



รายงานการวิจัย

พฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของท่อผลิตน้ำมันในกระบวนการผลิต
น้ำมันดิบบนบก

Erosion-Corrosion behavior of Tube
in onshore crude oil production

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

พฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของท่อผลิตน้ำมันในกระบวนการผลิต
น้ำมันดิบบนบก

Erosion-Corrosion behavior of Tube
in onshore crude oil production

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.พรวิสา วงศ์ปัญญา

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัมพรศักดิ์ วรรณโกมล

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560-2561

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

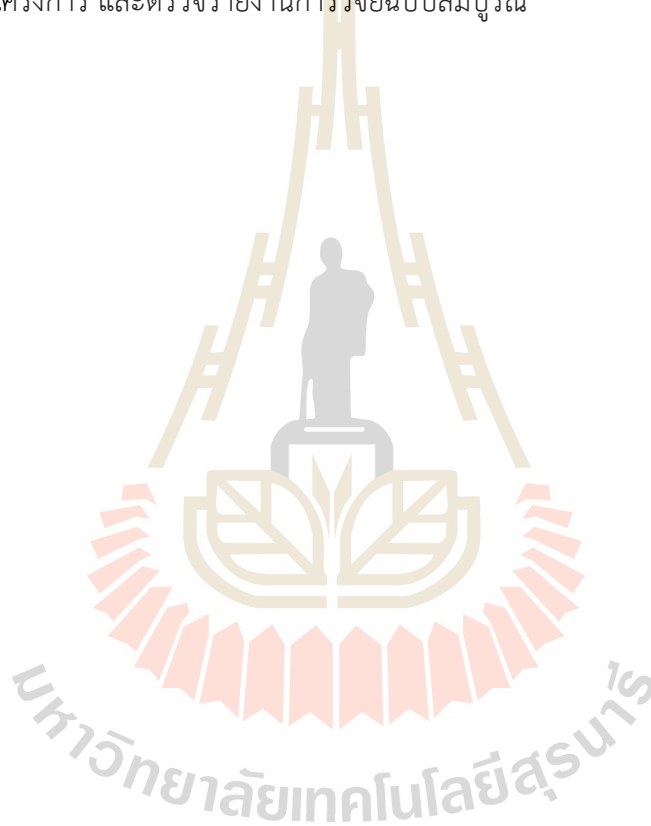
พฤษภาคม 2563

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560-2561 ศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ กรมการพลังงานทหาร อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันดิบสำหรับทำวิจัย เรื่อง “พฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของท่อผลิตน้ำมันในกระบวนการผลิตน้ำมันดิบบนบก” คำแนะนำพิเศษจาก อาจารย์ ดร.เชษฐา ชุมกระโทก อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้เสียสละเวลาทำหน้าที่ตรวจข้อเสนอโครงการ และตรวจรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

พรวสา วงศ์ปัญญา

พฤษภาคม 2563



บทคัดย่อ

พฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของท่อผลิตน้ำมันในกระบวนการผลิตน้ำมันดิบบนบก

ท่อผลิตน้ำมัน (Tube) ระหว่างใช้งานต้องสัมผัสกับน้ำมันดิบที่มีตะกอนทรายและอนุภาคแขวนลอยต่าง ๆ ทำให้เกิดการกัดเซาะ-กัดกร่อน ความเสียหายนี้กระทบทั้งการใช้งานทางวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของท่อผลิตน้ำมันดิบ เพื่อประเมินอายุการใช้งานของชิ้นส่วนดังกล่าว พฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของท่อผลิตน้ำมันถูกศึกษาโดยใช้ระบบ Impingement jet ร่วมกับเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าในน้ำมันดิบ ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคทราย (500 1000 และ 2000 ไมโครเมตร) น้ำมันดิบที่ใช้ในการทดสอบมาจากแหล่งน้ำมันฝาง ศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ กรมการพลังงานทหาร อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ เหล็ก 2 ชนิดใช้ในการศึกษานี้ คือ เหล็กท่อผลิตน้ำมันดิบจากแหล่งอำเภอลานกระบือ (Tube) และเหล็กกล้า AISI 1045 ความเสียหายบนพื้นผิวของตัวอย่างถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวด้วยสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) ปริมาณไอออนเหล็กในน้ำมันดิบภายหลังการทดสอบการกัดเซาะ-กัดกร่อนถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) จากผลการศึกษาพบว่าความรุนแรงของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน แปรตามขนาดทรายและโครงสร้างจุลภาคเหล็ก ระดับความเสียหายเรียงลำดับจากความเสียหายสูงสุดไปต่ำสุด คือ ผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน การกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน องค์ประกอบรวมการกัดกร่อน และการกัดกร่อนที่ปราศจากการกัดเซาะ ตามลำดับ ขนาดอนุภาคทรายมีผลมากต่อการกัดเซาะในขณะที่คลอไรด์ไอออน น้ำและออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำมันดิบกระตุ้นการกัดกร่อน และยังพบว่าปริมาณไอออนเหล็กเพิ่มตามปริมาณความเสียหาย จากผล XPS บ่งชี้ปริมาณ SiO_2 สูงมากบนพื้นผิวที่เสียหายมาก

Abstract

Erosion-Corrosion behavior of Tube in onshore crude oil production

Tube during in-service has been exposed to crude oil containing sand and suspended-particle that results in erosion-corrosion. This degradation impacts engineering applications, economics, and the environment. It is, therefore, necessary to study erosion-corrosion behavior of Tube to estimate the lifetime of this part. Erosion-corrosion behavior of Tube is studied by using Impingement jet combined with electrochemical technique in crude oil, including a variation of sand sizes (500, 1000, and 2000 μm). Crude oil used in this study was from the Fang oil field, Northern Petroleum Development Center Department of Military Energy, Fang District, Chiang Mai Province. Two types of steels were used: Tube from Lan Krabue and AISI 1045 steel. Degraded-surface of samples were evaluated via Scanning Electron Microscope (SEM), and the chemical states on the surface of degraded-samples were detected via X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). The amount of released-iron ions in the crude oil after erosion-corrosion testing was determined by Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES). From results, the severity of erosion-corrosion was depended on sand size and microstructure of steels. The level of degradation ranked from the highest to the lowest as follows: total erosion-corrosion, pure erosion, the combination of corrosion component, and pure corrosion, respectively. The sand size significantly influences erosion, while chloride ions, water, and dissolved oxygen in the crude oil activate the corrosion. Also, the released-iron ions increase with the degree of degradation. According to the XPS results, it indicates the high amount of SiO_2 on the highly damaged-surface.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตการทำวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 วัสดุที่ใช้ทำท่อผลิตน้ำมัน	8
2.2 ปีโตรเลียมของไทย การผลิต สมบัติพื้นฐาน และการตรวจสอบสมบัติของน้ำมัน	9
2.3 อนุภาคทราย.....	12
2.4 การป้องกันการกัดกร่อน	13
2.5 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยหลักทางไฟฟ้าเคมีและการประเมินผลที่ได้	14
2.6 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature).....	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 วัสดุ	20
3.2 สารละลายและสารเคมี	21
3.2.1 น้ำมันดิบ	21
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	22
3.3 ทราย	23
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.4.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการกัดกร่อน	24
3.4.2 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน	26
3.5 ขั้นตอนการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	35
3.5.2 ตัวแปรที่ควบคุมสำหรับการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	35
3.5.3 ขั้นตอนการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	36
3.5.4 ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน	37
3.5.5 ขั้นตอนการตรวจสอบสารละลายหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	38
3.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน	40
4.2 การวิเคราะห์สารละลายหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	44
4.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	45
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
บรรณานุกรม.....	52
ภาคผนวก ก.....	56
ภาคผนวก ข.....	59
ภาคผนวก ค.....	62
ภาคผนวก ง.....	64
ภาคผนวก จ.....	66
ประวัติคณะผู้วิจัย.....	68

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบความหยาบผิวจากกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน [6]	9
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็ก (Tube) จากแหล่งขุดเจาะน้ำมันลานกระบือ.....	20
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันดิบจากศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ กรมการพลังงานทหาร อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่	22
ตารางที่ 3.3 แสดงความเข้มข้นทรายกับมวลที่สูญเสียไป.....	35
ตารางที่ 3.4 แสดงเวลาที่ทดสอบกับมวลที่สูญเสียไป	36
ตารางที่ 3.5 แสดงตัวแปรที่ควบคุมสำหรับทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน	36
ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) เส้นทาเฟลด้านแอโนด (β_a) เส้นทาเฟลด้านแคโทด (β_c) และค่าโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน (R_p) [22].....	43
ตารางที่ 4.2 ผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน การกัดเซาะปราศจากการกัดกร่อน การกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ และองค์ประกอบการกัดกร่อนรวม [22].....	44
ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของปริมาณไอออนเหล็กหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน [22].....	45
ตารางที่ 4.4 สัดส่วนองค์ประกอบของคาร์บอน เหล็ก ซิลิคอน และออกซิเจนบนพื้นผิวชิ้นงานหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน [22].....	49
ตารางที่ ข.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายน้ำมันดิบ	60
ตารางที่ ข.2 ค่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานในสารละลายน้ำมันดิบ	60
ตารางที่ ข.3 ค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการกัดเซาะและผลรวมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนในสารละลายน้ำมันดิบผสมทราย.....	61
ตารางที่ ง.1 แสดงความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 1045.....	65
ตารางที่ ง.2 แสดงความหยาบผิวของเหล็กกล้าของท่อเหล็ก (Tube)	65

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอน [1].....	1
รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างแท่นชุดเจาะน้ำมันดิบ [4]	2
รูปที่ 1.3 ผลึกที่ผลิตจากการกลั่น [3].....	3
รูปที่ 1.4 โมเดลการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	5
รูปที่ 2.1 ท่อขนส่งน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM 53	8
รูปที่ 2.2 การจำแนกขนาดของตะกอนตามมาตรฐานแห่งสหรัฐอเมริกา (ASTM D 2487)	12
รูปที่ 2.3 ปริมาณสะสมของทรายขนาดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	13
รูปที่ 2.4 การป้องกันการกัดกร่อนระบบแคโทดิกที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งกำเนิดภายนอก.....	14
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบสามขั้ว	14
รูปที่ 2.6 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ASTM G3).....	16
รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็ก.....	21
รูปที่ 3.2 รูปร่างและขนาดอนุภาคทราย: 500 1000 และ 2000 ไมโครเมตร.....	23
รูปที่ 3.3 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น ECOMET 6	24
รูปที่ 3.4 ทรายที่ใช้ในการขัดผิวชิ้นงาน.....	24
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสง.....	25
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) รุ่น Olympus BX51M.....	25
รูปที่ 3.7 เครื่อง Sieve analysis.....	26
รูปที่ 3.8 Copper/Copper Sulfate Reference Electrode รุ่น RE-7.....	27
รูปที่ 3.9 DC power supply รุ่น Hi mini rectifier.....	27
รูปที่ 3.10 แบบจำลองการทดสอบอัตราการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน (Pure erosion rate, E_0) และผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน (Total erosion-corrosion, T)	28
รูปที่ 3.11 เครื่องชั่งเชิงวิเคราะห์ ยี่ห้อ METTLER TOLEDO	29
รูปที่ 3.12 เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat).....	30
รูปที่ 3.13 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Ag/AgCl 3.0M KCl).....	31
รูปที่ 3.14 อิเล็กโทรดวัดกระแส แท่งแกรไฟต์ (Graphite)	31
รูปที่ 3.15 อิเล็กโทรดตัวอย่าง (Working electrode).....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	33
รูปที่ 3.18 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS).....	34
รูปที่ 3.19 เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ..	34
รูปที่ 3.20 แผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย.....	39
รูปที่ 4.1 มวลสูญเสียจากการทดสอบการกัดเซาะปราศจากการกัดกร่อน.....	40
รูปที่ 4.2 มวลสูญเสียจากการทดสอบผลรวมการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	41
รูปที่ 4.3 เส้นโค้งโพลาริเซชันของการกัดกร่อนที่ปราศจากการกัดเซาะ [22].....	42
รูปที่ 4.4 เส้นโค้งโพลาริเซชันของการทดสอบองค์ประกอบการกัดกร่อนรวม [22].....	42
รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานหลังทดสอบ ผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน.....	46
รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานหลังทดสอบการกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ	46
รูปที่ 4.7 ตัวอย่าง XPS-fitted curve ของชิ้นงานหลังทดสอบการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน [22].....	48
รูปที่ ก.1 วิธีหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจาก เส้นโพลาริเซชัน.....	57
รูปที่ ค.1 ปริมาณองค์ประกอบของ C 1s และ Fe 2p ของชิ้นงานหลังทดสอบการกัดเซาะ ที่ปราศจากการกัดกร่อน.....	63

