc}$	22185.976	23092.155	22639.066

ตารางที่ ข-3 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที ความเร็วในการเขย่า 60 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปา ต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตร ต่อกรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	478.0079	523.3751	500.6915
		= $pH_{zpc}$	484.1730	455.6472	469.9101
		> $pH_{zpc}$	516.2361	483.2006	499.7184
	5.0	< $pH_{zpc}$	509.6003	494.5905	502.0954
		= $pH_{zpc}$	489.2338	427.2372	458.2355
		> $pH_{zpc}$	477.8592	513.6789	495.7691
	10.0	< $pH_{zpc}$	466.5926	494.2391	480.4159
		= $pH_{zpc}$	493.5152	394.5317	444.0235
		> $pH_{zpc}$	485.1197	498.5487	491.8342

ตารางที่ ข-4 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที ความเร็วในการเขย่า 60 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อ ดินปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	21510.359	23551.882	22531.121
		= $pH_{zpc}$	21787.789	20504.127	21145.958
		> $pH_{zpc}$	23230.627	21744.029	22487.328
	5.0	< $pH_{zpc}$	22932.017	22256.574	22594.296
		= $pH_{zpc}$	22015.522	19225.678	20620.600
		> $pH_{zpc}$	21503.666	23115.553	22309.612
	10.0	< $pH_{zpc}$	20996.669	22240.763	21618.716
		= $pH_{zpc}$	22208.187	17753.931	19981.059
		> $pH_{zpc}$	21830.389	22434.693	22132.541

ตารางที่ ข-5 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อ ดินปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	455.1836	531.9769	493.5802
		= $pH_{zpc}$	465.7832	490.1155	477.9493
		> $pH_{zpc}$	388.7650	366.2865	377.5257
	5.0	< $pH_{zpc}$	442.4908	532.0615	487.2762
		= $pH_{zpc}$	480.3303	433.5492	456.9398
		> $pH_{zpc}$	503.5972	484.2820	493.9396
	10.0	< $pH_{zpc}$	439.5710	503.5047	471.5379
		= $pH_{zpc}$	452.2414	441.7673	447.0043
		> $pH_{zpc}$	503.5972	477.9201	490.7581

ตารางที่ ข-6 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	20483.263	23938.963	22211.113
		= $pH_{zpc}$	20960.247	22055.198	21507.722
		> $pH_{zpc}$	23325.901	21977.191	22651.546
	5.0	< $pH_{zpc}$	19912.092	23942.769	21927.433
		= $pH_{zpc}$	21614.866	19509.717	20562.291
		> $pH_{zpc}$	22661.878	21792.693	22227.285
	10.0	< $pH_{zpc}$	19780.697	22657.715	21219.206
		= $pH_{zpc}$	20350.864	19879.531	20115.198
		> $pH_{zpc}$	22661.878	21506.405	22084.141

ตารางที่ ข-7 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที ความเร็วในการเขย่า 30 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อ ดินปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	487.8587	515.1724	501.5151
		= $pH_{zpc}$	466.5666	460.3753	463.4702
		> $pH_{zpc}$	503.52004	498.9015	501.2104
	5.0	< $pH_{zpc}$	428.3882	495.2828	461.8354
		= $pH_{zpc}$	422.2787	407.8453	415.0611
		> $pH_{zpc}$	502.4233	467.8314	485.1274
	10.0	< $pH_{zpc}$	428.6887	463.7076	446.1989
		= $pH_{zpc}$	359.4647	388.6207	374.0426
		> $pH_{zpc}$	468.9960	458.7716	463.8842

ตารางที่ ข-8 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที ความเร็วในการเขย่า 30 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	21953.645	23182.76	22568.202
		= $pH_{zpc}$	20995.497	20716.886	20856.191
		> $pH_{zpc}$	22658.402	22450.556	22554.479
	5.0	< $pH_{zpc}$	19277.469	22287.703	20782.586
		= $pH_{zpc}$	19002.541	18353.031	18677.786
		> $pH_{zpc}$	22609.052	21052.402	21830.726
	10.0	< $pH_{zpc}$	19290.993	20866.845	20078.919
		= $pH_{zpc}$	16175.914	17487.935	16831.924
		> $pH_{zpc}$	21104.823	20644.738	20874.781

ตารางที่ ข-9 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที ความเร็วในการเขย่า 60 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อ ดินปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	473.8123	436.4438	455.1209
		= $pH_{zpc}$	397.7314	428.7195	413.2224
		> $pH_{zpc}$	464.9737	516.0432	490.5051
	5.0	< $pH_{zpc}$	424.7794	407.2468	416.0171
		= $pH_{zpc}$	384.3144	366.3669	375.3311
		> $pH_{zpc}$	448.8178	484.4029	466.6064
	10.0	< $pH_{zpc}$	403.6842	418.6255	411.1588
		= $pH_{zpc}$	354.2676	358.5176	356.3946
		> $pH_{zpc}$	467.7448	433.1769	450.4518

ตารางที่ ข-10 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที ความเร็วในการเขย่า 60 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	21321.557	19639.971	20480.764
		= $pH_{zpc}$	17897.919	19292.083	18595.001
		> $pH_{zpc}$	20923.816	23221.955	22072.883
	5.0	< $pH_{zpc}$	19115.088	18325.966	18720.527
		= $pH_{zpc}$	17294.154	16486.366	16890.260
		> $pH_{zpc}$	20196.778	21798.000	20997.389
	10.0	< $pH_{zpc}$	18165.789	18838.064	18501.925
		= $pH_{zpc}$	15942.022	16133.299	16037.661
		> $pH_{zpc}$	21048.511	19492.726	20270.618

ตารางที่ ข-11 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด ดิน 10 นาที ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อ ดินปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	438.7801	399.1410	418.9606
		= $pH_{zpc}$	393.7421	386.5764	390.1594
		> $pH_{zpc}$	474.0048	494.7066	484.3552
	5.0	< $pH_{zpc}$	418.7572	423.3374	421.0473
		= $pH_{zpc}$	377.6620	365.6254	371.6437
		> $pH_{zpc}$	449.3101	447.6606	448.4858
	10.0	< $pH_{zpc}$	347.7549	374.7755	361.2657
		= $pH_{zpc}$	346.2856	349.0979	347.6912
		> $pH_{zpc}$	425.2613	413.8275	419.5449

ตารางที่ ข-12 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	19745.107	17961.347	18853.227
		= $pH_{zpc}$	17718.395	17395.958	17557.176
		> $pH_{zpc}$	21330.215	22261.791	21796.003
	5.0	< $pH_{zpc}$	18844.084	19050.185	18947.134
		= $pH_{zpc}$	16994.79	16453.158	16723.974
		> $pH_{zpc}$	20218.982	20144.721	20181.851
	10.0	< $pH_{zpc}$	15648.975	16864.909	16256.942
		= $pH_{zpc}$	15582.837	15709.373	15646.105
		> $pH_{zpc}$	19136.751	18622.244	18879.497



ตารางที่ ข-13 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด ดิน 20 นาที ความเร็วในการเขย่า 30 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อ ดินปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	487.8867	520.3701	504.1284
		= $pH_{zpc}$	394.7488	393.4327	394.0903
		> $pH_{zpc}$	520.2949	492.4579	506.3769
	5.0	< $pH_{zpc}$	469.3649	505.8238	487.5944
		= $pH_{zpc}$	347.8333	405.9884	376.9107
		> $pH_{zpc}$	491.8904	480.3627	486.1266
	10.0	< $pH_{zpc}$	473.1664	427.7754	450.4719
		= $pH_{zpc}$	367.3679	381.6762	374.5226
		> $pH_{zpc}$	474.2837	484.3871	479.3359

ตารางที่ ข-14 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 20 นาที ความเร็วในการเขย่า 30 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	21954.904	23416.655	22685.779
		= $pH_{zpc}$	17763.664	17704.457	17734.063
		> $pH_{zpc}$	23413.247	22160.612	22786.924
	5.0	< $pH_{zpc}$	21121.402	22762.079	21941.741
		= $pH_{zpc}$	15652.509	18269.478	16960.994
		> $pH_{zpc}$	22135.088	21616.302	21875.695
	10.0	< $pH_{zpc}$	21292.499	19249.899	20271.199
		= $pH_{zpc}$	16531.556	17175.448	16853.502
		> $pH_{zpc}$	21342.756	21797.438	21570.097

ตารางที่ ข-15 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด ดิน 20 นาที ความเร็วในการเขย่า 60 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อ ดินปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	400.6007	479.2572	439.9286
		= $pH_{zpc}$	401.6941	386.0416	393.8679
		> $pH_{zpc}$	507.0572	446.7526	476.9054
	5.0	< $pH_{zpc}$	375.3079	446.8572	411.0821
		= $pH_{zpc}$	383.2038	354.9494	369.0761
		> $pH_{zpc}$	446.2705	462.3813	454.3254
	10.0	< $pH_{zpc}$	370.7897	445.7329	408.2613
		= $pH_{zpc}$	394.5464	341.6011	368.0742
		> $pH_{zpc}$	406.2265	463.0737	434.6501

ตารางที่ ข-16 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 20 นาที ความเร็วในการเขย่า 60 รอบต่อนาที

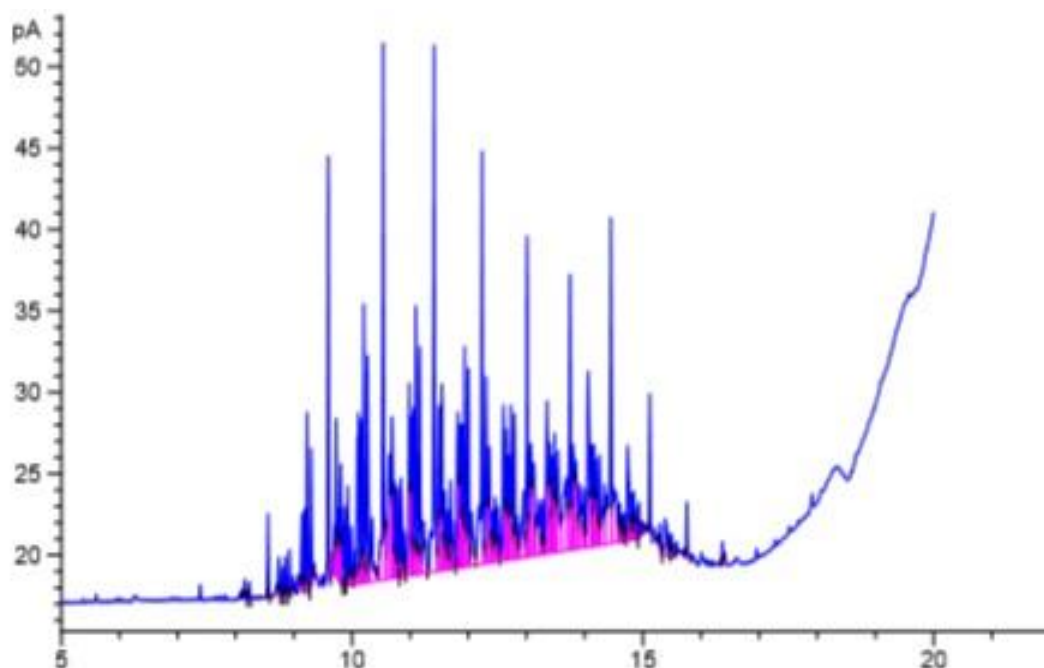
พารามิเตอร์			ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	18027.032	21566.574	19796.803
		= $pH_{zpc}$	18076.231	17371.888	17724.059
		> $pH_{zpc}$	22817.602	20103.879	21460.742
	5.0	< $pH_{zpc}$	16888.846	20108.607	18498.726
		= $pH_{zpc}$	17244.157	15972.723	16608.439
		> $pH_{zpc}$	20082.188	20807.147	20444.667
	10.0	< $pH_{zpc}$	16685.536	20057.981	18371.758
		= $pH_{zpc}$	17754.576	15372.086	16563.331
		> $pH_{zpc}$	18280.208	20838.293	19559.253