บทที่ 1

บทนำ

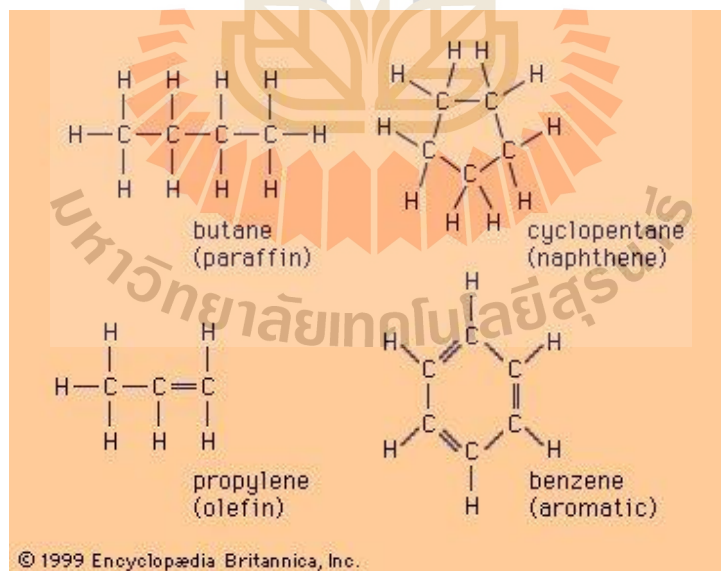
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

น้ำมันดิบประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นพันธะหลัก หรืออาจจะเป็นพันธะเดี่ยว หรือพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยทั่วไปสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีหลายประเภท หากจำแนกตามลักษณะของสูตรทางเคมี และโครงสร้างโมเลกุล แบ่งได้ 3 ประเภท คือ

1. ประเภทพาราฟิน (Paraffin) ซึ่งเป็นอนุกรมของไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว และมีโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นเส้น มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปคือ C_nH_{2n+2} เช่น มีเทน (Methane, CH_4)

2. ประเภทแนพทีน (Naphthene) ซึ่งเป็น อนุกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว และมีโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นวง มีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ C_nH_{2n} เช่น ไซโคลเพนเทนส์ (Cyclopentanes, C_5H_{10}) และไซโคลเฮกเซนส์ (Cyclohexanes, C_6H_{12})

3. ประเภทอโรมาติก (Aromatic) ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อเป็นวง ไม่อิ่มตัว หรือไม่มีเสถียรภาพ มีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ C_nH_{2n-6} เช่น เบนซีน (Benzene, C_6H_6) [1]



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอน [1]

น้ำมันดิบเป็นของเหลวที่มีสีค่อนข้างดำและหนืด บางที่อาจมีกลิ่นฉุนเพราะมีแก๊สไข่น้ำมันอยู่ บางครั้งอาจมีสารอื่น ๆ ด้วย เช่น กำมะถัน (S) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) เป็นต้น รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างแท่นขุดเจาะน้ำมัน ที่สามารถติดตั้งบนบกหรือในทะเลแล้วแต่การใช้งาน โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะน้ำมันดิบบนบกจึงกล่าวถึงกระบวนการผลิตน้ำมันบนบกเท่านั้น ปกติน้ำมันดิบที่ขุดขึ้นมายังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันทีที่ต้องผ่านกระบวนการกลั่นเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไปดังแสดงในรูป 1.3



รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างแท่นขุดเจาะน้ำมันดิบ [4]

จากรูปที่ 1.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการใช้น้ำมันดิบเป็นสารตั้งต้นแล้วนำไปกลั่น โดยกระบวนการกลั่นจะแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ ออกเป็นกลุ่ม ๆ จากนั้นจึงนำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไปใช้ประโยชน์ตามชนิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น แก๊สแอลพีจีใช้สำหรับหุงต้มในครัว เชื้อเพลิงสำหรับรถบางชนิด เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันเครื่องบิน น้ำมันดีเซล (โซล่า) และ ยางมะตอย เป็นต้น [2]

ชิ้นส่วนขุดเจาะน้ำมันดิบบนบกประกอบด้วย ชิ้นส่วนตั้งแต่ก้านเจาะจนถึงหัวเจาะ ลูกสูบแก๊สเข้าสู่หลุมผลิต ลูกสูบช่วยเพิ่มแรงดัน ท่อผลิต (Production tubing) ซึ่งเป็นส่วนลำเลียงน้ำมันดิบขึ้นไปด้านบน และสุดท้ายคือท่อรูกู้ป้องกันไม่ให้น้ำมันดิบจากด้านในรั่วมาด้านบน



รูปที่ 1.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่น [3]

ชิ้นส่วนท่อผลิต (Tube) สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันทั้งบริเวณนอกชายฝั่ง (Offshore) และบนบก (Onshore) ส่วนใหญ่ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุผสมต่ำ (Low-alloy carbon steel) เพราะมีราคาที่ไม่สูงมากนัก และมีสมบัติทางกลที่ค่อนข้างดี สามารถปรับปรุงความแข็งแรงได้ด้วยกระบวนการอบชุบทางความร้อน (Heat treatable) แต่ก็มีข้อด้อยคือการกัดกร่อนที่ค่อนข้างต่ำ ชิ้นส่วนท่อผลิตน้ำมันในระหว่างใช้งานต้องสัมผัสกับน้ำมันดิบที่มีอนุภาคทราย โคลน หินดินดาน และสารน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำมันดิบตลอดเวลาทำให้เกิดการกัดเซาะ-การกัดกร่อนได้ ส่งผลให้เกิดการรั่วของท่อผลิตน้ำมันจากการขัดสีของอนุภาคทรายในน้ำมันดิบ ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตในการดำเนินธุรกิจของอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันดิบและสิ่งแวดลอมในบริเวณนั้น เนื่องจากไม่สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนท่อได้ทันก่อนจะเกิดความเสียหายรุนแรง หรือผู้ผลิตไม่ทราบว่าท่อที่อยู่ลึกลงไปในชั้นใต้ดินเกิดความเสียหายเพราะไม่สามารถมองเห็นหรือตรวจสอบได้ การป้องกันการกัดกร่อนในลักษณะนี้สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคแคโทดิกโพรเทคชัน (Cathodic Protection) หรือการใช้ชั้นเคลือบ (Coating) เพื่อป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กและยืดอายุการใช้งาน [5] ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาความเสียหายจากการกัดเซาะ-การกัดกร่อนโดยใช้สารละลายจำลองน้ำทะเล (Synthetic sea water) ผสมกับผงอะลูมินา หรือสารละลายจำลองน้ำทะเลผสมกับทราย หรือสารละลายน้ำมันจำลองผสมกับทราย ซึ่งสารละลายจำลองเหล่านี้มีค่าสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนืด ค่าความเป็นกรด-ด่าง และสมบัติทางเคมี เช่น ปริมาณแร่ธาตุ ไอออนของโลหะ หรือสารปนเปื้อนอื่น ๆ แตกต่างจากน้ำมันดิบที่ไม่อาจทดแทนได้ด้วยสารละลายจำลอง ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้จัดทำขึ้น เพื่อศึกษาความ

เสียหายจากการกัดเซาะ-การกัดกร่อนโดยใช้น้ำมันดิบจากแหล่งน้ำมันผาง (ศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ กรมการทหาร) อำเภอผาง จังหวัดเชียงใหม่ ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคทรายโดยใช้อนุภาคทรายที่มาจากสภาพแวดล้อมที่เกิดปัญหาจริงเพื่อให้ได้ผลของความเสียหายจากพฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของวัสดุที่ใช้ผลิตท่อในกระบวนการผลิตน้ำมันดิบที่ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริง โดยประเมินความเสียหายในรูปแบบของการสูญเสียเนื้อโลหะ ผลสำเร็จของงานวิจัยในโครงการนี้มีผลประโยชน์โดยตรงต่อการประเมินอายุการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันดิบบนภาคพื้นดิน

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของท่อผลิตน้ำมันดิบบนบกที่ใช้ในอุตสาหกรรม ฯ คือ ชิ้นส่วนท่อผลิตจากแหล่งขุดเจาะน้ำมันดิบลานกระบือและ เหล็กกล้า AISI 1045 ที่มีทรายผสมในน้ำมันดิบ โดยเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคทราย และควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันดิบที่ 50 องศาเซลเซียส

1.3 ขอบเขตการทำวิจัย

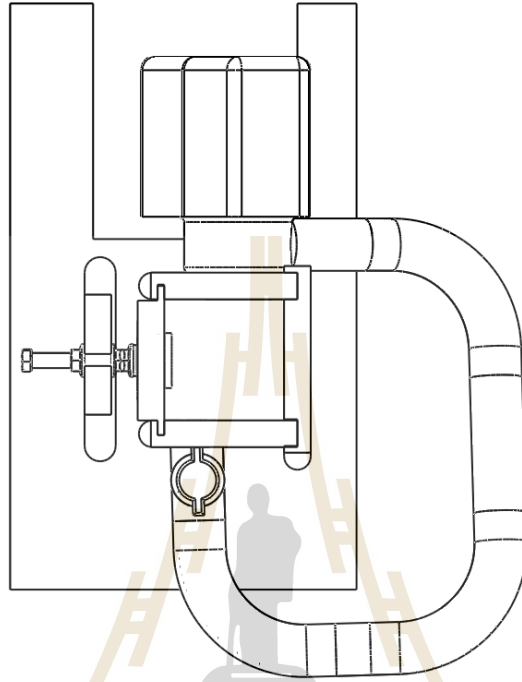
1.3.1 โลหะที่เป็นตัวแทนของท่อผลิตน้ำมันดิบบนบก (Onshore crude oil production tubing) จะเลือกใช้เหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็กที่ใช้งานจริงจากแหล่งขุดเจาะน้ำมัน ณ อำเภอลานกระบือ (เหล็ก Tube) จากนั้นตัดให้มีลักษณะทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ความหนา 6 มิลลิเมตร สำหรับศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale)