ตารางที่ ข-17 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาด ดิน 20 นาที ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที

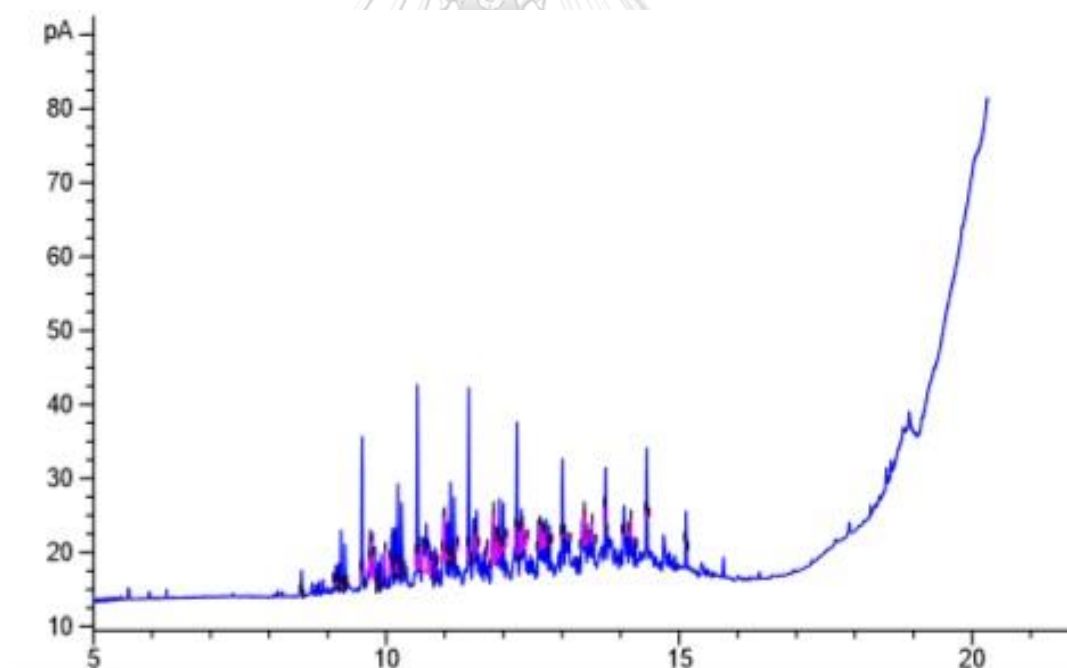
พารามิเตอร์			ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อ ดินปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	366.2903	445.2389	405.7646
		= $pH_{zpc}$	398.1494	337.6602	367.9057
		> $pH_{zpc}$	472.9883	455.2384	464.1138
	5.0	< $pH_{zpc}$	396.3503	425.2277	410.7892
		= $pH_{zpc}$	376.0705	402.1878	389.1291
		> $pH_{zpc}$	446.8701	406.9455	426.9078
	10.0	< $pH_{zpc}$	399.6071	404.5902	402.0997
		= $pH_{zpc}$	377.9227	349.9377	363.9307
		> $pH_{zpc}$	478.2207	427.4572	452.8389

ตารางที่ ข-18 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 20 นาที ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที

พารามิเตอร์			ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
อัตราส่วน ระหว่าง น้ำประปาต่อดิน ปนเปื้อน (มิลลิลิตรต่อ กรัม)	2.5	< $pH_{zpc}$	16483.063	20035.753	18259.408
		= $pH_{zpc}$	17916.724	15194.742	16555.733
		> $pH_{zpc}$	21284.471	20485.716	20885.093
	5.0	< $pH_{zpc}$	17835.765	19135.246	18485.506
		= $pH_{zpc}$	16923.193	18098.427	17510.812
		> $pH_{zpc}$	20109.182	18312.536	19210.859
	10.0	< $pH_{zpc}$	17982.347	18206.587	18094.467
		= $pH_{zpc}$	17006.515	15747.191	16376.853
		> $pH_{zpc}$	21519.916	19235.593	20377.755

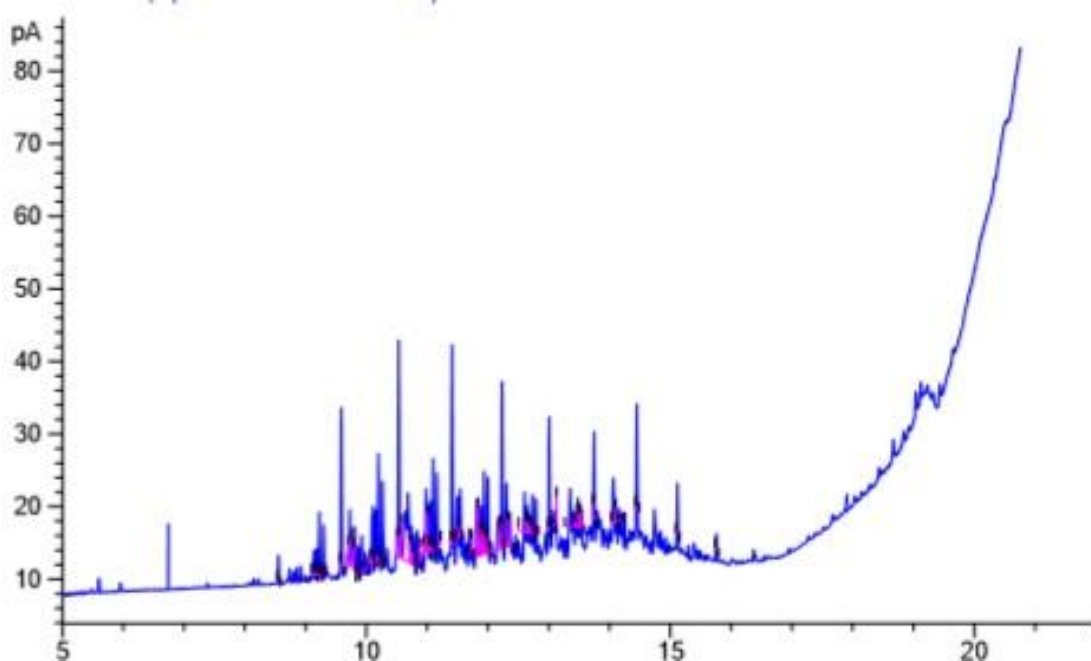


(1) ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเริ่มต้นของดินปนเปื้อนระดับชั้นความลึกที่ 3



(2) อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 2.5 มิลลิลิตรต่อกรัม ระยะเวลาการล้าง 10 นาที

ความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาที พีเอชในการล้างเท่ากับ  $\text{pH}_{\text{zpc}}$   
 สภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (42.15 เปอร์เซ็นต์)



(3) อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 2.5 มิลลิลิตรต่อกรัม ระยะเวลาการล้าง 5 นาที  
 ความเร็วในการเขย่า 30 รอบต่อนาที พีเอชในการล้างมากกว่า  $pH_{zpc}$   
 สภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด (13.20 เปอร์เซ็นต์)  
 รูป ข-1 โครมาโทแกรมของดินปนเปื้อนในสภาวะการล้างทำความสะอาดต่าง ๆ  
 จากตาราง ข-1 การคำนวณปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน โดยสภาวะการล้างทำความสะอาดดินที่ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 5 นาที ความเร็วในการเขย่า 30 รอบต่อนาที ค่าพีเอชในการล้างน้อยกว่า  $pH_{zpc}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดิน 2.5 มิลลิลิตรต่อกรัม โดยมีพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ 330.8376 และปริมาตรรวมจากการสกัดดินปนเปื้อนเท่ากับ 60 มิลลิลิตร  $CH_2Cl_2/1$  กรัมดิน

สามารถคำนวณได้ดังนี้ (สมการ 4-1)

$$TPH (ppm) = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ} + 1296.1}{4.268}$$

$$TPH (ppm) = \frac{330.837 + 1296.1}{4.268}$$

$$TPH = 381.10496 ppm$$

แปลงหน่วย

$$TPH (mg/kg) = \left( \frac{381.10496 \text{ mg}}{\text{L}} \right) \times \left( \frac{60 \text{ ml}}{1 \text{ g}} \right) \times \left( \frac{0.001 \text{ L}}{1 \text{ ml}} \right) \times \left( \frac{1 \text{ g}}{0.001 \text{ kg}} \right)$$

$$TPH = 22,866.297 \text{ mg/kg}$$

ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (%) เมื่อปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนเริ่มต้นเท่ากับ 27046.69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

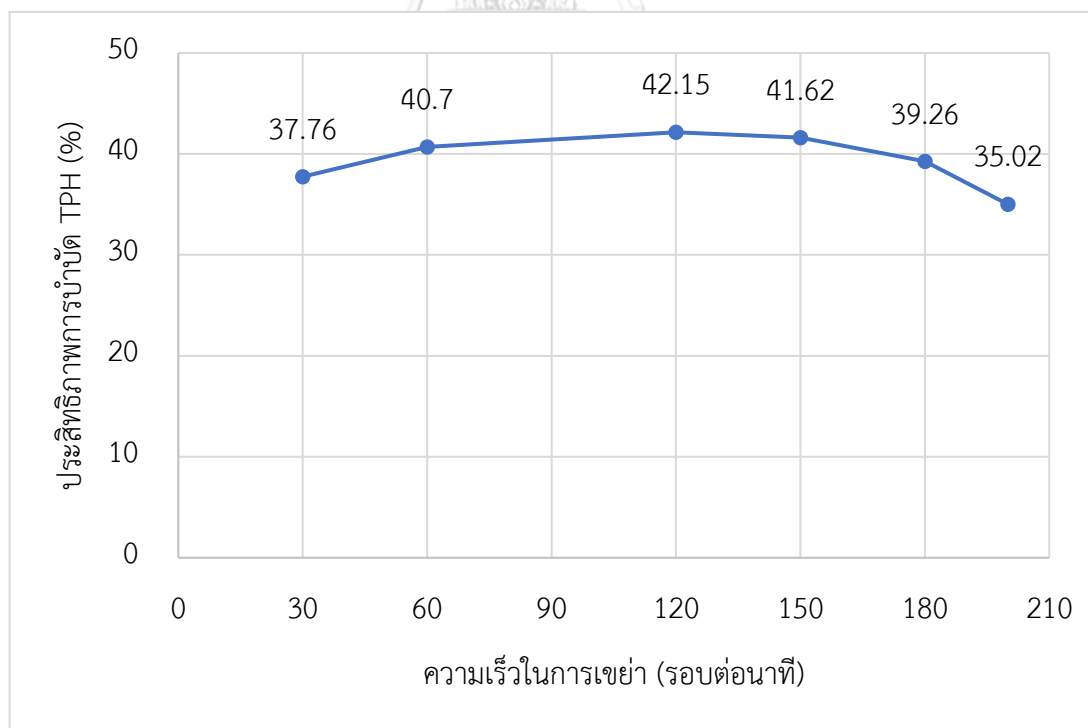
$$TPH \text{ removal efficiency} = 1 - \left( \frac{22,866.297 \text{ mg/kg}}{27,046.69 \text{ mg/kg}} \right) \times 100\%$$

$$TPH \text{ removal efficiency} = 15.45 \%$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-19 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะ ระยะเวลาในการล้างทำความสะอาดดิน 10 นาที อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 มิลลิลิตรต่อกรัม พีเอชในการล้างมากกว่า  $pH_{zpc}$  และความเร็วในการเขย่าต่าง ๆ

ความเร็วในการเขย่า (รอบต่อนาที)	ความเข้มข้น ของน้ำมัน (ppm)	ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
30	374.0427	16175.914	17487.935	16831.924
60	356.392	15942.022	16133.299	16037.661
120	347.69122	15582.837	15709.373	15646.105
150	1052.4958	17988.465	13586.408	15787.436
180	1095.0673	22937.941	9914.079	16426.012
200	1171.5475	15907.775	19238.65	17573.212



รูป ข-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด TPH กับความเร็วในการเขย่า

ตารางที่ ข-20 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนระหว่างการ  
ทดลองและการทำนายจากสมการ

ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (%)		ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
การทดลอง	การทำนายจากสมการ	
14.26	13.95513	2.13790
16.69	16.2808	2.45178
17.87	20.93212	17.13554
16.55	21.87618	32.18234
24.27	24.20184	0.280846
30.29	28.85316	4.743602
16.12	22.36572	38.74517
26.8	24.69138	7.86797
32.48	29.34271	9.65915
20.74	21.41156	3.237981
21.81	23.36916	7.148827
20.47	27.28436	33.28951
22.88	29.3326	28.20192
31.24	31.2902	0.160697
35.08	35.20541	0.357485
34.43	29.82214	13.38326
34.46	31.77975	7.777868
38.78	35.69495	7.955258
13.2	11.79349	10.65534
16.85	13.27788	21.19955
16.25	16.24664	0.020675
16.6	19.71454	18.76227
18.38	21.19892	15.33688



ตารางที่ ข-20 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนระหว่างกา  
รทดลองและการทำนายจากสมการ (ต่อ)

ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (%)		ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
การทดลอง	การทำนายจากสมการ	
19.41	24.16768	24.5115
15.74	20.20408	28.36139
20.65	21.68846	5.028881
22.78	24.65723	8.240684
15.43	15.22091	1.35512
16.46	17.54657	6.601258
18.92	22.19789	17.32501
23.16	23.14195	0.077947
30.78	25.46761	17.25923
29.94	30.11893	0.597641
18.87	23.63149	25.23314
31.6	25.95715	17.85711
31.65	30.60848	3.290746
22.45	22.67733	1.012596
23.75	24.63493	3.726021
23.97	28.55013	19.10778
30.94	30.59837	1.104168
37.55	32.55597	13.29967
38.16	36.47118	4.425639
37.28	31.08792	16.60967
38.59	33.04552	14.36767
35.25	36.96072	4.853111
14.6	13.05927	10.55298

ตารางที่ ข-20 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนระหว่างการ  
ทดลองและการทำนายจากสมการ (ต่อ)

ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (%)		ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
การทดลอง	การทำนายจากสมการ	
17.51	14.54365	16.94091
17.81	17.51241	1.670909
19.28	20.98031	8.819023
22.36	22.46469	0.4682
25.38	25.43345	0.210613
19.11	21.46985	12.34878
24.4	22.95423	5.925267
28.97	25.923	10.51778
17.52	17.75245	1.32675
20.06	20.07811	0.090272
21.54	24.72943	14.80702
25.76	25.67349	0.335835
31.59	27.99915	11.36704
39.89	32.65048	18.14872
25.05	26.16303	4.44325
32.07	28.4887	11.16715
33.09	33.14002	0.151164
24.31	25.20887	3.697529
26.12	27.16647	4.006399
25.62	31.08168	21.31801
37.76	33.12991	12.26189
40.7	35.08751	13.78989
42.15	39.00272	7.466862

ตารางที่ ข-20 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนระหว่างกา  
ทดลองและการทำนายจากสมการ (ต่อ)

ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (%)		ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
การทดลอง	การทำนายจากสมการ	
37.68	33.61946	10.77639
38.76	35.57706	8.211922
39.44	39.49226	0.132513
16.29	15.59081	4.292163
18.16	17.07519	5.973631
18.34	20.04395	9.290908
22.81	23.51185	3.076936
25.05	24.99623	0.214647
30.19	27.96499	7.370007
20.24	24.00139	18.58396
27.68	25.48578	7.927109
24.65	28.45454	15.43424
40.32	38.84324	3.662593
37.45	41.53426	10.9059
24.24	29.3326	21.00907
34.13	29.82214	12.6219
35.16	31.08792	11.58158
37.02	39.00272	5.355802
40.97	40.26849	1.712256
41.42	41.80625	0.932513
32.56	40.96032	25.79951
38.89	37.46035	3.676148
36.96	38.84324	5.095353

ตารางที่ ข-20 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนระหว่างการ  
ทดลองและการทำนายจากสมการ (ต่อ)

ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (%)		ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
การทดลอง	การทำนายจากสมการ	
41.64	41.53426	0.25394
37.91	36.47118	3.795367
37.02	35.20541	4.90166
38.27	35.20541	8.007824
38.53	36.47118	5.34343
39.17	36.47118	6.890027
40.15	39.00272	2.85749
39.43	39.00272	1.083647
37.90	39.00272	2.909546
37.44	35.20541	5.968468
40.04	36.47118	8.913146





ตารางที่ ค-1 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 4.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.4339	6.3369	1.22
0.9293	3.4375	1.09
0.8229	3.2158	1.02
0.8036	3.6427	0.98
0.5631	3.1954	0.81
0.6515	2.6884	0.93
0.3831	2.9185	0.65
0.6073	3.2557	0.84
0.5782	2.8562	0.85
0.5954	2.8483	0.86
0.5019	2.7761	0.78
0.4853	2.5597	0.78
13.0865	28.1808	3.36
0.5486	2.4893	0.85
2.1522	2.6262	1.97
0.5468	5.9862	0.68
0.5684	2.8081	0.84
1.9854	2.6725	1.86
0.8270	4.9962	0.92
0.9959	3.2467	1.15
0.9905	3.8133	1.10
0.5405	3.5695	0.77

ตารางที่ ค-1 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 4.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.0007	6.8885	0.96
0.1799	2.6063	0.42
1.0616	3.5518	1.17
1.4582	1.5071	1.77
0.8953	3.6526	1.05
0.9191	5.0290	0.98
1.3858	3.3827	1.40
1.2942	3.4077	1.34
0.9698	4.1787	1.06
0.9419	4.0668	1.05
0.2722	3.5244	0.50
1.4560	3.5017	1.43
0.8752	1.9241	1.21
1.0844	4.2776	1.13
1.0520	3.3189	1.19
0.3130	3.7799	0.54
1.0639	3.7435	1.16
12.3664	25.0510	3.34
1.0160	3.6947	1.13
1.2317	3.3206	1.31
0.9835	4.7648	1.04
0.4377	3.9518	0.66

ตารางที่ ค-1 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 4.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
0.8299	3.5189	1.01
1.1166	2.6456	1.30
8.7785	3.2386	4.49
0.7887	3.8515	0.95
1.2177	11.0434	0.96
1.6791	3.2242	1.60
1.0453	3.4177	1.17
0.7143	3.2215	0.94
2.4577	3.9820	1.92
0.4781	4.6107	0.67

ตารางที่ ค-2 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 8.0 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
0.9845	3.9064	1.09
0.6956	3.5391	0.90
1.3339	4.1055	1.30
1.0031	3.6073	1.13
1.2655	3.9894	1.27
0.6864	4.8314	0.83



ตารางที่ ค-2 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 8.0 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.0198	3.6079	1.14
0.2114	3.2421	0.44
1.0420	3.6637	1.15
0.5946	2.8038	0.87
0.1530	2.7694	0.37
1.2526	4.0409	1.26
1.5017	4.3495	1.38
0.9084	4.5232	1.00
0.9110	3.4390	1.07
2.4777	7.7325	1.64
0.9356	3.4761	1.09
2.2175	5.9751	1.63
0.1359	2.6714	0.35
2.4910	7.4132	1.66
1.6407	4.5552	1.45
1.1320	4.7103	1.14
2.0916	5.6943	1.59
2.5195	5.9186	1.77
1.0899	3.7013	1.18
1.3652	4.2036	1.31
1.7949	4.8638	1.50
1.9111	4.9394	1.56

ตารางที่ ค-2 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 8.0 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.0772	3.6928	1.17
1.0166	3.8305	1.12
1.1561	4.7109	1.15
1.3648	4.3480	1.30
0.3672	3.4662	0.61
0.5778	2.6994	0.86
1.2139	3.9254	1.24
1.0006	3.5801	1.13
1.7858	4.8257	1.50
1.6041	4.7899	1.41
0.2994	2.1756	0.60
1.1040	3.7764	1.18
1.4405	4.3807	1.35
1.2847	4.0792	1.28
1.0287	3.7744	1.13
1.4943	4.3850	1.38
0.0021	0.3260	0.04
2.4650	6.6181	1.70
2.6730	5.9424	1.84
0.2298	3.2001	0.46
1.3128	4.1044	1.29
1.0772	3.6928	1.17

ตารางที่ ค-3 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 15.5 เซนติเมตร (ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.5713	4.4676	1.41
1.3127	5.4699	1.20
1.5696	4.4939	1.41
0.8594	3.3683	1.04
1.7345	4.6694	1.49
0.0309	2.2382	0.14
1.0100	3.5637	1.14
0.9781	3.7146	1.10
1.2829	4.0152	1.28
1.0817	3.6892	1.17
1.4152	4.2618	1.34
0.5562	3.4708	0.79
1.2070	3.9379	1.24
0.8483	3.2738	1.04
1.0211	3.7507	1.13
1.1718	3.8374	1.22
1.3597	4.1338	1.32
1.1213	3.7681	1.20
1.3989	4.3627	1.32
0.7835	3.7557	0.96
1.9059	4.9132	1.56
0.8967	3.3611	1.07

ตารางที่ ค-3 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 15.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.1527	3.9129	1.20
1.4650	4.3475	1.36
0.9226	4.2699	1.03
1.6455	4.7790	1.43
2.2460	5.3235	1.69
0.9173	3.8257	1.05
0.5153	2.5494	0.81
1.3713	4.2398	1.32
1.6599	4.6178	1.45
0.8716	3.3417	1.05
0.8984	3.3743	1.07
1.5391	4.4574	1.40
1.4448	4.4331	1.34
0.6455	2.8490	0.91
0.4321	3.4734	0.67
1.8032	4.7603	1.52
1.2630	3.9871	1.27
1.0942	3.7155	1.18
0.6029	3.9042	0.80
1.3245	4.0833	1.30
1.2592	3.9875	1.27
0.6294	3.5926	0.84

ตารางที่ ค-3 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 15.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
2.3211	5.5416	1.71
1.3767	4.2020	1.32
1.8076	4.8654	1.51
0.7887	3.2482	1.00
0.9683	4.1961	1.06
0.7302	3.2002	0.95
2.3211	5.5416	1.71
1.3767	4.2020	1.32
1.8076	4.8654	1.51
0.7887	3.2482	1.00

ตารางที่ ค-4 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 4.4 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
2.9044	6.1262	1.92
3.9101	7.3055	2.21
1.8427	4.8121	1.53
1.9668	4.9715	1.58
1.6638	5.4505	1.39
1.3269	4.3236	1.28

ตารางที่ ค-4 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 4.4 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
2.3948	5.5020	1.75
0.1825	2.4331	0.43
3.6027	6.7577	2.14
1.0579	3.6499	1.16
2.1274	5.3975	1.63
0.2494	3.6289	0.47
1.0524	3.6871	1.15
2.2924	5.3672	1.71
1.7512	4.6912	1.49
1.1902	4.9845	1.16
1.7889	4.7593	1.51
2.2936	5.3847	1.71
1.6884	4.6065	1.47
2.0827	5.3619	1.61
2.1922	5.7894	1.63
0.5344	2.7742	0.81
2.8458	6.2556	1.88
0.0151	4.3104	0.08
1.2728	4.5087	1.24
1.4593	4.3014	1.36
0.7013	4.0131	0.88
1.3572	4.2730	1.30