1.3.2 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างในข้อ 1.3.1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Optical Emission Spectrometer, OES) ก่อนทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

1.3.3 เตรียมผิวชิ้นงานให้ความหยาบผิวเท่ากับ $0.4 \mu\text{m}$ ด้วยการขัดกระดาษทรายเบอร์ 100 และ 180 เพื่อให้ความหยาบผิวใกล้เคียงกับความหยาบผิวของท่อที่ใช้งานจริง [6] วัดความหยาบผิวด้วยเครื่อง Optical Profiler (Bruker Contour GT) และตรวจสอบความแข็งของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง Rockwell Hardness Testing Scale ได้ค่า 92.73 สำหรับเหล็กกล้า AISI 1045 และ 96.80 สำหรับเหล็กท่อจากลานกระบือ (เหล็ก Tube)

1.3.4 สารละลายที่ใช้ทดสอบ คือ น้ำมันดิบจากแหล่งน้ำมันอำเภอผาง จังหวัดเชียงใหม่ โดยตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของน้ำมันดิบ เช่น ความหนืด (Viscosity) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จุดหลอมเหลว (Melting Point) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เป็นต้น

1.3.5 ศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของเหล็ก: ท่อผลิตน้ำมันดิบตามตัวอย่างโมเดลดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยปรับโมเดลให้ใกล้เคียงกับสภาพการผลิตน้ำมันดิบที่สนใจศึกษาให้มากที่สุด



รูปที่ 1.4 โมเดลการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

จากรูปที่ 1.4 แสดงโมเดลการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อนที่ประกอบไปด้วยส่วนทดสอบการกัดเซาะ คือ ช่องสำหรับพ่นทราย และน้ำมันดิบไหลผ่านและสัมผัสผิวน้ำขึ้นงานทดสอบในแนวขนานกับพื้นผิวชิ้นงานตามลักษณะการไหลของน้ำมันดิบผ่านผิวท่อ และ ป้อนทำหน้าที่ดูน้ำมันดิบและทรายแล้วพ่นไปบนพื้นผิวชิ้นงาน จากโมเดลทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อนคาดว่าจะได้ผลการทดสอบที่น่าสนใจ คือ

ก) พฤติกรรมการกัดกร่อนที่ปราศจากการกัดเซาะ (C_0) เมื่อน้ำมันดิบเป็นตัวกลางการกัดกร่อนโดยไม่เติมทราย วัดผลทดสอบเป็นอัตราการกัดกร่อนโดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท

ข) พฤติกรรมองค์ประกอบการกัดกร่อนรวม (C_w) ใช้ น้ำมันดิบผสมอนุภาคทราย วัดผลทดสอบเป็นอัตราการกัดกร่อนโดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท

ค) พฤติกรรมการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน (E_0) ใช้ น้ำมันดิบผสมทรายโดยในขณะทดสอบดังแสดงในโมเดลรูปที่ 1.4 ต้องเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนด้วยระบบ Impressed

Current Cathodic Protection (ICCP) ประเมินความเสียหายโดยซึ่งมวลสูญเสียของชิ้นงานทดสอบ แล้วนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน

ง) พฤติกรรมผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน (T) ใช้น้ำมันดิบผสมทราย ในขณะทดสอบไม่ติดตั้ง Impressed Current Cathodic protection ประเมินความเสียหายโดยซึ่งมวลสูญเสียของชิ้นงานทดสอบแล้วนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน

1.3.6 การทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ต้องควบคุมตัวแปรในระหว่างการทดลอง ดังนี้

ก) ควบคุมความเร็วในการพ่นน้ำมันดิบผสมทรายให้คงที่ ที่ 1.4 เมตรต่อวินาที โดยคำนวณจากสูตรอัตราการไหล (แสดงในบทที่ 2)

ข) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองควบคุมให้คงที่ ที่ 50 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการไหลตัวส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าเพื่อให้เครื่องโพเทนชิโอสแตทสามารถวัดเส้นโค้งโพลาริเซชันได้ นอกจากนี้ อุณหภูมิดังกล่าวยังเป็นอุณหภูมิจริงที่ได้ตรวจวัดในระหว่างการชุดเจาะจริง (เก็บข้อมูลระหว่างไปเก็บตัวอย่างน้ำมันดิบ)

ค) ขนาดอนุภาคทรายที่ใช้ทดสอบมีการเปลี่ยนขนาด คือ 500 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ปริมาณอนุภาคทราย 18 กรัมต่อน้ำมันดิบ 150 มิลลิลิตร

1.3.7 การวิเคราะห์ภายหลังการทดสอบ

ก) น้ำมันดิบนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นไอออนของเหล็ก (เป็นตัวบ่งชี้ความเสียหายของท่อ) ในสารละลายน้ำแยกน้ำมันดิบด้วยเครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

ข) วิเคราะห์ความเสียหายของพื้นผิวพื้นผิวหลังการทดสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีบนพื้นผิววัสดุด้วยสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงพฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของวัสดุที่ใช้ผลิตท่อในกระบวนการผลิตน้ำมันดิบจากลานกระป๋อง และเหล็กกล้า AISI 1045 จากการทดสอบด้วยน้ำมันดิบและมีการเปลี่ยนแปลงขนาดทราย

1.4.2 ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้ คาดว่าจะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันดิบ เพื่อใช้งานด้านต้านทานการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

1.4.3 ในเชิงวิชาการ ทำให้เกิดทักษะการเรียนรู้ เพิ่มพูนความรู้ แนวคิดในการวิเคราะห์วิจัย และพัฒนาระหว่างกระบวนการทำวิจัย โดยผลงานที่ได้จะช่วยเสริมความเข้มแข็งให้กับนักวิชาการ

และนักศึกษาในแง่ของการผสมผสานความรู้ในภาคทฤษฎี ภาคปฏิบัติ และเทคโนโลยีที่นำไปใช้จริงใน
ภาคอุตสาหกรรม



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุที่ใช้ทำท่อผลิตน้ำมัน

ท่อผลิตน้ำมันดิบเป็นทรงกระบอกกลวงอยู่ภายในปลอกหุ้ม ทำหน้าที่ในการขนส่งของเหลวขึ้นไปบนพื้นผิวดิน โดยปลอกหุ้มด้านนอกทำหน้าที่เป็นระบบป้องกันการรั่วไหล โดยในอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันดิบ การเลือกใช้วัสดุสำหรับท่อผลิตขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันในการทำงาน ในอุตสาหกรรมท่อผลิตน้ำมันดิบ มักจะใช้ท่อผลิตตามมาตรฐาน American petroleum institute (API) โดยเกรด J-55 และ K-55 เป็นเกรดที่นิยมใช้งานสำหรับทำท่อ (Tubing) และปลอก (Casing) ซึ่งเป็นเกรดที่มีคาร์บอนปานกลางสามารถอบชุบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ หากเปรียบเทียบกับมาตรฐาน AISI ก็คือ เกรด AISI 1045 และ AISI 4140 นั่นเอง ดังแสดงในรูป 2.1 นอกจากนี้เหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว Martensitic stainless steel เช่น เกรด 13Cr เกรด AISI 420 ก็นิยมใช้ในงาน Oil and gas production หรือ ในกรณีต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เนื่องจาก Martensitic stainless steel มีข้อเด่นกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีธาตุผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น และต้องการความแข็งแรงสูงขึ้น [7]



รูปที่ 2.1 ท่อขนส่งน้ำมันตามมาตรฐาน ASTM 53 [7]

ความหมายบผิวสำเร็จของท่อแสดงดังตารางที่ 2.1 ความหมายบผิวสำเร็จจะเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบความหยาบผิวจากกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน [6]

Ra μm	50	37.5	25	12.	6.3	3.2	1.	0.	0.	0.	0.	0.0
				5			6	8	4	2	1	5
Ra μin	200	150	100	500	25	12	63	32	16	8	4	2
	0	0	0	0	5							
TUBE												
FINISHING												
Hot Extruded		█										
Cold Drawn				█		█						
Smooth Bore								█				
Electropolished									█			

ท่อขนส่งและท่อผลิตน้ำมันหลังผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วต้องปรับพื้นผิวด้วยกระบวนการ Honing เป็นลำดับสุดท้าย เพื่อให้พื้นผิวสำเร็จของท่อขนส่งและท่อผลิตน้ำมันมีความหยาบผิวอยู่ในช่วง Smooth Bore [8]

2.2 ปีโตรเลียมของไทย การผลิต สมบัติพื้นฐาน และการตรวจสอบสมบัติของน้ำมัน

แหล่งปีโตรเลียมบนบกอยู่ในบริเวณภาคเหนือและภาคกลาง ประกอบด้วย

1) แหล่งฝาง บริเวณอำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ ปัจจุบันมีอัตราการผลิตน้ำมันดิบประมาณ 1,000 บาร์เรลต่อวัน

2) แหล่งสิริกิติ์ ทับแระด หนองมะขาม หนองตุม วัดแตน เสาถียร ประคู้เฒ่า ปรีอกระเทียม หนองแสง ทุ่งยางเมือง บึงหญ้า บึงม่วง บึงหญ้าตะวันตก บึงม่วงใต้ หนองสระ อรุโณทัยและบูรพา อยู่ในพื้นที่อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร อำเภอคีรีมาศ อำเภอกงไกรลาศ จังหวัดสุโขทัย และอำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก ปัจจุบันมีอัตราการผลิตน้ำมันดิบประมาณ 25 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน

3) แหล่งวิเชียรบุรี ศรีเทพ นาสนุ่น นาสนุ่นตะวันออก บ่อรังเหนือ วิเชียรบุรีส่วนขยาย และ L33 อยู่ในพื้นที่อำเภอวิเชียรบุรี และ อำเภอสรีเทพ จังหวัดเพชรบูรณ์ ปัจจุบันมีอัตราการผลิตน้ำมันดิบประมาณ 2,200 บาร์เรลต่อวัน

4) แหล่งอุ้มทอง สังขจาย บึงกระเทียม และ หนองผักชี อยู่ในพื้นที่อำเภอเมือง และอำเภออุ้มทอง จังหวัดสุพรรณบุรี ปัจจุบันมีอัตราการผลิตน้ำมันดิบประมาณ 350 บาร์เรลต่อวัน

5) แอ่งก้ำแพงแสน อยู่ในพื้นที่อำเภอก้ำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ปัจจุบันมีอัตราการผลิตน้ำมันดิบประมาณ 500 บาร์เรลต่อวัน

สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปัจจุบัน มีแหล่งก๊าซธรรมชาติ 2 แหล่ง คือ

1) แหล่งก้ำน้ำพอง บริเวณอำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น ปัจจุบันมีอัตราการผลิตก๊าซธรรมชาติประมาณ 15 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน

2) แหล่งก้ำสินภู่อ้อม บริเวณอำเภอหนองแสง จังหวัดอุดรธานี ปัจจุบันมีอัตราการผลิตก๊าซธรรมชาติประมาณ 100 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน และก๊าซธรรมชาติเหลวประมาณ 450 บาร์เรลต่อวัน[9]

คุณภาพของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมมีความสำคัญเพราะเป็นตัวชี้วัดคุณภาพในการใช้งาน การเก็บรักษา ความปลอดภัยในการใช้งาน ตลอดจนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ซึ่งจะมีคุณสมบัติหลายด้าน ดังนี้

1) API Gravity, Density, Relative Density (Specific Gravity) (ความหนาแน่น/ความถ่วงจำเพาะ)

การหาค่าความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ให้ใช้วิธีตาม ASTM D 1298 ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าโดยใช้หลักการของ Hydrometer จะเป็นการวัดในหน่วยใดก็สามารถใช้ Hydrometer ในหน่วยนั้นวัดได้ ซึ่งมีเครื่องมือมาตรฐานสำหรับใช้วัด ในการวัดจะต้องอ่านอุณหภูมิด้วย แล้วจึงนำไปปรับค่าเป็นอุณหภูมิมาตรฐาน โดยการใช้ Petroleum Measurement Tables คุณสมบัติข้อนี้ของน้ำมันถือว่าสำคัญมาก โดยเฉพาะในด้านการซื้อขาย เพราะส่วนใหญ่จะทำการซื้อขายกันตามปริมาตรที่อุณหภูมิที่วัดได้เป็นปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐาน หรือที่เรียกว่า Volume Correction Factor

ในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ค่าความหนาแน่นหรือความถ่วง เมื่อใช้พิจารณาร่วมกับคุณสมบัติอื่น ๆ จะสามารถบ่งบอกได้ถึงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

2) ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น (Density) คือ หน่วยของน้ำหนักต่อปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานคือ 15 °C โดยปกติจะมีหน่วยเป็น Kilogram per Liter ที่อุณหภูมิ 15 °C

ความถ่วงจำเพาะ (Relative Density or Specific Gravity) คือ หน่วยของน้ำหนักต่อปริมาตรของเหลวที่อุณหภูมิ 15 °C เทียบกับน้ำหนักของน้ำต่อปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยปกติการรายงานผลจะมีอุณหภูมิกำกับอยู่ เช่น 60/60 °F ความถ่วง API คือ หน่วยวัดที่ได้มีการพัฒนามาจากสถาบันปิโตรเลียมของอเมริกา (America Petroleum Institute) ซึ่งค่า API Gravity จะมีความสัมพันธ์กับค่า Specific Gravity

3) ความหนืด (Viscosity)

การทดสอบความหนืดของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม หรือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่ปิโตรเลียม เป็นการทดสอบเพื่อแบ่งประเภทของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องจักร นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเงื่อนไขในการจัดเก็บ การขนย้าย เป็นต้น

4) ความดัน (Pressure)

ความดัน เนื่องจากความดันมีความสัมพันธ์กับแรงต่อพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจะทำให้ค่าความดันเปลี่ยนแปลงไปด้วย เราสามารถนำหลักการนี้ไปใช้เพื่อคำนวณหาความเร็วการไหลของของไหลได้ จากสมการของ Bernoulli ที่ว่า ณ ตำแหน่งใด ๆ ในการไหล ผลรวมของความดัน พลังงานจลน์ต่อปริมาตร และพลังงานศักย์ต่อปริมาตรจะมีค่าคงที่เสมอ ดังสมการที่ (1)

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (1)$$

เมื่อ

P คือ ความดัน มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

h คือ ความสูง มีหน่วยเป็น เมตร

v คือ ความเร็ว มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

ρ คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที²

5) อัตราการไหล (Flow Rate)

อัตราการไหล (Flow rate) คือ ปริมาณของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดใด ๆ ที่กำหนดต่อหนึ่งหน่วยเวลา หรือ ในรูปของปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลาแสดงในสมการที่ 2

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

เมื่อ

Q คือ อัตราการไหล มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

V คือ ปริมาตร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร

t คือ เวลา มีหน่วยเป็น วินาที

6) จุดไหลเท (Pour Point)

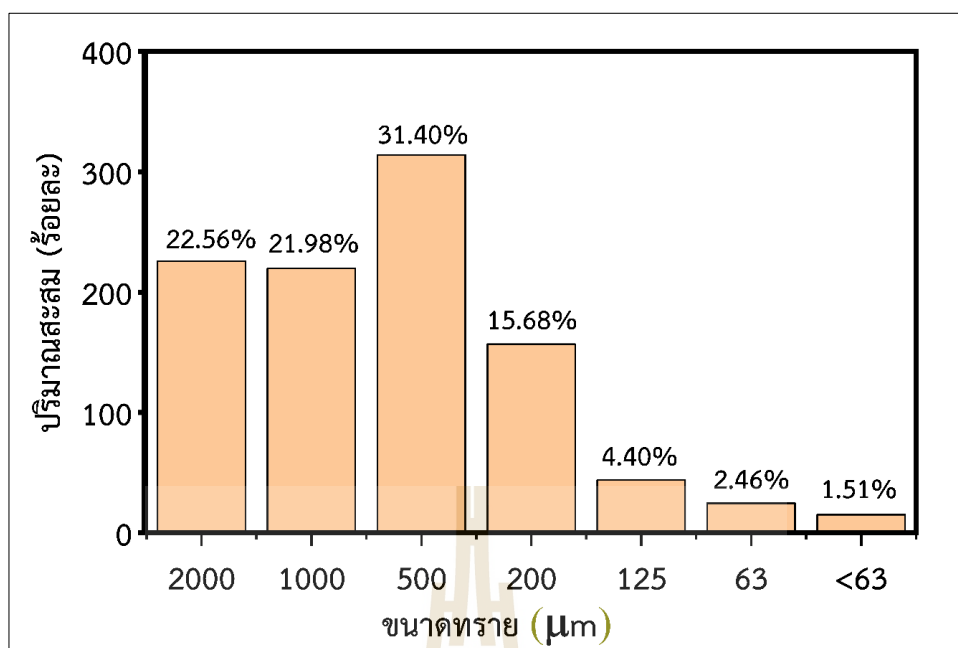
จุดไหลเท คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังเป็นของเหลวพอที่จะไหลได้ การทดสอบทำตามวิธี ASTM D 97 กล่าวคือ นำน้ำมันใส่หลอดแก้วแล้วปล่อยให้เย็นลงเรื่อย ๆ โดยระหว่างการทดสอบต้องนำน้ำมันที่เย็นตัวลงมาตรวจจนถึงจุดที่น้ำมันเริ่มแข็งตัว และไม่ไหลเมื่อถือหลอดตามแนวนอนเป็นเวลา 5 วินาที จุดไหลเทหรือจุดเริ่มไหลจะเริ่มที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ 3 °C จุดไหลเทที่วัดได้บอกให้ทราบว่า จะใช้น้ำมันในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ ณ จุดนั้นไม่ได้ เพราะน้ำมันจะไม่ไหล ไชที่มีอยู่ในน้ำมันจะแยกตัวออกมาอุดตันทางเดินและหม้อกรองทำให้อุปกรณ์ทำงานไม่ได้ จุดไหลเทจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณลักษณะของไชที่มีอยู่ในน้ำมัน ซึ่งน้ำมันที่มีปริมาณไชสูงจะมีจุดไหลเทสูง

2.3 อนุภาคทราย

Millimeters (mm)	Micrometers (μm)	Phi (φ)	Wentworth size class	Rock type
4096		-12.0	Boulder	Conglomerate/ Breccia
256		-8.0	Cobble	
64		-6.0	Pebble	
4		-2.0	Granule	
2.00		-1.0	Very coarse sand	
1.00		0.0	Coarse sand	Sandstone
1/2	500	1.0	Medium sand	
1/4	250	2.0	Fine sand	
1/8	125	3.0	Very fine sand	
1/16	63	4.0	Coarse silt	
1/32	31	5.0	Medium silt	Siltstone
1/64	15.6	6.0	Fine silt	
1/128	7.8	7.0	Very fine silt	
1/256	3.9	8.0	Clay	Claystone
0.00006	0.06	14.0		

รูปที่ 2.2 การจำแนกขนาดของตะกอนตามมาตรฐานแห่งสหรัฐอเมริกา (ASTM D 2487)

เมื่อหินตะกอนที่อยู่ระหว่างชั้นของน้ำมันดิบเกิดการผุพังหรือกร่อน เศษหินและแร่จะหลุดออกมาจากก้อนหินกลายเป็นเม็ดตะกอนแร่ประกอบหิน เช่น แร่ควอตซ์ที่ผุพังกลายเป็นเม็ดทรายที่มีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กขึ้นอยู่กับกระบวนการที่น้ำ ลม หรือธารน้ำแข็งที่มากกระทำ [10] ดังรูปที่ 2.2 รูปที่ 2.2 แสดงการจำแนกขนาดของตะกอนตามมาตรฐานแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Testing and Materials, ASTM D 2487) พบว่าทรายมีหลายขนาด และรูปที่ 2.3 แสดงปริมาณสะสมของอนุภาคทรายที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วย Sieve Analysis



รูปที่ 2.3 ปริมาณสะสมของทรายขนาดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

2.4 การป้องกันการกัดกร่อน

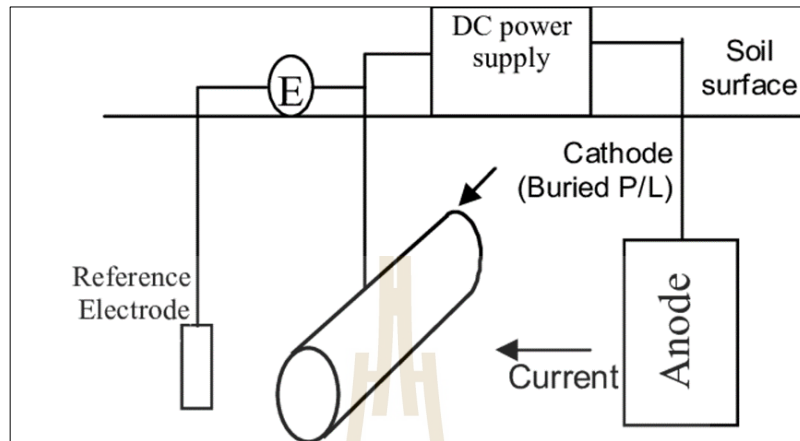
1) การป้องกันการกัดกร่อนด้วยระบบแอโนดิก

การป้องกันการกัดกร่อนแบบแอโนดิก (หรือที่เรียกว่าการยับยั้งแบบสร้างฟิล์มปกป้อง) เป็นวิธีที่ทำให้เกิดชั้นฟิล์ม Passive บนผิวโลหะผสมสำหรับป้องกันการกัดกร่อน [11]

2) การป้องกันการกัดกร่อนด้วยระบบแคโทดิก

การป้องกันการกัดกร่อนด้วยระบบแคโทดิกจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งกำเนิดภายนอก เพื่อยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะ โดยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงมีอยู่ด้วยกัน 2 แหล่งคือ 1) จากโลหะกัดกร่อน (Sacrificial Anodes) จะใช้โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าตามธรรมชาติต่ำกว่า (Anode) มาติดกับโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าตามธรรมชาติสูงกว่า (Cathode) โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน ส่วนโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจะได้รับการป้องกันและไม่เกิดการกัดกร่อน โดยกระแสไฟฟ้าจะวิ่งจากแอโนด (Anode) ไปสู่แคโทด (Cathode) ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแอโนด และ แคโทด ที่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าหรือครบวงจรไฟฟ้า โลหะป้องกันการกัดกร่อนที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ สังกะสี อลูมิเนียม แมกนีเซียมและเหล็ก และ 2) ตู้จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) กระแสไฟฟ้าที่ใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนไม่ได้มาจาก แอโนด แต่มาจากตู้จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สามารถมีแหล่งกำเนิดได้จากหลายแหล่ง คือ ไฟฟ้ากระแสสลับจากเครื่องแปลงไฟฟ้า แบตเตอรี่ โซลาร์เซลล์ หรือ กังหันลม เป็นต้น ระบบ ICCP จะเหมาะในการป้องกันการกัดกร่อนให้กับโครงสร้างโลหะที่ต้องการกระแสไฟฟ้าปริมาณมาก โครงสร้างโลหะที่ต้องการระยะเวลาในการป้องกันสนิมยาวนาน [12] ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการทำงานของ Impressed