ตารางที่ ค-4 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 4.4 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.0428	4.4933	1.09
1.8839	5.1453	1.53
1.6436	5.0590	1.41
1.1991	4.7036	1.18
2.5403	5.6600	1.80
1.8176	4.8129	1.52
0.9061	4.4963	1.00
0.5780	2.7592	0.85
3.2042	6.3948	2.02
2.8629	6.0127	1.91
2.6858	5.8095	1.85
3.8873	7.0033	2.23
3.1348	6.3168	2.00
0.8584	3.7582	1.01
3.7408	6.9621	2.18
2.8986	6.0589	1.92
0.8049	3.2983	1.00
3.2637	6.4115	2.04
1.5657	4.6014	1.40
3.5634	7.0258	2.11
4.4389	12.5517	2.09
1.0428	4.4933	1.09

ตารางที่ ค-5 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 8.0 เซนติเมตร (ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
2.4684	5.5768	1.77
0.8942	3.4751	1.06
2.2969	5.4541	1.71
1.2946	4.2648	1.27
2.4696	5.6483	1.77
1.1462	6.1583	1.07
2.1804	5.3245	1.66
5.1924	8.0783	2.57
2.7609	5.9128	1.88
2.2730	5.6030	1.68
1.5421	4.4626	1.40
2.2532	8.0261	1.53
2.2858	5.3599	1.71
0.5097	2.5335	0.81
1.5971	4.4827	1.43
3.3425	9.0990	1.90
1.9339	4.9579	1.57
2.7040	10.6596	1.60
2.5011	5.6220	1.79
1.7575	5.1169	1.47
2.8873	6.0422	1.92
0.3278	2.0305	0.65



ตารางที่ ค-5 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 8.0 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
3.1271	6.3957	1.99
0.4926	3.5556	0.73
1.8717	4.8520	1.55
5.5012	13.1535	2.36
1.6063	4.5128	1.43
2.5804	5.7607	1.81
2.8813	6.0173	1.92
1.1073	4.1924	1.15
1.6571	4.6703	1.45
4.1667	9.2121	2.17
2.4511	5.5840	1.77
1.5392	4.4761	1.40
1.0119	3.9448	1.11
3.7472	16.3913	1.76
2.5489	5.7599	1.80
6.0507	13.2018	2.50
2.7389	6.1292	1.85
1.3065	7.5798	1.10
2.9625	6.1821	1.94
2.5199	9.9339	1.56
3.1966	6.4538	2.01
1.7120	4.6806	1.47

ตารางที่ ค-5 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 8.5 เซนติเมตร (ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
2.2008	5.2952	1.67
2.4487	5.5591	1.77
2.7931	5.9283	1.89
3.8490	7.4477	2.18
2.3865	5.6801	1.73
1.6650	5.8720	1.37
2.2008	5.2952	1.67
2.4487	5.5591	1.77
2.7931	5.9283	1.89
3.8490	7.4477	2.18

ตารางที่ ค-6 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 15.5 เซนติเมตร (ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.4876	4.4606	1.37
1.1933	3.9840	1.23
2.6581	6.2821	1.80
1.7020	6.7520	1.34
2.5162	6.2846	1.74
1.7043	4.7343	1.47

ตารางที่ ค-6 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 15.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.4382	6.6630	1.21
0.6904	4.1944	0.86
3.8412	6.9864	2.21
0.1091	1.1748	0.37
3.5236	6.7748	2.11
0.7357	3.2591	0.95
6.0426	8.7149	2.78
1.9469	4.9773	1.57
3.1719	6.3270	2.01
2.2478	5.3643	1.69
0.8675	5.6451	0.92
3.2200	6.5972	2.01
1.1544	4.1290	1.19
2.3510	5.8785	1.70
2.9343	6.2021	1.92
1.4085	4.7849	1.30
2.3243	5.5697	1.71
0.7271	3.9482	0.90
4.3356	7.4322	2.35
0.2732	5.4402	0.45
1.0799	5.8512	1.05
1.0193	4.1650	1.10

ตารางที่ ค-6 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 15.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
2.2314	5.6393	1.66
1.8542	4.9397	1.53
0.5999	3.1817	0.84
0.4682	2.6743	0.75
2.5255	5.6683	1.79
2.3785	7.1485	1.63
1.1688	4.1700	1.20
1.2599	4.0153	1.27
1.5130	4.7105	1.36
2.9641	6.1189	1.94
1.1540	4.4335	1.17
2.7689	5.8988	1.88
0.9283	4.5060	1.02
1.8351	6.2582	1.43
2.5320	7.1942	1.69
1.7661	4.8186	1.49
2.4664	5.7288	1.76
1.6904	4.8063	1.45
1.6476	4.6869	1.44
2.6523	5.7754	1.84
5.6071	8.3963	2.67
2.2314	5.6393	1.66

ตารางที่ ค-7 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 4.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
1.9387	5.0037	1.57
14.0103	13.6769	4.20
7.4122	10.7903	2.99
3.5470	8.1608	2.02
3.9151	7.0379	2.23
1.8883	4.8783	1.55
6.9270	10.8649	2.86
2.5183	7.1000	1.69
4.9346	8.3553	2.47
3.1243	7.6042	1.90
2.7452	5.8770	1.87
7.8946	10.5530	3.13
2.3784	5.4683	1.74
5.7749	9.4558	2.64
4.8875	8.9189	2.42
3.6143	6.8067	2.14
3.0231	6.1960	1.96
4.4325	8.2460	2.32
2.8831	6.0587	1.91
11.9307	19.9015	3.46
1.8492	5.0701	1.52
4.4309	8.5637	2.30

ตารางที่ ค-7 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 4.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
3.2745	6.4217	2.04
2.1000	5.1485	1.64
2.3771	5.5303	1.74
1.7047	4.7349	1.47
3.6932	7.7474	2.10
3.5635	8.3443	2.02
4.0203	7.9163	2.20
4.6623	9.1361	2.33
1.7845	4.7357	1.51
9.5286	14.0072	3.28
2.4190	5.5905	1.75
8.8368	11.3838	3.29
3.3702	6.5095	2.07
4.5496	8.4158	2.35
6.0036	10.5560	2.64
4.0549	10.0451	2.09
3.3303	6.4920	2.06
1.2050	3.8947	1.24
1.8659	4.9789	1.53
12.1823	13.4737	3.86
3.6856	6.9234	2.16
3.1880	7.1080	1.96

ตารางที่ ค-7 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 4.5 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
2.3696	5.4781	1.74
15.6139	15.3097	4.37
7.7360	12.6582	2.95
1.7974	4.7833	1.51
2.0285	5.1482	1.60
4.5956	10.9122	2.21

ตารางที่ ค-8 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 8.0 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
4.4078	7.6650	2.35
7.0042	9.8842	2.95
3.8943	7.0128	2.23
7.1798	11.3754	2.89
5.9644	8.6599	2.76
3.1306	6.8859	1.95
4.9666	8.0537	2.51
14.6735	14.6429	4.25
4.9748	7.9384	2.52
12.1502	14.9722	3.75

ตารางที่ ค-8 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 8.0 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
4.4632	7.6973	2.37
0.7697	3.2609	0.98
2.8627	5.9981	1.91
3.1406	6.3840	1.99
2.6429	6.7753	1.76
3.0886	6.6100	1.96
4.6905	11.7009	2.20
4.9676	7.9319	2.52
4.8200	7.7828	2.48
2.9644	6.1079	1.94
5.0660	8.0313	2.54
4.9409	7.9690	2.50
3.5751	6.7290	2.13
0.5443	3.2822	0.79
4.0859	7.1682	2.28
5.0567	11.6164	2.31
5.4423	8.3076	2.63
2.5074	6.8761	1.70
3.6300	6.8379	2.15
3.2338	6.3748	2.03
3.8936	7.0819	2.22
2.9192	7.7040	1.82



ตารางที่ ค-8 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 8.0 เซนติเมตร(ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
7.2362	15.8947	2.67
4.7985	7.8758	2.47
4.8263	8.0997	2.46
6.3631	8.9584	2.85
2.8385	6.0532	1.90
6.7363	9.3715	2.92
3.5252	6.6799	2.12
7.6341	9.8034	3.12
2.7690	6.0287	1.87
5.4426	8.6680	2.60
3.1949	6.4589	2.01
8.4159	10.2949	3.28
1.5666	5.3272	1.35
5.0089	7.9348	2.53
7.4447	11.0980	2.98
7.6085	9.8576	3.11
6.4857	9.0298	2.88

ตารางที่ ค-9 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 15.5 เซนติเมตร (ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
7.6503	10.0672	3.10
2.0184	5.0374	1.60
9.3000	10.9086	3.44
0.4443	3.2878	0.69
9.2649	11.0080	3.42
0.5843	2.8649	0.85
7.7773	9.9904	3.14
2.2784	7.6939	1.56
6.1241	8.8090	2.79
14.4529	13.7472	4.27
4.5475	8.0941	2.37
4.4779	7.5116	2.39
4.9956	8.1986	2.50
4.6011	8.1429	2.38
7.9820	10.0703	3.19
2.1744	5.4740	1.65
5.2175	8.2518	2.57
12.1448	13.2481	3.87
8.3148	10.3455	3.25
0.4934	3.2484	0.74
5.7339	8.5373	2.70
5.2254	15.9099	2.18

ตารางที่ ค-9 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 15.5 เซนติเมตร (ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
7.4104	10.0320	3.05
3.3422	7.4372	2.00
3.8440	7.4712	2.18
9.9301	12.1178	3.49
3.6577	7.1301	2.13
11.4619	13.3577	3.72
3.8193	6.9378	2.21
5.8313	8.5666	2.73
5.2919	8.2822	2.59
4.8950	8.9830	2.42
1.3091	5.1065	1.22
5.9538	8.6779	2.75
6.6489	9.1540	2.91
2.3130	5.8844	1.68
8.9343	10.6078	3.38
0.4739	3.0692	0.73
7.4728	10.1621	3.05
0.5570	2.6670	0.84
6.7630	9.2289	2.94
21.2862	19.0093	5.02
5.5387	8.4890	2.65
5.0469	7.9688	2.54

ตารางที่ ค-9 ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศที่ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ 15.5 เซนติเมตร (ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) (ต่อ)

พารามิเตอร์		
พื้นที่ฟองอากาศ (ตารางมิลลิเมตร)	เส้นรอบรูปของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
5.1478	8.0528	2.56
3.3689	8.2292	1.96
2.0730	6.9893	1.50
10.3303	11.9340	3.59
3.5275	7.1693	2.08
3.4609	6.7332	2.09

ตารางที่ ค-10 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_y$ )

ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (เซนติเมตรต่อวินาที)								
ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์			ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์			ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์		
ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ	ระดับน้ำ
4.5 ซม.	8.0 ซม.	15.5 ซม.	4.5 ซม.	8.0 ซม.	15.5 ซม.	4.5 ซม.	8.0 ซม.	15.5 ซม.
10.5	14.0	17.6	16.5	18.3	20.0	12.5	18.2	22.5
8.1	14.5	15.9	21.7	19.9	19.8	20.7	22.7	19.3
12.2	5.1	15.5	17.8	18.0	20.3	28.0	21.2	29.4
12.7	15.8	17.8	22.4	20.1	20.9	25.3	20.3	21.5
12.5	14.2	15.7	19.8	13.1	16.6	14.9	25.0	30.8
17.6	18.1	19.0	19.8	18.2	9.7	24.1	22.4	27.4
12.7	11.1	15.5	16.9	10.6	20.0	12.5	22.3	27.3
8.2	15.5	19.6	15.9	17.3	19.8	20.7	24.7	24.9

ตารางที่ ค-10 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_y$ ) (ต่อ)

ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (เซนติเมตรต่อวินาที)								
ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์			ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์			ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์		
ระดับน้ำ 4.5 ซม.	ระดับน้ำ 8.0 ซม.	ระดับน้ำ 15.5 ซม.	ระดับน้ำ 4.5 ซม.	ระดับน้ำ 8.0 ซม.	ระดับน้ำ 15.5 ซม.	ระดับน้ำ 4.5 ซม.	ระดับน้ำ 8.0 ซม.	ระดับน้ำ 15.5 ซม.
9.3	14.0	19.8	19.0	18.6	18.9	24.0	22.3	17.8
10.8	13.6	16.7	20.4	17.1	21.0	24.6	20.2	27.5
13.5	11.1	19.9	18.6	19.1	21.5	24.1	24.3	27.3
10.4	8.8	19.1	14.0	17.5	22.4	23.0	21.4	24.6
12.0	21.7	19.2	18.0	14.5	17.8	24.0	21.9	44.3
8.1	16.3	13.8	18.9	18.1	18.7	22.8	21.0	29.9
14.1	17.2	19.6	19.1	17.9	17.7	25.5	28.6	33.9
15.5	9.1	17.5	23.5	14.4	19.0	21.2	26.9	32.4
9.7	12.5	12.2	22.4	18.0	19.7	19.4	28.1	28.6
12.3	12.9	14.7	16.2	22.9	21.3	16.1	22.6	27.7
17.5	19.1	16.9	23.2	21.4	21.0	17.8	21.7	22.8
8.8	14.6	12.3	18.2	19.3	20.0	20.7	20.7	24.9
14.4	14.8	17.2	22.6	18.8	15.0	22.5	21.8	21.5
10.5	17.5	18.8	13.9	17.2	21.1	22.1	24.3	36.3
10.3	17.4	15.8	16.6	19.7	22.8	15.1	23.3	25.6
17.5	9.3	13.0	15.4	16.3	17.5	13.2	24.6	24.1
10.4	22.7	15.9	14.6	17.9	20.1	18.4	20.8	33.4
11.3	16.3	12.7	15.1	18.1	22.0	20.1	22.7	19.4
19.5	15.7	16.3	20.7	17.2	17.1	19.1	21.9	24.9
14.3	11.1	19.4	18.2	17.5	23.9	25.4	19.8	24.6
15.0	12.8	12.8	17.2	24.4	19.6	25.6	26.5	17.3
12.4	18.9	13.5	21.5	19.1	27.4	11.3	21.3	21.9
10.1	15.5	19.7	18.0	17.6	17.7	20.7	28.9	26.3
15.1	10.2	17.9	14.8	18.6	17.3	17.3	19.1	38.9
12.1	17.2	20.2	24.3	20.0	19.7	20.8	30.4	20.7

ตารางที่ ค-10 ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ ( $U_y$ ) (ต่อ)

ความเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ (เซนติเมตรต่อวินาที)								
ความดันในเส้นท่อ 0.3 บาร์			ความดันในเส้นท่อ 0.5 บาร์			ความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์		
ระดับน้ำ 4.5 ซม.	ระดับน้ำ 8.0 ซม.	ระดับน้ำ 15.5 ซม.	ระดับน้ำ 4.5 ซม.	ระดับน้ำ 8.0 ซม.	ระดับน้ำ 15.5 ซม.	ระดับน้ำ 4.5 ซม.	ระดับน้ำ 8.0 ซม.	ระดับน้ำ 15.5 ซม.
14.1	17.2	14.0	9.5	20.7	17.8	15.7	21.3	20.1
13.6	17.2	19.6	11.5	19.8	17.2	27.1	24.7	44.8
14.8	22.0	14.6	23.4	18.0	16.4	20.4	21.0	28.2
18.8	15.2	13.9	17.5	21.2	19.2	22.8	23.9	30.1
15.9	15.1	18.9	15.5	19.7	17.0	28.2	21.4	22.8
11.5	21.0	11.8	14.4	19.8	22.6	28.7	18.7	20.3
14.7	16.4	14.4	18.6	17.0	21.5	17.1	17.9	18.2
11.2	14.5	17.2	19.8	19.3	17.3	26.1	21.6	23.8
23.0	12.1	14.5	19.4	16.0	17.9	35.1	33.2	27.5
8.4	20.1	12.8	19.0	22.0	16.6	20.6	20.1	23.0
10.6	16.5	17.4	16.6	20.4	27.4	23.7	25.6	31.6
10.3	10.0	18.1	19.8	17.5	17.9	22.7	25.0	23.8
8.9	16.3	14.1	17.1	21.4	20.3	23.5	23.9	26.0
13.1	11.4	13.6	16.4	19.9	13.8	20.0	23.1	22.2
9.6	13.6	18.2	27.7	21.4	17.3	22.8	22.4	28.5
16.4	13.3	16.6	16.4	17.4	20.7	22.6	23.6	30.8
11.2	12.7	16.2	12.6	20.2	13.2	20.0	22.9	31.3

จากการวัดอัตราการไหลของอากาศ สามารถคำนวณค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ (Velocity gradient, G) ได้ดังต่อไปนี้

จากตารางที่ 4-9 ผลการวัดปริมาตรอัตราการไหลของความดันในเส้นท่อ 1.0 บาร์ ที่ระดับน้ำในถังปฏิกรณ์ (ระดับน้ำจากจุดกึ่งกลางของเซรามิคเมมเบรน) 15.5 เซนติเมตร

อัตราการไหลของอากาศ ( $Q_a$ )	$30 \times 10^{-3}$	ลูกบาศก์เมตรต่อนาที
ปริมาตรน้ำ (V)	$15.0 \times 10^{-3}$	ลูกบาศก์เมตร
ค่าคงที่ (K)	1.689	
ความหนืดของของเหลวตัวกลาง ( $\mu$ )	$1.139 \times 10^{-3}$	กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที
ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศถึงผิวน้ำ (h)	0.219	เมตร

สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_c = KQ \ln \frac{h + 10.33}{10.33}$$

$$P_c = 1.689 \times (30 \times 10^{-3}) \times \ln \frac{(0.219) + 10.33}{10.33}$$

$$P_c = 1.069 \times 10^{-3} \text{ kW}$$

$$P_c = 1.069 \text{ W}$$

$$G = \sqrt{\frac{P_c}{\mu V}}$$

$$G = \sqrt{\frac{0.694}{(1.139 \times 10^{-3}) \times (15.0 \times 10^{-3})}}$$

$$G = 250.13 \text{ s}^{-1}$$

จะได้ค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจากฟองอากาศ เท่ากับ 250.13 ต่อวินาที





ตารางที่ ง-1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ลำดับ	ขนาดช่องตะแกรง	ปริมาณอนุภาค (%)	
		ดินปนเปื้อน	เบนโทไนท์
1	2.8 มิลลิเมตร	18.35	0.72
2	2 มิลลิเมตร	17.41	0.30
3	1.7 มิลลิเมตร	9.99	8.65
4	1.18 มิลลิเมตร	18.03	6.39
5	1 มิลลิเมตร	8.67	21.84
6	0.3 ไมครอน	24.51	56.38
7	0.18 ไมครอน	3.04	5.73

ตารางที่ ง-2 ผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ

เวลา (min)		ความดัน (Bar)		อัตราการไหล (LPM)	ค่าเพอร์มิทพลักซ์ ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$ )	ค่าความต้านทานรวม, $R_t$ ( $\times 10^{10}\text{m}^{-1}$ )	ประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น (NTU)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย				
0	10	0	0.2	0.1750	5.83333E-06	342.1727973	99.59
10	20	0.2	0.3	0.1750	5.83333E-06	513.2591959	99.21
20	30	0.2	0.3	0.1750	5.83333E-06	513.2591959	99.11
30	40	0.2	0.3	0.1750	5.83333E-06	513.2591959	98.93
40	50	0.3	0.4	0.1750	5.83333E-06	684.3455945	98.85
50	60	0.3	0.4	0.1750	5.83333E-06	684.3455945	98.31
60	70	0.3	0.4	0.1600	5.33333E-06	748.502994	98.24
70	80	0.3	0.4	0.1600	5.33333E-06	748.502994	97.97
80	90	0.3	0.4	0.1550	5.16667E-06	772.6482519	97.94
90	100	0.3	0.4	0.1650	0.0000055	725.8210851	98.84
100	110	0.1	0.2	0.1550	5.16667E-06	386.3241259	97.91
110	120	0.1	0.2	0.1550	5.16667E-06	386.3241259	99.59

ตารางที่ ง-2 ผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 1.67 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ  
(ต่อ)

เวลา (min)		ความดัน (Bar)		อัตราการไหล (LPM)	ค่าเพอร์มิทฟลักซ์ ( $m^3/m^2.s$ )	ค่าความต้านทานรวม, $R_t (x10^{10}m^{-1})$	ประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น (NTU)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย				
120	130	0.1	0.4	0.1525	5.08333E-06	785.3146167	97.56
130	140	0.2	0.4	0.1475	4.91667E-06	811.9354511	96.78
140	150	0.2	0.4	0.1575	0.00000525	760.3839939	96.00
150	160	0.1	0.2	0.1525	5.08333E-06	392.6573083	97.91
160	170	0.1	0.2	0.1525	5.08333E-06	392.6573083	97.18
170	180	0.1	0.2	0.1525	5.08333E-06	392.6573083	97.40
180	190	0.2	0.3	0.1500	0.000005	598.8023952	97.81
190	200	0.2	0.3	0.1550	5.16667E-06	579.4861889	96.43
200	210	0.2	0.3	0.1550	5.16667E-06	579.4861889	97.53
210	220	0.2	0.3	0.1525	5.08333E-06	588.9859625	98.06
220	230	0.23	0.3	0.1525	5.08333E-06	588.9859625	97.18
230	240	0.25	0.3	0.1500	0.000005	598.8023952	96.97
240	250	0.3	0.4	0.1525	5.08333E-06	785.3146167	96.92
250	260	0.25	0.3	0.1500	0.000005	598.8023952	97.90
260	270	0.3	0.4	0.1475	4.91667E-06	811.9354511	96.59
270	280	0.3	0.4	0.1475	4.91667E-06	811.9354511	96.23
280	290	0.2	0.3	0.1475	4.91667E-06	608.9515883	97.50
290	300	0.3	0.4	0.1500	0.000005	798.4031936	96.54
300	310	0.3	0.4	0.1475	4.91667E-06	811.9354511	97.33
310	320	0.3	0.4	0.1475	4.91667E-06	811.9354511	97.00
320	330	0.3	0.4	0.1450	4.83333E-06	825.9343382	97.38
330	340	0.3	0.4	0.1375	4.58333E-06	870.9853021	97.51
340	350	0.3	0.4	0.1375	4.58333E-06	870.9853021	97.30

ตารางที่ ง-3 ผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 2.5 กรัมเบโทไนท์/ ลิตรของน้ำ

เวลา (min)		ความดัน (Bar)		อัตราการไหล (LPM)	ค่าเพอร์มิทฟลักซ์ ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$ )	ค่าความต้านทานรวม, $R_t$ ( $\times 10^{10} \text{m}^{-1}$ )	ประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น (NTU)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย				
0	10	0	0.2	0.1750	5.833E-06	342.172797	99.66
10	20	0.2	0.3	0.1750	5.833E-06	513.259196	98.59
20	30	0.2	0.3	0.1550	5.167E-06	579.486189	98.20
30	40	0.2	0.3	0.1500	0.000005	598.802395	98.57
40	50	0.2	0.3	0.1650	0.0000055	544.365814	98.10
50	60	0.2	0.3	0.1600	5.333E-06	561.377246	97.75
60	70	0.2	0.4	0.1600	5.333E-06	748.502994	97.77
70	80	0.2	0.4	0.1450	4.833E-06	825.934338	97.11
80	90	0.2	0.4	0.1400	4.667E-06	855.431993	96.89
90	100	0.2	0.4	0.1550	5.167E-06	772.648252	98.52
100	110	0.1	0.3	0.1500	0.000005	598.802395	97.89
110	120	0.1	0.3	0.1500	0.000005	598.802395	97.47
120	130	0.2	0.4	0.1450	4.833E-06	825.934338	97.08
130	140	0.2	0.4	0.1400	4.667E-06	855.431993	97.83
140	150	0.2	0.4	0.1425	4.75E-06	840.424414	98.11
150	160	0.2	0.3	0.1400	4.667E-06	641.573995	97.48
160	170	0.25	0.3	0.1350	0.0000045	665.335995	97.15
170	180	0.3	0.4	0.1325	4.417E-06	903.852672	97.31
180	190	0.3	0.4	0.1325	4.417E-06	903.852672	97.05
190	200	0.3	0.35	0.1375	4.583E-06	762.112139	96.92
200	210	0.3	0.4	0.1350	0.0000045	887.11466	97.71
210	220	0.3	0.4	0.1350	0.0000045	887.11466	97.18
220	230	0.3	0.4	0.1325	4.417E-06	903.852672	95.74

ตารางที่ ง-3 ผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 2.5 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ (ต่อ)

เวลา (min)		ความดัน (Bar)		อัตราการไหล (LPM)	ค่าเพอร์มิท ฟลักซ์ ( $m^3/m^2.s$ )	ค่าความ ต้านทานรวม, $R_t (\times 10^{10} m^{-1})$	ประสิทธิภาพ กำจัดความ ขุ่น (NTU)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย				
230	240	0.4	0.5	0.1275	4.25E-06	1174.12234	95.77
240	250	0.3	0.4	0.1350	0.0000045	887.11466	95.64
250	260	0.3	0.4	0.1300	4.333E-06	921.234454	95.68
260	270	0.3	0.4	0.1300	4.333E-06	921.234454	95.57
270	280	0.3	0.4	0.1275	4.25E-06	939.297875	95.39
280	290	0.3	0.5	0.1300	4.333E-06	1151.54307	95.46
290	300	0.3	0.5	0.1350	0.0000045	1108.89332	94.85
300	310	0.3	0.5	0.1375	4.583E-06	1088.73163	94.47
310	320	0.3	0.5	0.1275	4.25E-06	1174.12234	95.28
320	330	0.3	0.5	0.1275	4.25E-06	1174.12234	95.66
330	340	0.3	0.5	0.1275	4.25E-06	1174.12234	95.32
340	350	0.3	0.5	0.1275	4.25E-06	1174.12234	93.84

ตารางที่ ง-4 ผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ

เวลา (min)		ความดัน (Bar)		อัตราการไหล (LPM)	ค่าเพอร์มิท ฟลักซ์ ( $m^3/m^2.s$ )	ค่าความ ต้านทานรวม, $R_t (\times 10^{10} m^{-1})$	ประสิทธิภาพ กำจัดความ ขุ่น (NTU)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย				
0	10	0	0.2	0.1750	5.83333E-06	342.172797	99.63
10	20	0.1	0.25	0.1600	5.33333E-06	467.814371	99.02
20	30	0.15	0.25	0.1550	5.16667E-06	482.905157	99.09
30	40	0.2	0.25	0.1525	5.08333E-06	490.821635	98.58
40	50	0.2	0.3	0.1550	5.16667E-06	579.486189	98.50
50	60	0.2	0.3	0.1425	0.00000475	630.318311	98.47

ตารางที่ ง-4 ผลการทำงานของเซรามิกเมมเบรน ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ  
(ต่อ)

เวลา (min)		ความดัน (Bar)		อัตราการไหล (LPM)	ค่าเพอร์มิทฟลักซ์ ( $m^3/m^2.s$ )	ค่าความต้านทานรวม, $R_t$ ( $\times 10^{10} m^{-1}$ )	ประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น (NTU)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย				
60	70	0.25	0.3	0.1450	4.83333E-06	619.450754	97.70
70	80	0.25	0.3	0.1400	4.66667E-06	641.573995	97.77
80	90	0.25	0.3	0.1400	4.66667E-06	641.573995	97.92
90	100	0.2	0.3	0.1450	4.83333E-06	619.450754	98.02
100	110	0.2	0.3	0.1375	4.58333E-06	653.238977	97.72
110	120	0.3	0.4	0.1325	4.41667E-06	903.852672	97.60
120	130	0.3	0.5	0.1300	4.33333E-06	1151.54307	96.90
130	140	0.4	0.5	0.1250	4.16667E-06	1197.60479	96.10
140	150	0.5	0.6	0.1375	4.58333E-06	1306.47795	97.09
150	160	0.5	0.6	0.1350	0.0000045	1330.67199	97.14
160	170	0.5	0.6	0.1325	4.41667E-06	1355.77901	95.97
170	180	0.5	0.6	0.1325	4.41667E-06	1355.77901	96.42
180	190	0.5	0.6	0.1300	4.33333E-06	1381.85168	95.82
190	200	0.5	0.6	0.1325	4.41667E-06	1355.77901	96.83
200	210	0.5	0.6	0.1300	4.33333E-06	1381.85168	98.87
210	220	0.5	0.6	0.1275	0.00000425	1408.94681	99.05
220	230	0.5	0.6	0.1250	4.16667E-06	1437.12575	96.66
230	240	0.5	0.6	0.1250	4.16667E-06	1437.12575	91.32
240	250	0.4	0.6	0.1350	0.0000045	1330.67199	96.76
250	260	0.5	0.6	0.1325	4.41667E-06	1355.77901	97.14
260	270	0.5	0.6	0.1275	0.00000425	1408.94681	97.45
270	280	0.5	0.6	0.1250	4.16667E-06	1437.12575	98.76
280	290	0.5	0.6	0.1200	0.000004	1497.00599	90.24

ตารางที่ ง-4 ผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนท์/ ลิตรของน้ำ (ต่อ)

เวลา (min)		ความดัน (Bar)		อัตราการไหล (LPM)	ค่าเพอร์มิท ฟลักซ์ ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$ )	ค่าความ ต้านทานรวม, $R_t (\times 10^{10} \text{m}^{-1})$	ประสิทธิภาพ กำจัดความ ขุ่น (NTU)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย				
290	300	0.4	0.6	0.1275	0.00000425	1408.94681	92.12
300	310	0.5	0.6	0.1225	4.08333E-06	1466.45485	93.42
310	320	0.5	0.6	0.1200	4.08333E-06	1466.45485	91.23
320	330	0.5	0.6	0.1225	4.08333E-06	1466.45485	94.72
330	340	0.5	0.6	0.1200	0.000004	1497.00599	93.52
340	350	0.5	0.6	0.1200	0.000004	1497.00599	91.43

ตารางที่ ง-5 ผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 100 กรัมดินปนเปื้อน/ ลิตรของน้ำ (ต่อ)

เวลา (min)		ความดัน (Bar)		อัตราการ ไหล (LPM)	ค่าเพอร์มิท ฟลักซ์ ( $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{s}$ )	ค่าความ ต้านทานรวม, $R_t (\times 10^{10} \text{m}^{-1})$	ประสิทธิภาพ กำจัดความ ขุ่น (NTU)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย				
0	10	0	0.2	0.1750	5.83333E-06	342.1727973	99.85
10	20	0.1	0.3	0.1750	5.83333E-06	513.2591959	99.55
20	30	0.2	0.3	0.1750	5.83333E-06	513.2591959	99.37
30	40	0.2	0.3	0.1750	5.83333E-06	513.2591959	98.95
40	50	0.2	0.3	0.1750	5.83333E-06	513.2591959	98.55
50	60	0.2	0.3	0.1650	0.0000055	544.3658138	98.14
60	70	0.2	0.3	0.1600	5.33333E-06	561.3772455	98.39
70	80	0.2	0.3	0.1600	5.33333E-06	561.3772455	98.15
80	90	0.2	0.3	0.1450	4.83333E-06	619.4507537	98.18
90	100	0.2	0.3	0.1550	5.16667E-06	579.4861889	98.78
100	110	0.2	0.3	0.1550	5.16667E-06	579.4861889	98.49
110	120	0.2	0.3	0.1525	5.08333E-06	588.9859625	98.52

ตารางที่ ง-5 ผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 100 กรัมดินปนเปื้อน/ ลิตรของน้ำ  
(ต่อ)

เวลา (min)		ความดัน (Bar)		อัตราการไหล (LPM)	ค่าเพอร์มิทฟลักซ์ ( $m^3/m^2.s$ )	ค่าความต้านทานรวม, $R_t$ ( $\times 10^{10} m^{-1}$ )	ประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น (NTU)
เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย				
120	130	0.2	0.3	0.1525	5.08333E-06	588.9859625	98.50
130	140	0.2	0.3	0.1525	5.08333E-06	588.9859625	98.44
140	150	0.2	0.3	0.1550	5.16667E-06	579.4861889	98.35
150	160	0.1	0.25	0.1525	5.08333E-06	490.8216354	98.20
160	170	0.1	0.2	0.1500	0.000005	399.2015968	98.36
170	180	0.1	0.3	0.1475	4.91667E-06	608.9515883	98.17
180	190	0.2	0.3	0.1450	4.83333E-06	619.4507537	98.41
190	200	0.2	0.3	0.1475	4.91667E-06	608.9515883	98.46
200	210	0.2	0.3	0.1425	0.00000475	630.3183107	98.14
210	220	0.2	0.3	0.1425	0.00000475	630.3183107	98.14
220	230	0.2	0.3	0.1425	0.00000475	630.3183107	98.25
230	240	0.2	0.3	0.1400	4.66667E-06	641.5739949	98.36
240	250	0.2	0.3	0.1450	4.83333E-06	619.4507537	97.94
250	260	0.3	0.4	0.1450	4.83333E-06	825.9343382	97.67
260	270	0.3	0.4	0.1400	4.66667E-06	855.4319932	97.71
270	280	0.3	0.4	0.1375	4.58333E-06	870.9853021	97.63
280	290	0.3	0.4	0.1350	0.0000045	887.1146596	97.42
290	300	0.3	0.4	0.1350	0.0000045	887.1146596	97.13
300	310	0.3	0.4	0.1300	4.33333E-06	921.2344542	96.95
310	320	0.3	0.4	0.1300	4.33333E-06	921.2344542	97.56
320	330	0.3	0.4	0.1300	4.33333E-06	921.2344542	97.27
330	340	0.3	0.4	0.1300	4.33333E-06	921.2344542	96.65
340	350	0.3	0.4	0.1300	4.33333E-06	921.2344542	95.96

จากผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน สามารถคำนวณค่าความต้านทานต่าง ๆ ) ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ ง-5 ผลการทำงานของเซรามิคเมมเบรน ความเข้มข้น 3.33 กรัมเบนโทไนด์/ ลิตรของน้ำ

อัตราการไหลของน้ำ (Q)	0.1750	ลิตรต่อนาที
พื้นที่หน้าตัดของเซรามิคเมมเบรน (A)	0.5	ตารางเมตร
ความดันในเส้นท่อผ่านเซรามิคเมมเบรน (P)	0.2	บาร์
ค่าความต้านทานสูงสุดที่ยอมรับได้ ( $R_{m(max)}$ )	$4.60 \times 10^{13}$	เมตร <sup>-1</sup>

สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. ฟลักซ์การกรอง (J)

$$J = \frac{Q}{A}$$

$$J = \frac{0.1750 \text{ L/min}}{0.5 \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}$$

$$J = \frac{0.1750 \text{ L/min}}{0.5 \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}$$

$$J = 5.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ s}$$

จะได้ค่าฟลักซ์การกรองเท่ากับ  $5.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-s}$

2. ค่าความต้านทานรวม ( $R_t$ )

$$R_t = \frac{\Delta P}{\mu J}$$

$$R_t = \frac{0.2 \text{ Bar}}{(1.002 \times 10^{-3})} \times \frac{10^5 \text{ Pa}}{1 \text{ Bar}} \times \frac{1}{5.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ s}}$$

$$R_t = 342.17 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$$

จะได้ค่าความต้านทานรวมเท่ากับ  $342.17 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$