Current Cathodic Protection (ICCP) กระแสไฟฟ้าที่ใช้เพื่อป้องกันการเกิดสนิมมาจากตู้จ่ายไฟฟ้า ที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับนำมาผ่านเครื่องแปลงไฟฟ้าเพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4

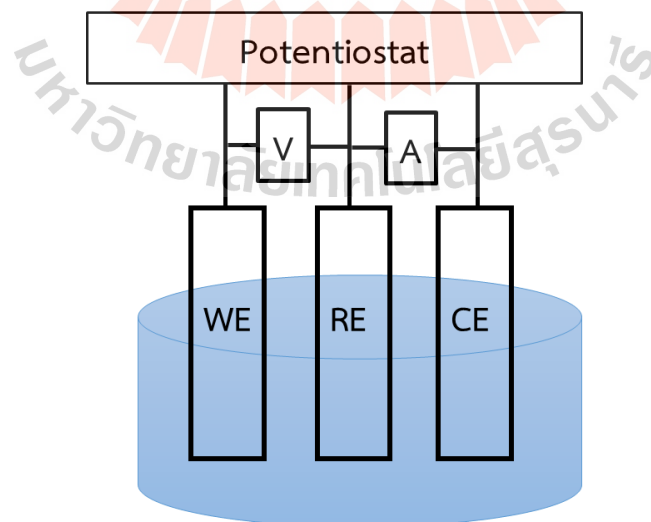


รูปที่ 2.4 การป้องกันการกัดกร่อนระบบแคโทดิกที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งกำเนิดภายนอก

[13]

2.5 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยหลักทางไฟฟ้าเคมีและการประมวลผลที่ได้

การวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนสามารถทำได้ โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat Analyzer) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบสามขั้ว

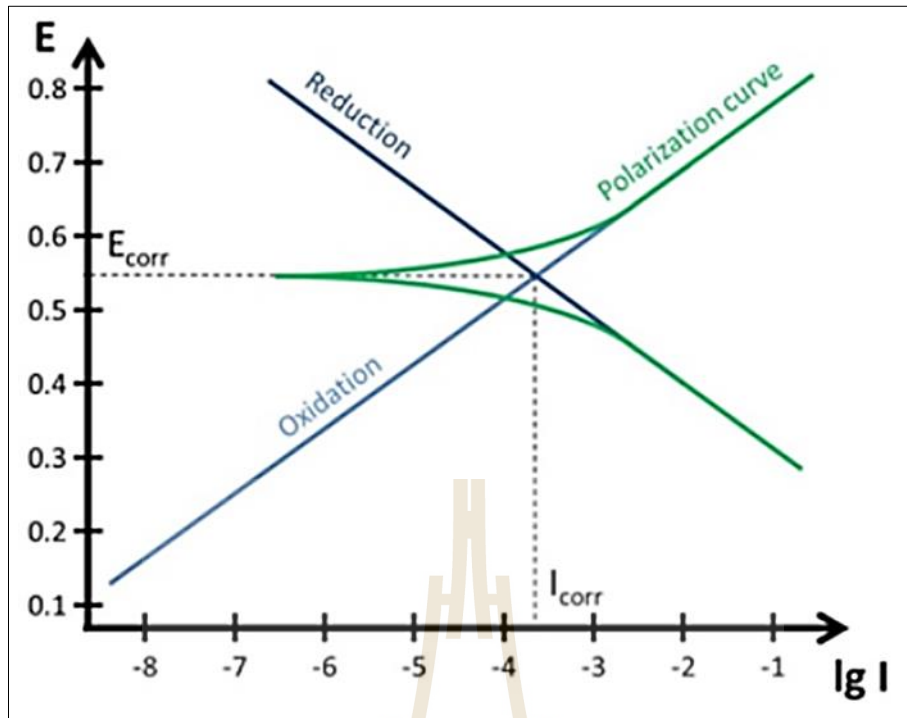
จากรูปที่ 2.5 เห็นได้ว่าการวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าโดยเครื่องโพเทนชิโอสแตททำ
ได้ต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด 3 ชนิด เพื่อจัดเตรียมเซลล์ทดสอบการกัดกร่อน
(Corrosion cell) แบบสามขั้วไฟฟ้า (Three electrode cell) คือ

1) ขั้วไฟฟ้าใช้งาน หรืออิเล็กโทรดใช้งาน (Working electrode, WE) คือ โลหะที่
ต้องการทดสอบการกัดกร่อน

2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง หรืออิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode, RE) เป็นขั้วไฟฟ้า
หรืออิเล็กโทรดที่มีเสถียรภาพสูง วัดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดใช้งานระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี
ตัวอย่างของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงหรืออิเล็กโทรดอ้างอิงที่นิยมใช้ได้แก่ Ag/AgCl, Saturated calomel
electrode (SCE) และ Cu/CuSO₄ เป็นต้น

3) ขั้วไฟฟ้ากระแส หรืออิเล็กโทรดกระแส (Counter electrode or Auxiliary
electrode, CE) มักทำจากวัสดุเฉื่อย (Inert materials) ได้แก่ แพลทตินัม (Pt) ทองคำ (Au) แกรไฟต์
(Graphite)

จากค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ เมื่อนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์
ระหว่างค่าทั้งสองจะได้กราฟที่เรียกว่า กราฟเส้นโพลาริเซชัน (Polarization Curve) ดังแสดงในรูปที่
2.6 ซึ่งจากกราฟโพลาริเซชันสามารถหาค่าสำคัญที่มีความหมายทางการกัดกร่อนได้ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า
การกัดกร่อน (Corrosion Potential, E_{corr}) และกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion Current, I_{corr})
จากรูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยา
แคโทดิกบนพื้นผิวของโลหะที่กำลังเกิดการกัดกร่อน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าที่ผิว ความต่าง
ศักย์ของขั้วทั้งสองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงดังในเส้นกราฟแอโนดิก (Anodic Curve) และเส้นกราฟแค
โทดิก (Cathodic Curve) ตามลำดับ โดยที่ความต่างศักย์ของแอโนดจะเปลี่ยนค่าไปในทางบวกส่วน
ความต่างศักย์ของแคโทดจะเปลี่ยนค่าไปในทางลบ ในลักษณะเช่นนี้แสดงถึงการเกิดโพลาริเซชันของ
ขั้วทั้งสอง สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้จากจุดตัดของเส้น
ความชันของเส้นกราฟแอโนดและเส้นกราฟแคโทด [14-15] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ASTM G3) [16]

เมื่อทราบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนแล้ว สามารถหาอัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate) ได้จากสมการที่ 3 ตามมาตรฐาน ASTM G102-89 [17]

$$CR = \frac{0.00327 \times EW \times i_{corr}}{\rho} \quad (3)$$

เมื่อ

- CR คือ อัตราการกัดกร่อนมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี (mm/yr)
- i_{corr} คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีหน่วยเป็น ไมโครแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
- EW คือ น้ำหนักสมมูล มีค่า 28.32 ตามมาตรฐาน ASTM G102-89
- ρ คือ ความหนาแน่น เช่น เหล็กกล้า AISI 1045 มีค่า 7.807 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ($7.807 \text{ g}/\text{cm}^3$) และเหล็ก Tube มีค่า 7.814 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ($7.814 \text{ g}/\text{cm}^3$) ด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น (Radwag AS220 R2+Density Kit, Poland)

โดยทั่วไป อัตราการกัดเซาะ-การกัดกร่อน นิยมแสดงเป็น “มิลลิเมตรต่อปี” (mm/yr) สามารถหาได้ จากมาตรฐาน ASTM G119 [18]

$$T = E_0 + C_0 + S \quad (4)$$

และ

$$S = \Delta C_e + \Delta E_c \quad (5)$$

เมื่อ

S คือ ผลรวมองค์ประกอบของการเสริมฤทธิ์ระหว่างการกัดเซาะและการกัดกร่อนมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี (mm/yr)

ΔC_e คือ การเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดกร่อนที่มีผลกระทบจากการกัดเซาะมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี (mm/yr)

ΔE_c คือ การเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดเซาะที่มีผลกระทบจากการกัดกร่อนมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี (mm/yr)

ผลรวมขององค์ประกอบกัดเซาะ (Total erosion components, E_c) และองค์ประกอบกัดกร่อน (Total corrosion components, C_w) หาได้จากสมการที่ 6 และ สมการที่ 7 ดังนี้

$$E_c = E_0 + \Delta E_c \quad (6)$$

$$C_w = C_0 + \Delta C_e \quad (7)$$

การคำนวณอัตราการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน (Pure erosion rate, E_0) และผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน (Total erosion-corrosion, T) ดังแสดงในสมการที่ 8

$$E_0 = \left[\frac{\text{mass loss, } g}{\text{exposed area of specimen, } mm^2 \times \text{density, } \left(\frac{g}{mm^3}\right) \times \text{time, } h} \right] \times 24 \frac{h}{day} \times 365 \frac{day}{year} \quad (8)$$

เมื่อ

Mass loss คือ มวลที่สูญเสียไปของชิ้นงานหลังการทดสอบมีหน่วยเป็นกรัม (g)

Exposed area of specimen

คือ พื้นที่ชิ้นงานที่สัมผัสสารละลาย ในการทดสอบครั้งนี้ มีค่าเท่ากับ 4938.2 ตารางมิลลิเมตร (4938.2 mm²)

Density คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยเหล็กกล้า AISI 1045 มีค่า 7.807 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (7.807 g/cm³) และเหล็กTube มีค่า 7.814 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (7.814 g/cm³) ด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น (Radwag AS220 R2+Density Kit, Poland)

Time คือ เวลาที่ใช้ทดสอบ ในการทดสอบครั้งนี้ใช้เวลาเท่ากับ 2 ชั่วโมง (2 hrs.)

2.6 การทบทวนวรรณกรรม (reviewed literature)

การกัดเซาะ-การกัดกร่อนของท่อผลิตน้ำมันดิบทำให้เกิดความเสียหายและการสูญเสียของเนื้อวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งในท่อผลิตน้ำมันในการผลิตปิโตรเลียม

Hamzah, R., Stephenson, D.J., Strutt, J.E. (1995) [19] ศึกษาปัญหาที่เกิดจากการกัดเซาะ-การกัดกร่อนในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม โดยจำลองโปรแกรมเพื่อศึกษาการเกิดร่วมกันระหว่างการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของเหล็กกล้า C-Mn ที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อม CO₂ แบบเปียกและแบบแห้ง ในสภาวะการผลิตปิโตรเลียม ใช้ทรายขนาด 50-300 ไมโครเมตรร่วมกับการเปลี่ยนมุมตกกระทบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการทำงานร่วมกันระหว่างการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ความเสียหายจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จากแค่การกัดเซาะหรือการกัดกร่อนเพียงอย่างเดียว โดยเมื่อปริมาณทรายเพิ่มมากขึ้นจะเพิ่มอัตราการสูญเสียเนื้อโลหะ อัตราการกัดเซาะจะกระตุ้นการกัดกร่อนให้สูงขึ้นเมื่อทดสอบในสิ่งแวดล้อมของเหลว และที่ความเร็วสูงสุดมากกว่า 50 เมตรต่อวินาที การกัดเซาะเป็นปัจจัยหลักที่สร้างความเสียหาย

Yang, Y., Cheng Y.F. (2012) [20] ศึกษาผลของตัวแปรที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมการกัดเซาะ-กัดกร่อนของเหล็กกล้า X65 ได้แก่ ความเข้มข้นของทราย ความเร็วในการไหลของสารละลาย และมุมตกกระทบในสารละลายน้ำมัน-ทรายโดยใช้เครื่องทดสอบระบบ Jet loop ประเมินความเสียหายด้วย Weight-loss และ Polarization curve และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วย SEM โดยกลไกการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของเหล็กประกอบกับการกัดเซาะร่วมกับการกัดกร่อน การกัดกร่อนที่ปราศจากการกัดเซาะ และการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน การเพิ่มความเข้มข้นของทรายและความเร็วในการไหลทำให้อัตราการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของโลหะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มขนาดของมุมตกกระทบส่งผลให้อัตราการกัดเซาะ-การกัดกร่อนลดลง เมื่อศักย์ไฟฟ้าของเหล็กมีค่าเป็นลบ การกัดเซาะมีส่วนสำคัญต่อการสร้างความเสียหายมากโดยเฉพาะที่ความเร็วการไหลสูง ที่ศักย์ไฟฟ้าเชิงบวก การกัดกร่อนมีส่วนสำคัญต่อกระบวนการกัดเซาะ-การกัดกร่อนโดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ ในการศึกษาของ Yang, Y., Cheng Y.F. (2012) มุ่งหวังเพื่อสร้าง แผนที่แสดงการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

เพื่อแสดงถึงกลไกของกระบวนการการกัดเซาะ-การกัดกร่อนที่ขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าของเหล็กและความเร็วการไหลของสารละลายและการทำงานร่วมกันของการกัดเซาะและการกัดกร่อนส่งผลต่อความเสียหายของวัสดุมากที่สุด

Elemuren, R., Tamsaki, A., Evitts, R., Oguocha, I.N.A., Kennell, G., Gerspacher, R., Odeshi, A. (2015) [21] ศึกษาการกัดเซาะ-การกัดกร่อนที่ใช้เวลา 5 วัน เพื่อตรวจสอบผลของความเข้มข้นของอนุภาคที่มีต่อความหยาบผิวของท่อที่ทำจากเหล็กกล้า AISI 1018 โดยทดลองในระบบ Flow loop ที่มีความเข้มข้นอนุภาคทราย 10, 20, หรือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) ในสารละลายน้ำเกลือที่มีความเร็วในการไหล 4 เมตรต่อวินาที (m/s) วิเคราะห์ความหยาบผิวด้วย Optical Profilometry analysis และ SEM พบความเสียหายบริเวณทางเข้าที่เกิดจากอนุภาคทรายที่ความเข้มข้นต่ำ ส่วนบริเวณข้อต่อและบริเวณทางออกความเสียหายเกิดจากอนุภาคที่ความเข้มข้นสูง โดยทั่วไปพบพื้นที่ผิวขรุขระเกิดจากการสูญเสียมวล โดยปริมาณการสูญเสียมวลของวัสดุนั้น มีอิทธิพลจากความแข็งของวัสดุ จากงานวิจัยเบื้องต้นสรุปได้ว่าความขรุขระของพื้นผิวด้านในท่อหลังจากทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อนขึ้นอยู่กับตำแหน่งของมุมที่ตกกระทบและความเข้มข้นของอนุภาคทราย โดยบริเวณมุมงอที่ความเข้มข้นทราย 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) ทำให้เกิดการขีดสี สีทึบสูงสุดโดยบริเวณที่มีความแข็งผิวสูงการสีทึบจะลดลง

บทที่ 3

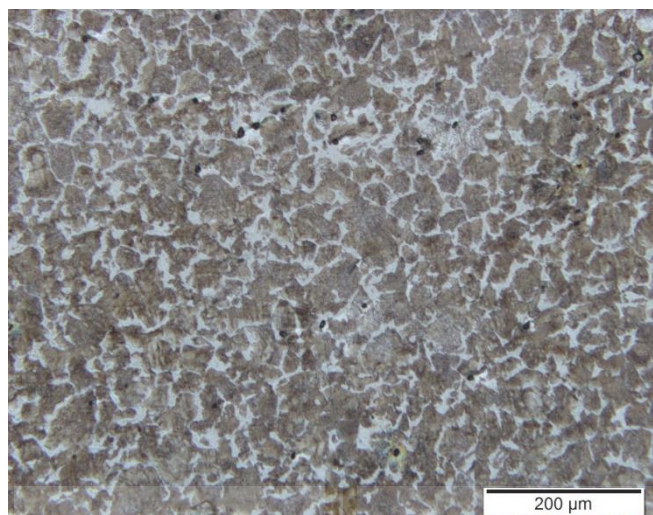
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ

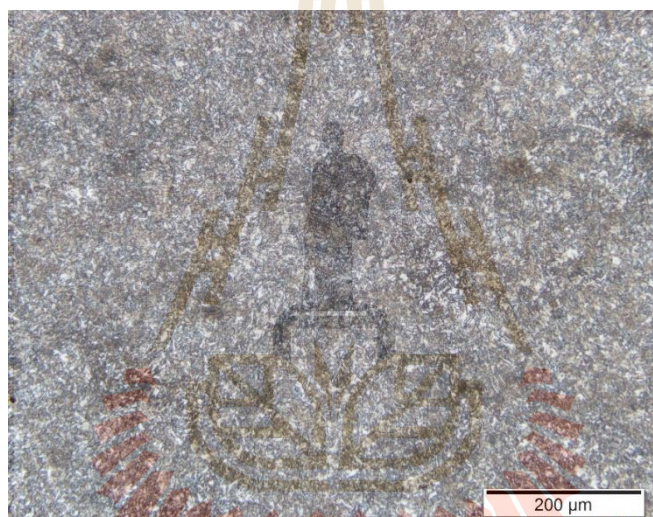
โลหะที่ใช้ในการศึกษา คือ เหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็กจากแหล่งขุดเจาะน้ำมัน ลานกระบือ (Tube) โดยตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Optical emission spectroscopy และค่าความแข็งเครื่อง Rockwell hardness test ใช้หัวบอลขนาด 1/16 นิ้ว ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1 และโครงสร้างจุลภาคตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Olympus BX51M) แสดงในรูปที่ 3.1 พบว่าชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็กจากลานกระบือ โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งของเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็ก (Tube) จากแหล่งขุดเจาะน้ำมันลานกระบือ

ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)							ความแข็ง
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Fe	
AISI 1045	0.4700	0.2523	0.7168	0.0117	0.0033	0.0053	balance	92.73
Tube	0.4696	0.3449	0.8764	0.0157	0.0298	0.0087	balance	96.80



AISI 1045



Tube

รูปที่ 3.1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็ก

3.2 สารละลายและสารเคมี

3.2.1 น้ำมันดิบ

น้ำมันดิบที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มาจากแหล่งน้ำมันฝาง ศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ กรมการพลังงานทหาร อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันดิบได้ผล ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันดิบจากศูนย์พัฒนาปิโตรเลียมภาคเหนือ กรมการพลังงานทหาร อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ [22]

คุณสมบัติที่ตรวจสอบ	ค่าคุณสมบัติที่ตรวจสอบได้	เทคนิคที่ใช้ตรวจสอบ
จุดไหลเท	36 °C	ASTM D97
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	7.41±0.02	pH meter
ความหนืด	4.7 centipoise	Marsh funnel ASTM D6910/D6910M
ความถ่วงจำเพาะ	0.86	Mud balance ASTM D4380
อัตราการไหล	3.81 × 10 ⁻⁴ ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที	การคำนวณ
คาร์บอน	70.61 ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D5291-16
ไฮโดรเจน	12.92 ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D5291-16
ไนโตรเจน	0.32 ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D5291-16
ซัลเฟอร์	0.20 ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D4294-16e1
ออกซิเจน	15.93 ร้อยละโดยน้ำหนัก	การคำนวณ
เถ้า	0.02 ร้อยละโดยน้ำหนัก	ASTM D482-13
ปริมาณน้ำ	16 ร้อยละปริมาตร	ASTM D95-13
Ca ²⁺	40 มิลลิกรัม	ASTM D6470-99 (R15)
Na ⁺	28 มิลลิกรัม	ASTM D6470-99 (R15)
K ⁺	6 มิลลิกรัม	ASTM D6470-99 (R15)
Cl ⁻	16 มิลลิกรัม	UOP 389-04
HCO ₃ ⁻	น้อยกว่า 0.01 ร้อยละโดยน้ำหนัก	Potentiometric method

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

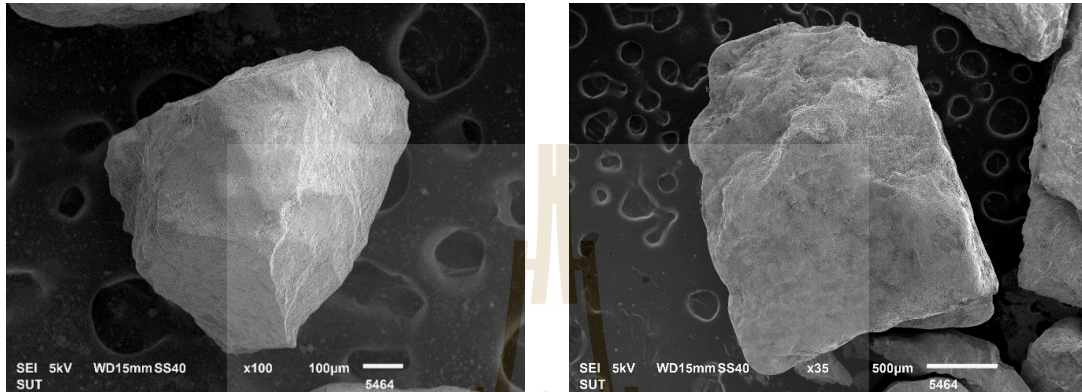
ก) สารเคมีสำหรับการเตรียมตัวอย่าง

- กรดไนโตรล ใช้สำหรับการกัดผิวหน้าชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็ก Tube

- อะซิโตน (CH₃COCH₃) เอทานอล และน้ำดีไอ ใช้สำหรับทำความสะอาดชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