### 3. ระดับการอุดตันถาวร (r, Degree of fouling)

จากตารางที่ 4-17 ค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนหลังจากถอดล้างทำความสะอาดครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ  $61.94 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  มีจำนวนรอบการทำงานสะสม 450 รอบ และค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนหลังจากถอดล้างทำความสะอาดครั้งที่ 2 มีค่าเท่ากับ  $83.55 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  มีจำนวนรอบการทำงานสะสม 580 รอบ

$$\begin{aligned} R_{m,i} &= (1+r)^j \times R_{m,o} \\ (83.55 \times 10^{10}) &= (1+r)^{580-450} \times (61.94 \times 10^{10}) \\ r &= 0.0023 \end{aligned}$$

จะได้ระดับการอุดตันถาวรเท่ากับ 0.0023

### 4. การประมาณอายุการใช้งาน

จากตารางที่ 4-17 ระดับการอุดตันถาวรเฉลี่ยเท่ากับ 0.0039 ความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนเริ่มต้นเท่ากับ  $2.3 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  มีจำนวนรอบการทำงานสะสม 450 รอบ และค่าความต้านทานของเซรามิคเมมเบรนสูงสุดที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ  $4.60 \times 10^{13} \text{ m}^{-1}$


$$\begin{aligned} R_{m,i} &= (1+r)^j \times R_{m,o} \\ (4.60 \times 10^{13}) &= (1+0.0039)^j \times (2.3 \times 10^{11}) \\ j &= 1361 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

$$\text{จำนวนรอบในการทำงาน} = \frac{\text{ระยะเวลาในการเดินระบบ}}{\text{(ระยะเวลาในสูบกกรอง)}}$$

$$1361 = \frac{\text{ระยะเวลาในการเดินระบบ}}{\text{(30 นาที)}}$$

$$\text{ระยะเวลาในการเดินระบบ} = 1,433 \text{ ชั่วโมง}$$

จะได้อายุการใช้งานของเซรามิคเมมเบรนเท่ากับ 1,433 ชั่วโมง



ภาคผนวก จ.  
การออกแบบผังปฏิกรณ์สำหรับการล้างทำความสะอาดดิน  
และการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการล้างทำความสะอาดจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการทดลองที่ 4.2 สามารถคำนวณค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวที่เกิดจาก ฟองอากาศ (Velocity gradient, G) ที่มาจากเครื่อง Water bath จากอัตราส่วนระหว่างน้ำประปา ต่อดิน 10 มิลลิลิตรต่อกรัม ได้ดังต่อไปนี้ (Pernitsky และคณะ, 2014)

ความเร็วในการเขย่า	120	รอบต่อนาที
ปริมาตรน้ำในหลอดทดลอง ( $V_L$ )	0.00001	ลูกบาศก์เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดทดลอง (d)	0.017	เมตร
ความถี่ในการเขย่า (n)	2	ต่อวินาที
ความหนืดของของเหลวตัวกลาง ( $\mu$ )	0.001	กิโลกรัมต่อเมตร.วินาที
Fluid kinematic ( $\nu$ )	$8.0 \times 10^{-7}$	ตารางเมตรต่อวินาที
Fluid density ( $\rho$ )	997	กิโลกรัมต่อเมตร.วินาที
Average energy dissipation ( $\mathcal{E}$ )	จากการคำนวณ	ตารางเมตรต่อวินาที <sup>3</sup>
Power input (P)	จากการคำนวณ	กิโลกรัมต่อเมตร <sup>2</sup> -วินาที <sup>3</sup>

สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Re = \frac{\rho n d^2}{\mu}$$

$$Re = \frac{(997) \times (2) \times (0.017)^2}{0.001}$$

$$Re = 576.26$$

$$70Re^{-1} + 25Re^{-0.6} + 1.5Re^{-0.2} = \frac{P}{\rho n^3 d^4 V_L^{1/3}}$$

$$70(576.26)^{-1} + 25(576.26)^{-0.6} + 1.5(576.26)^{-0.2}$$

$$= \frac{P}{(997)(2)^3(0.017)^4(0.00001)^{1/3}}$$

$$P = 1.631 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{m}^3$$

$$\varepsilon = \frac{P}{V_L \times \rho}$$

$$\varepsilon = \frac{1.631 \times 10^{-5}}{(0.00001) \times (997)}$$

$$\varepsilon = 0.001635 \text{ m}^2/\text{s}^3$$

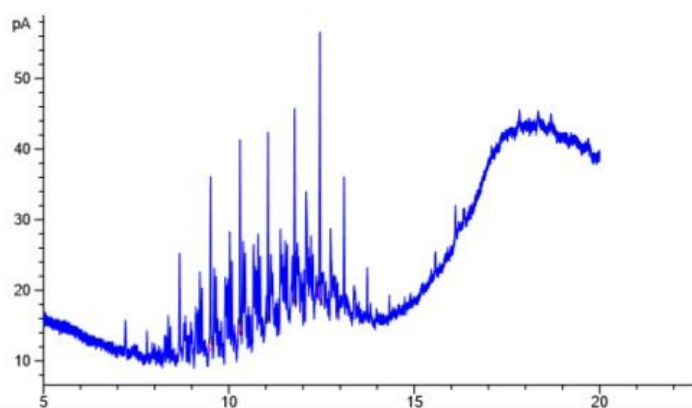
$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon}{V}}$$

$$G = \sqrt{\frac{0.001635}{8.0 \times 10^{-7}}}$$

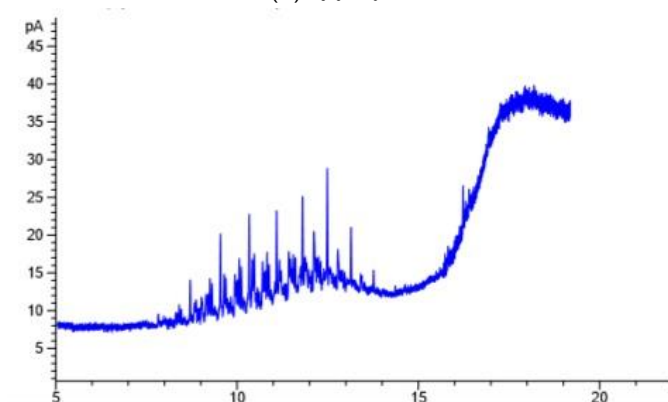
$$G = 45.22 \text{ s}^{-1}$$

จะได้ค่าความเร็วเกรเดียนท์ของของเหลวมาจากความเร็วในการเขย่า 120 รอบต่อนาทีเท่ากับ

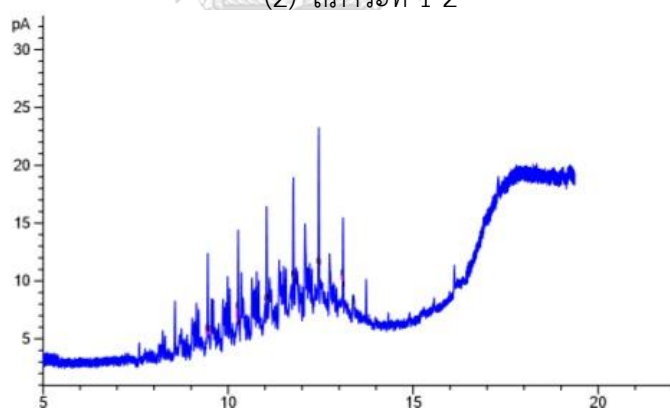
45.22 ต่อวินาที



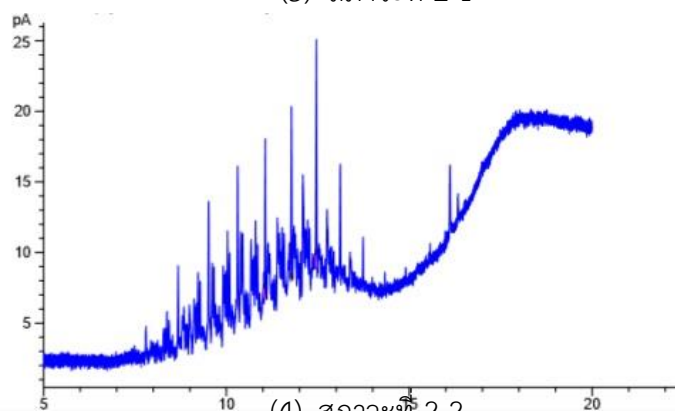
(1) สภาวะที่ 1-1



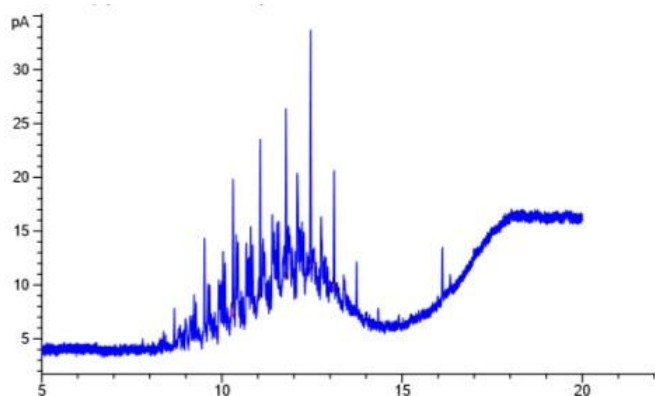
(2) สภาวะที่ 1-2



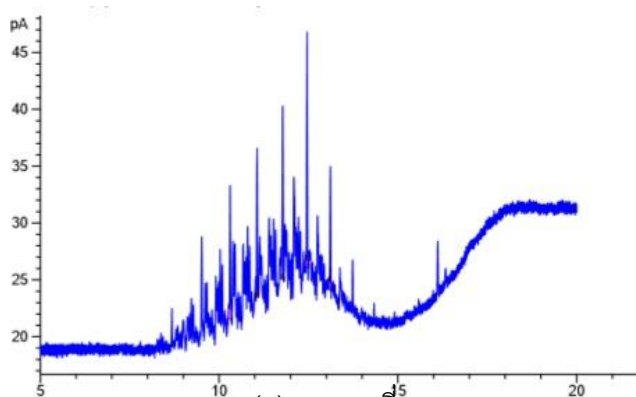
(3) สภาวะที่ 2-1



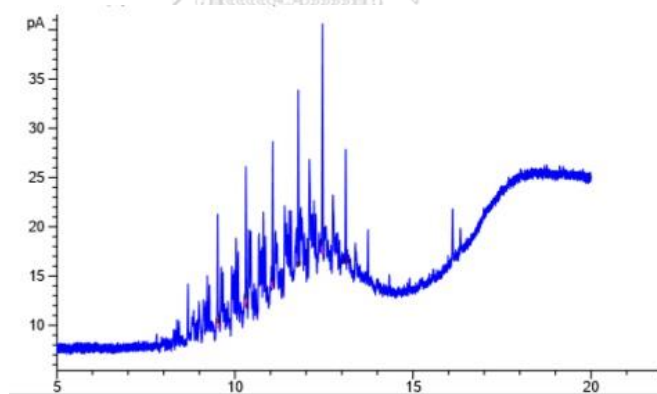
(4) สภาวะที่ 2-2



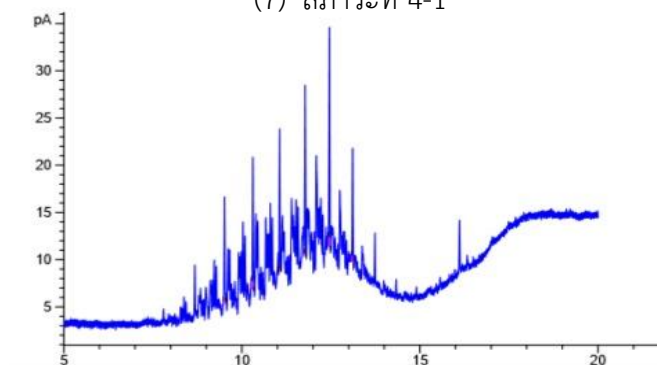
(5) สภาวะที่ 3-1



(6) สภาวะที่ 3-2



(7) สภาวะที่ 4-1



(8) สภาวะที่ 4-2

รูป จ-1 โครมาโทแกรมของดินปนเปื้อนหลังจากล้างทำความสะอาดในถังปฏิกรณ์

ตารางที่ จ-1 ความเข้มข้นของน้ำมันในดินปนเปื้อนในสภาวะต่าง ๆ ภายในถังปฏิกรณ์ (ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม))