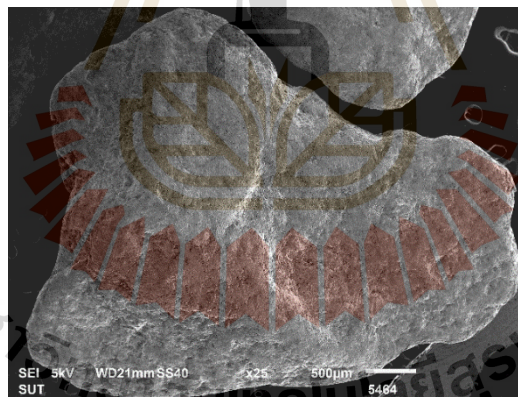
3.3 ททราย

อนุภาคทรายที่ใช้ในการทดสอบมาจากหลุมขุดเจาะน้ำมันดิบอำเภอฝาง จังหวัด เชียงใหม่ โดยใช้ทราย 3 ขนาดคือ 500 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งทราย 3 ขนาดดังกล่าวเป็นขนาดทรายที่พบจำนวนมากในหลุมขุดเจาะน้ำมันดิบ โดยแยกขนาดอนุภาคทราย ด้วยเครื่อง Sieve analysis ตามมาตรฐาน ASTM E11



500 ไมโครเมตร

1000 ไมโครเมตร



2000 ไมโครเมตร

รูปที่ 3.2 รูปร่างและขนาดอนุภาคทราย: 500 1000 และ 2000 ไมโครเมตร

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามลักษณะการใช้งาน

ดังนี้

3.4.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างก่อนทดสอบการกัดกร่อน

ก) เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ METKON FORCIPOL 2V GRINDER POLISHER ใช้เป็นอุปกรณ์ในการขัดพื้นผิวชิ้นงานให้ได้ความหยาบผิวที่ต้องการ ก่อนเข้าสู่กระบวนการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อนดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุนยี่ห้อ BUEHLER รุ่น ECOMET 6

ข) กระดาษทรายเบอร์ 100 และ 180 ใช้ในการขัดผิวชิ้นงานดังแสดงในรูปที่

3.4



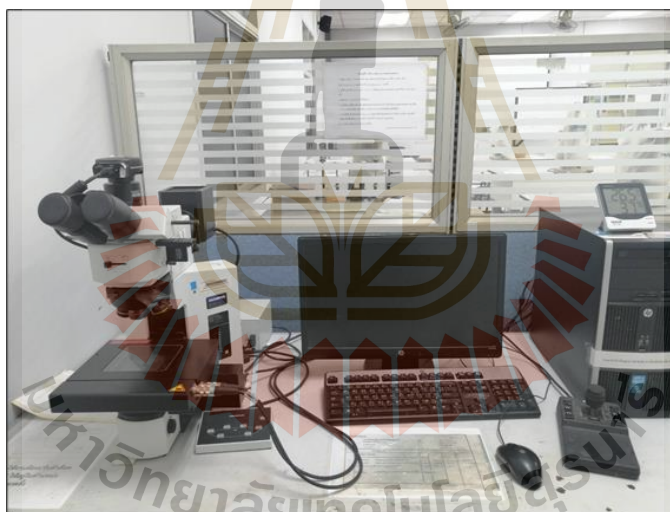
รูปที่ 3.4 กระดาษทรายที่ใช้ในการขัดผิวชิ้นงาน

ค) เครื่องวัดความหยาบผิวแบบใช้แสงรุ่น Contour GT-K ยี่ห้อ Bruker ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ใช้วัดความหยาบผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็กจากลานกระบือ (ท่อเหล็ก Tube) ผลที่ได้จะแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความหนาแบบใช้แสง

ง) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) รุ่น Olympus BX51M ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) รุ่น Olympus BX51M

จ) เครื่อง Sieve analysis ใช้แยกขนาดอนุภาคทรายเพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณทรายในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่อง Sieve analysis

3.4.2 อุปกรณ์สำหรับทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

3.4.2.1 อุปกรณ์สำหรับทดสอบอัตราการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน (Pure erosion rate, E_0) และผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน (Total erosion-corrosion, T)

ก) Copper/Copper Sulfate Reference Electrode รุ่น RE-7 คือ อิเล็กโทรดอ้างอิงสำหรับวัดศักย์ไฟฟ้า เพื่อป้องกันการเกิดการกัดกร่อนบนพื้นผิวชิ้นงาน ใช้ในกระบวนการทดสอบอัตราการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน (Pure erosion rate, E_0) ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Copper/Copper Sulfate Reference Electrode รุ่น RE-7

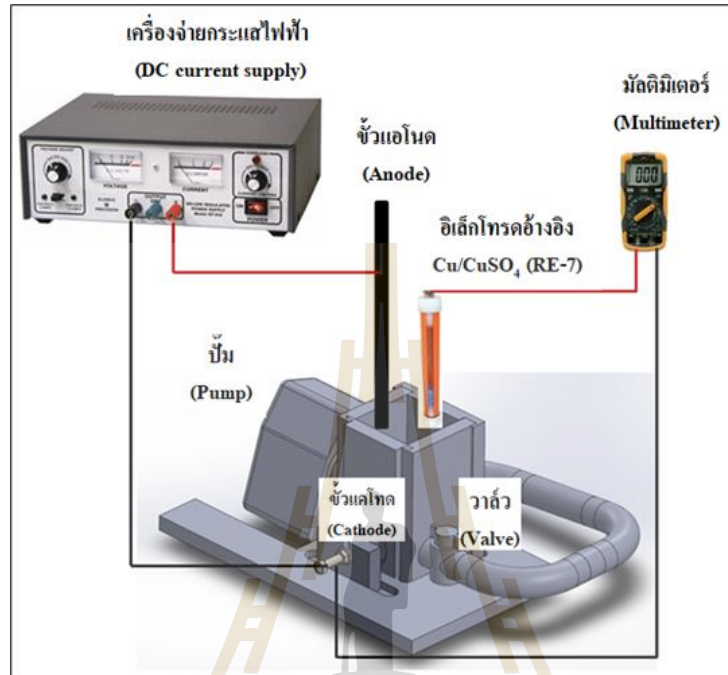
ข) DC power supply รุ่น Hi mini rectifier สำหรับป้อนความต่างศักย์ให้กับชิ้นงานและแท่งแกรไฟต์ ในกระบวนการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิก ในกระบวนการทดสอบอัตราการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน (Pure erosion rate, E_0) ดังแสดงในรูป 3.9



รูปที่ 3.9 DC power supply รุ่น Hi mini rectifier

ค) แบบจำลองการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน (Pure erosion rate, E_0) ที่ติดตั้งตู้จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Impressed current cathodic protection (ICCP) ดังแสดงในรูปที่

3.10 และผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน (Total erosion-corrosion, T) คือแบบจำลองในรูปที่ 3.10 เป็นการทดสอบด้วยระบบเจ็ทของไหลพุ่งชนพื้นผิว (Impingement jet systems) ไม่ติดตั้งตู้จ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Impressed current cathodic protection (ICCP)



รูปที่ 3.10 แบบจำลองการทดสอบอัตราการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน (Pure erosion rate, E_0) และผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน (Total erosion-corrosion, T) [22]

ง) เครื่องชั่งเชิงวิเคราะห์ ยี่ห้อ METTLER TOLEDO ใช้ชั่งมวลชิ้นงานเหล็กกล้าเกรด AISI 1045 และ เหล็ก Tube ก่อนและหลังการทดสอบ โดยจะแสดงค่าเป็นตัวเลขที่เป็นค่ามวลของวัตถุบนหน้าจอเครื่อง (5 ตำแหน่ง) ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องชั่งเชิงวิเคราะห์ ยี่ห้อ METTLER TOLEDO

3.4.2.2 อุปกรณ์สำหรับทดสอบอัตราการกัดกร่อนที่ปราศจากการกัดเซาะ (Pure corrosion rate, C_0) และองค์ประกอบการกัดกร่อนรวม (Total corrosion components, C_w)

ก) เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) ยี่ห้อ Metrohm autolab ใช้สำหรับวัดอัตราการกัดกร่อนจากค่าศักย์ไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองจะได้กราฟที่เรียกว่า กราฟเส้นโพลาริเซชัน (Polarization curve) ที่มีความหมายทางการกัดกร่อนได้ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) และ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) ดังแสดงในรูป 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat)

ข) อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน

- อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) คือ Ag/AgCl (3.0M KCl)

(Silver/Silver chloride electrode) ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 อิเล็กโทรดอ้างอิง (Ag/AgCl 3.0M KCl)

- อิเล็กโทรดวัดกระแส (Counter electrode) คือแท่งแกรไฟต์ (Graphite) ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 อิเล็กโทรดวัดกระแส แท่งแกรไฟต์ (Graphite)

- อิเล็กโทรดตัวอย่าง คือ ชิ้นงานของเหล็กกล้า AISI 1045 และ Tube ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.15

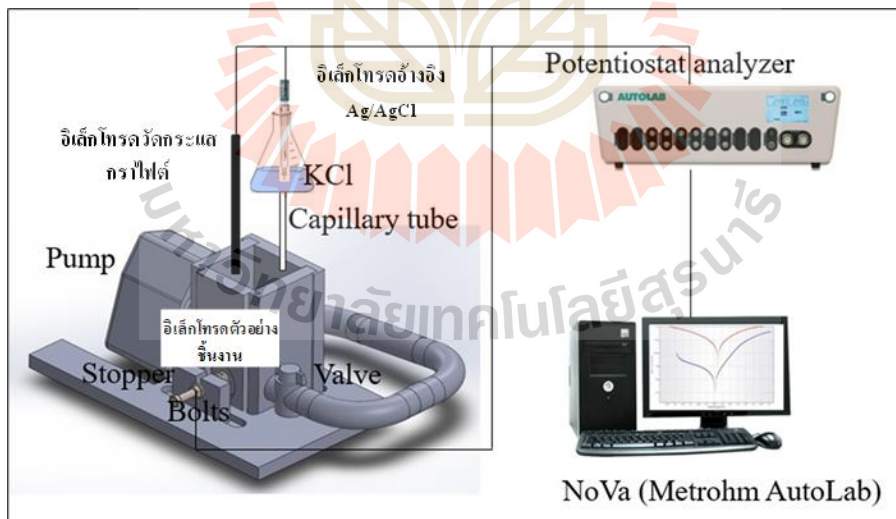


ชิ้นงาน AISI 1045

ชิ้นงาน Tube

รูปที่ 3.15 อิเล็กโทรดตัวอย่าง (Working electrode)

ค) แบบจำลองการทดสอบอัตราการกัดกร่อนที่ปราศจากการกัดเซาะ (Pure corrosion rate, C_0) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ทำการทดสอบโดยไม่เติมทรายในน้ำมันดิบ และองค์ประกอบการกัดกร่อนรวม (Total corrosion components, C_w) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ที่เติมทรายในน้ำมันดิบ



รูปที่ 3.16 แบบจำลองการทดสอบอัตราการกัดกร่อนที่ปราศจากการกัดเซาะ (Pure corrosion rate, C_0) และองค์ประกอบการกัดกร่อนรวม (Total corrosion components, C_w) [22]

3.4.3 อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบพื้นผิวและสารละลายหลังทดสอบ

ก) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6010LV ใช้ในการศึกษาร่องรอยความเสียหายบนพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า เกรด AISI 1045 และ Tube ภายหลังจากทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ข) X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบบนพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กกล้า เกรด AISI 1045 และ Tube ภายหลังจากการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน เครื่องนี้ตั้งอยู่ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

ค) Inductively couple plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES) ยี่ห้อ PerkinElmer ใช้ในการวิเคราะห์ไอออนในสารละลายน้ำแยกน้ำมันดิบภายหลังการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เครื่อง Inductively Couple Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

3.5 ขั้นตอนการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

การเตรียมผิวชิ้นงาน ขัดเตรียมผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 และ 180 เพื่อให้ได้ความหยาบผิวใกล้เคียงกับความหยาบผิวของท่อในกระบวนการผลิตน้ำมันดิบ จากนั้นทำความสะอาดผิวให้แห้งด้วยน้ำกลั่น เอทานอลและน้ำดีไอ ตามลำดับ ก่อนทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

3.5.2 ตัวแปรที่ควบคุมสำหรับการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

ก) ปริมาณทรายที่ใช้ในการทดสอบ

ทดลองหาปริมาณทรายที่ใช้สำหรับการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อนโดยใช้ระบบการทดสอบด้วยโมเดลทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยไม่ติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Impressed current cathodic protection (ICCP) ในน้ำมันดิบผสมทรายขนาด 1000 ไมโครเมตร เป็นเวลา 240 นาที (4 ชั่วโมง) เริ่มทดสอบปริมาณทรายตั้งแต่ 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึง 160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรดังแสดงในตารางที่ 3.3 พบว่า เมื่อปริมาณทรายเพิ่มขึ้น ความเสียหายเพิ่มขึ้น จนถึงที่ปริมาณทราย 120 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเกิดความเสียหายมากที่สุดและเมื่อเพิ่มปริมาณทรายไปที่ 140-160 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรความเสียหายลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณทรายเพิ่มมากขึ้นความเร็วในการไหลตัวของน้ำมันดิบในการพาอนุภาคทรายเพื่อขัดถู เสียดสีบนชิ้นงานน้อยลง ดังนั้นจึงกำหนดใช้ปริมาณทราย 120 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นเงื่อนไขในการทดสอบ [22]

ตารางที่ 3.3 แสดงความเข้มข้นทรายกับมวลที่สูญเสียไป

ความเข้มข้นทราย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	มวลที่สูญเสียไป (มิลลิกรัม)
80	0.31
100	0.34
120	0.38
140	0.18
160	0.11

ข) เวลาที่ใช้ทดสอบ

ทดลองหาเวลาสำหรับการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อนโดยใช้ระบบการทดสอบด้วยโมเดลทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยไม่ติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Impressed current cathodic protection (ICCP) ในน้ำมันดิบผสมทรายขนาด 1000 ไมโครเมตร ปริมาณความเข้มข้นทราย 120 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (18 กรัมต่อ 150

มิลลิลิตร) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.4 พบว่าเวลาเพิ่มมากขึ้น ความเสียหายก็เพิ่มมากขึ้น และที่เวลา 120 นาที เกิดความเสียหายสูงสุด และเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นจาก 180 ถึง 240 นาที ความเสียหายที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับที่เวลา 120 นาทีจึงเลือกเวลา 120 นาที (2 ชั่วโมง) เป็นเวลาสำหรับการทดสอบ [22]

ตารางที่ 3.4 แสดงเวลาทดสอบกับมวลที่สูญหายไป

เวลา (นาที)	มวลที่สูญหายไป (มิลลิกรัม)
30	0
60	0
90	0.17
120	0.33
180	0.32
240	0.33

โดยตัวแปรที่ควบคุมสำหรับการทดลองการกัดเซาะ-การกัดกร่อนในงานวิจัยฉบับนี้ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงตัวแปรที่ควบคุมสำหรับการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

ตัวแปร	การกัดเซาะ ปราศจากการกัด กร่อน	ผลรวมการกัด เซาะ-การกัด กร่อน	การกัดกร่อน ปราศจากการกัด เซาะ	องค์ประกอบรวม การกัดกร่อน
เวลา	2 ชั่วโมง			
อุณหภูมิ	50 องศาเซลเซียส			
ปริมาณทราย	18 กรัม			18 กรัม
ปริมาณน้ำมันดิบ	150 มิลลิลิตร			
ความเร็วในการ ไหล	1.4 เมตรต่อวินาที			
อัตราสแกน			1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที	

3.5.3 ขั้นตอนการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

ก) การทดสอบการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน

ติดตั้งเซลล์ทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ที่ติดตั้งการป้องกันการกัดกร่อนด้วยระบบแคโทดิก ในน้ำมันดิบปริมาณ 150 มิลลิลิตรรวมกับการเติมทรายขนาด 500 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ปริมาณทราย 18 กรัม ทดสอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายหลังจากการทดสอบทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน เอทานอลและน้ำดีไอ ตามลำดับ จากนั้นชั่งมวลที่หายไป

ข) การทดสอบผลรวมการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

ติดตั้งเซลล์ทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการกัดเซาะปราศจากการกัดกร่อน ไม่ติดตั้งระบบป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิก โดยทดสอบในน้ำมันดิบปริมาณ 150 มิลลิลิตรรวมกับการเติมทรายขนาด 500 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ปริมาณทราย 18 กรัม ทดสอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายหลังจากการทดสอบทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตน เอทานอลและน้ำดีไอ ตามลำดับ จากนั้นชั่งมวลที่หายไป

ค) การทดสอบการกัดกร่อนที่ปราศจากการกัดเซาะ

ติดตั้งเซลล์ทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ชิ้นงานทดสอบจะเป็นอิเล็กโทรดตัวอย่าง (Working electrode) ต่อเข้ากับอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) ที่เป็น Ag/AgCl และใช้แท่งกราไฟต์เป็นอิเล็กโทรดกระแส (Counter electrode) ในน้ำมันดิบปริมาณ 150 มิลลิลิตร วัดผลอัตราการกัดกร่อนโดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท ผลที่ได้จะเป็นลักษณะการวัดเส้นโพลาริเซชัน (Polarization) สามารถแปลความหมายของเส้นกราฟโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบ เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, CR)

ง) การทดสอบองค์ประกอบรวมการกัดกร่อน

ติดตั้งเซลล์ทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เช่นเดียวกับการทดสอบการกัดกร่อน โดยชิ้นงานทดสอบจะเป็นอิเล็กโทรดตัวอย่าง (Working electrode) ต่อเข้ากับอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) ที่เป็น Ag/AgCl และใช้แท่งกราไฟต์เป็นอิเล็กโทรดกระแส (Counter electrode) ในน้ำมันดิบปริมาณ 150 มิลลิลิตรรวมกับการเติมทรายขนาด 500 1000 และ 2000 ไมโครเมตร ปริมาณ 18 กรัม วัดผลอัตราการกัดกร่อนโดยใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท ผลที่ได้จะเป็นลักษณะการวัดเส้นโพลาริเซชัน (Polarization) สามารถแปลความหมายของเส้นกราฟโพลาริเซชันที่ได้จากการทดสอบ เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, CR)

3.5.4 ขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

ภายหลังจากการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ทำการตรวจสอบพื้นผิว บริเวณที่ถูกกัดเซาะ-การกัดกร่อนด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนี้

ก) นำชิ้นงานภายหลังการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

ข) นำชิ้นงานภายหลังการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของบริเวณที่ถูกกัดเซาะ-การกัดกร่อนของชิ้นงานด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

3.5.5 ขั้นตอนการตรวจสอบสารละลายหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

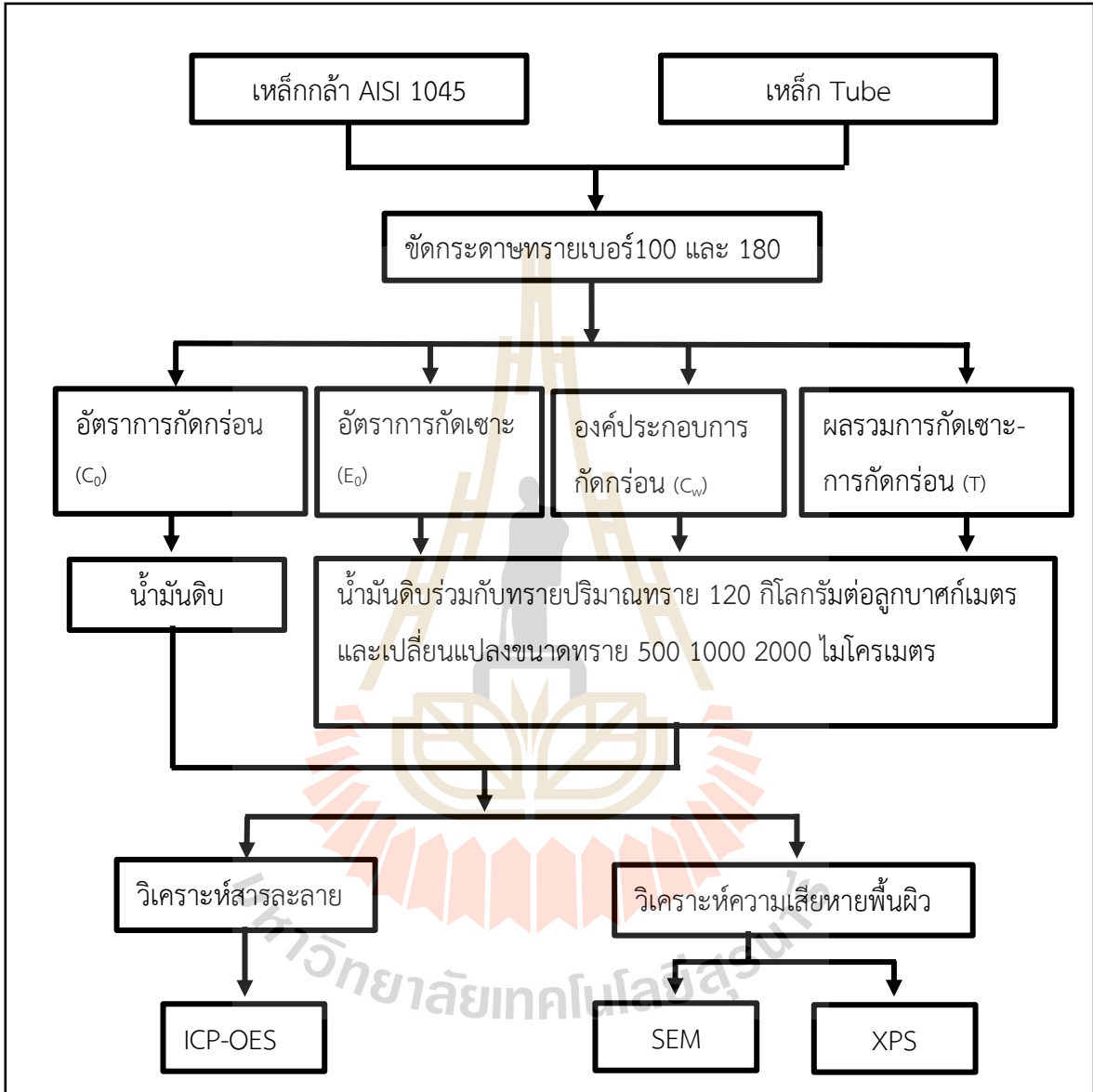
ภายหลังการทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน ตรวจสอบความเข้มข้นไอออนเหล็กในน้ำมันดิบด้วยเทคนิค Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometer.



3.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำวิจัยตามแผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย ดังแสดงรูปที่

3.20