พารามิเตอร์		ความเข้มข้นของน้ำมัน (ppm)		
ความดันในเส้นท่อ (บาร์)	ระยะเวลาในการล้าง (นาท)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0.3	10	388.90567	373.44042	381.17305
	5	374.70157	344.96629	359.83393
1.0	10	316.45024	338.84531	327.64778
	20	417.57178	349.74157	383.65667

ตารางที่ จ-2 ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนของดินปนเปื้อนในสภาวะต่าง ๆ ภายในถังปฏิกรณ์ (ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม))

พารามิเตอร์		ปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		
ความดันในเส้นท่อ (บาร์)	ระยะเวลาในการล้าง (นาท)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
0.3	10	23334.34	22406.425	22870.38 ± 656.135
1.0	5	18987.015	20330.719	19658.86 ± 950.142
	10	22482.094	20697.978	21590.03 ± 1261.56
	20	25054.307	20984.494	23019.4 ± 2877.79

ตารางที่ จ-3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคในดินแต่ละระดับความลึก

ขนาดช่อง ตะแกรง	ปริมาณดิน (%)							
	สถานะที่ 1		สถานะที่ 2		สถานะที่ 3		สถานะที่ 4	
	ก่อน ล้าง	หลัง ล้าง	ก่อน ล้าง	หลัง ล้าง	ก่อน ล้าง	หลัง ล้าง	ก่อน ล้าง	หลัง ล้าง
4 มิลลิเมตร	88.72	70.97	92.37	87.75	91.2	70.22	90.18	81.16
2.8 มิลลิเมตร	5.35	10.70	3.21	9.63	2.97	19.30	3.82	7.64
2 มิลลิเมตร	3.37	4.38	1.47	1.33	1.02	2.55	1.71	3.42
1.7 มิลลิเมตร	1.72	5.16	0.23	0.21	2.71	3.79	0.95	0.47
1.18 มิลลิเมตร	0.84	1.00	1.45	1.16	1.42	2.69	0.87	0.130
1 มิลลิเมตร	0.32	7.36	1.40	1.12	0.46	0.87	1.27	0.38
0.3 มิลลิเมตร	0.52	1.04	0.31	0.27	0.65	1.23	1.72	0.34
0.18 มิลลิเมตร	0.05	0.10	0.08	0.06	0.06	0.78	0.10	0.01
<0.18 มิลลิเมตร	0.01	0.02	0.05	0.04	0.07	0.14	0.01	0.01

เมื่อ **สถานะที่ 1** ความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์จากความดันในเส้นท่อ **0.3 บาร์** ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม) ระยะเวลาในการล้าง 10 นาที

**สถานะที่ 2** ความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์จากความดันในเส้นท่อ **1.0 บาร์** ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม) ระยะเวลาในการล้าง 10 นาที

**สถานะที่ 3** ความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์จากความดันในเส้นท่อ **1.0 บาร์** ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม) ระยะเวลาในการล้าง 5 นาที

**สถานะที่ 4** ความปั่นป่วนภายในถังปฏิกรณ์จากความดันในเส้นท่อ **1.0 บาร์** ค่าพีเอชที่ใช้ในการล้างเท่ากับค่า  $pH_{zpc}$  อัตราส่วนระหว่างน้ำประปาต่อดินปนเปื้อน 10 (ลิตรต่อกิโลกรัม) ระยะเวลาในการล้าง 20 นาที





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## บรรณานุกรม

- Amani, H. 2015. Evaluation of Biosurfactants and Surfactants for Crude Oil Contaminated Sand Washing. *Pet Sci Technol*, 33(5), 510-519.
- Brown, C., Davies, V., Brown, N., and Paterson, T. 2018. Sieving the class: Teaching particle size distributions and analysis. *Education for Chemical Engineers*. 23;1-6.
- Cai, S.-L., Tee, A. R., Short, J. D., Bergeron, J. M., Kim, J., Shen, J., Guo, R., Johnson, C. L., Kiguchi, K. and Walker, C. L. (2006). Activity of TSC2 is inhibited by AKT-mediated phosphorylation and membrane partitioning. *J Cell Biol*, 173(2), 279-289.
- Domenico, P. A. and Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology* (Vol. 506): Wiley New York.
- Dunlap, R. E. and Mertig, A. G. (2014). *American environmentalism: The US environmental movement, 1970-1990*: Taylor & Francis.
- Fisher, J. A., Scarlett, M. J. and Stott, A. D. (1997). Accelerated solvent extraction: an evaluation for screening of soils for selected US EPA semivolatile organic priority pollutants. *Environmental science & technology*, 31(4), 1120-1127.
- Lee, B.-H., Choi, W.-S., Lee, S.-E. and Park, B.-S. (2001). Fumigant toxicity of essential oils and their constituent compounds towards the rice weevil, *Sitophilus oryzae* (L.). *Crop protection*, 20(4), 317-320.
- Lemlich, R. (1984). Foam flotation, theory, and applications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 98, 291.

- Mulligan, C. N. and Yong, R. N. (2004). Natural attenuation of contaminated soils. *Environment international*, 30(4), 587-601.
- Osman, I., Young, A., Ledingham, M. A., Thomson, A. J., Jordan, F., Greer, I. A. and Norman, J. E. (2003). Leukocyte density and pro-inflammatory cytokine expression in human fetal membranes, decidua, cervix and myometrium before and during labour at term. *MHR: Basic science of reproductive medicine*, 9(1), 41-45.
- Painmanakul, P., Sastaravet, P., Lersjintanakarn, S. and Khaodhiar, S. (2010). Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by induced air flotation (IAF) process. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(5-6), 693-702.
- Pankow, J. F., Johnson, R. L., Hewetson, J. P. and Cherry, J. A. (1986). An evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on fractured porous media in terms of the equivalent porous medium (EPM) model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1(1-2), 65-76.
- Schellekens, J., Almeida-Santos, T., Macedo, R. S., Buurman, P., Kuyper, T. W. and Vidal-Torrado, P. (2017). Molecular composition of several soil organic matter fractions from anthropogenic black soils (Terra Preta de Índio) in Amazonia—A pyrolysis-GC/MS study. *Geoderma*, 288, 154-165.
- Speight, J. G. (2015). *Handbook of petroleum product analysis* (Vol. 182): John Wiley & Sons.
- Stein, A. T., Ufret-Vincenty, C. A., Hua, L., Santana, L. F. and Gordon, S. E. (2006). Phosphoinositide 3-kinase binds to TRPV1 and mediates NGF-stimulated TRPV1

trafficking to the plasma membrane. *The Journal of general physiology*, 128(5), 509-522.

Sun, F., Littlejohn, D. and Gibson, M. D. (1998). Ultrasonication extraction and solid phase extraction clean-up for determination of US EPA 16 priority pollutant polycyclic aromatic hydrocarbons in soils by reversed-phase liquid chromatography with ultraviolet absorption detection. *Analytica Chimica Acta*, 364(1-3), 1-11.

Un, U. T., Kandemir, A., Erginel, N. and Ocal, S. E. (2014). Continuous electrocoagulation of cheese whey wastewater: an application of response surface methodology. *Journal of environmental management*, 146, 245-250.

Urum, K., Pekdemir, T. and Gopur, M. (2003). Optimum conditions for washing of crude oil-contaminated soil with biosurfactant solutions. *Process Safety and Environmental Protection*, 81(3), 203-209.

Urum, K., Pekdemir, T., Ross, D. and Grigson, S. (2005). Crude oil contaminated soil washing in air sparging assisted stirred tank reactor using biosurfactants. *Chemosphere*, 60(3), 334-343.

Wang, L. K., Hung, Y.-T. and Shammas, N. K. (2007). *Advanced physicochemical treatment technologies*: Springer.

Wilcock, R. J., Nagels, J. W., Rodda, H. J., O'Connor, M. B., Thorrold, B. S. and Barnett, J. W. (1999). Water quality of a lowland stream in a New Zealand dairy farming catchment. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 33(4), 683-696.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือแนวทางปฏิบัติที่ดีด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนดินและน้ำใต้ดิน สำหรับสถานประกอบการหลุมฝังกลบของเสียอันตราย. กรุงเทพมหานคร: เอสทีซี มีเดีย & มาเก็ตติ้ง.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. การปนเปื้อนสารมลพิษในดิน. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา:  
<http://watertech.diw.go.th/spic/DocDetail.aspx?id=114> [11 มิถุนายน 2561]

กิตติศักดิ์ จีนาคม. 2557. การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดทางชีวภาพของดินปนเปื้อนน้ำมันเครื่องโดย  
 การเติมกากชีวภาพและสารลดแรงตึงผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยี  
 และการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชนิษฐา สมตระกูล. 2554. การฟื้นฟูสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนด้วยพืช.  
 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. 5 (1 มีนาคม 2554): 127-139.

จุมพล สงวนสิน. 2548. แนวทางการศึกษาสารปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน. กรมประมง, กรุงเทพมหานคร.

ชฎานิน พรหมจันทร์. 2554. การบำบัดน้ำมันเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วย  
 ไฟฟ้าและการทำให้ลอยภายในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยกที่มีการไหลวนภายนอก. วิทยานิพนธ์  
 ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
 มหาวิทยาลัย.

ชรัตน์ รุ่งเรืองศิลป์. 2533. น้ำมัน. กรุงเทพมหานคร: กองวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม สำนักงาน  
 คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

เธียรลลิต กิตติจิตต์. 2559. การศึกษาการดูดซับและกระบวนการล้างย้อนในการประยุกต์ใช้หัวกระจาย  
 อากาศแบบเซรามิคแทนที่หน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต,  
 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- นลินี เหลืองรุ่งรอง. 2544. กระบวนการไมโครฟิลเตรชันในการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม. [ออนไลน์]. 2543. แหล่งที่มา <https://sites.google.com/a/srw.ac.th/pi-to-leiym/home/phlit-phanth-pi-to-leiym> [5 มิถุนายน 2561]
- ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2537. การตกตะกอนแบบโคต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรพงศ์ ตั้งอิทธิพลากร. การจัดการความเสี่ยงและการฟื้นฟูการปนเปื้อนมลพิษในดินและน้ำใต้ดิน. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: [http://infofile.pcd.go.th/ptech/Risk\\_management.pdf?CFID=8209841&CFTOKEN=43050317](http://infofile.pcd.go.th/ptech/Risk_management.pdf?CFID=8209841&CFTOKEN=43050317) [5 มิถุนายน 2561]
- สาวิตรี ชูบุบผา. 2556. การปนเปื้อนของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนในน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งจังหวัดระยอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะประมงมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อังสนา สัจจนดำรงค์. 2553. การประยุกต์หัวกระจายอากาศแบบเซรามิกเพื่อใช้แทนที่หน่วยตกตะกอนในระบบเอเอส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอิบ เขียววรินทร์มณ. 2542. คู่มือปฏิบัติการการสำรวจดิน. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชุตติกาญจน์ โปธิรัชต์
วัน เดือน ปี เกิด	14 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	ขอนแก่น
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี
ที่อยู่ปัจจุบัน	225/30 ถ.มิตรภาพ ต.ศิลา อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY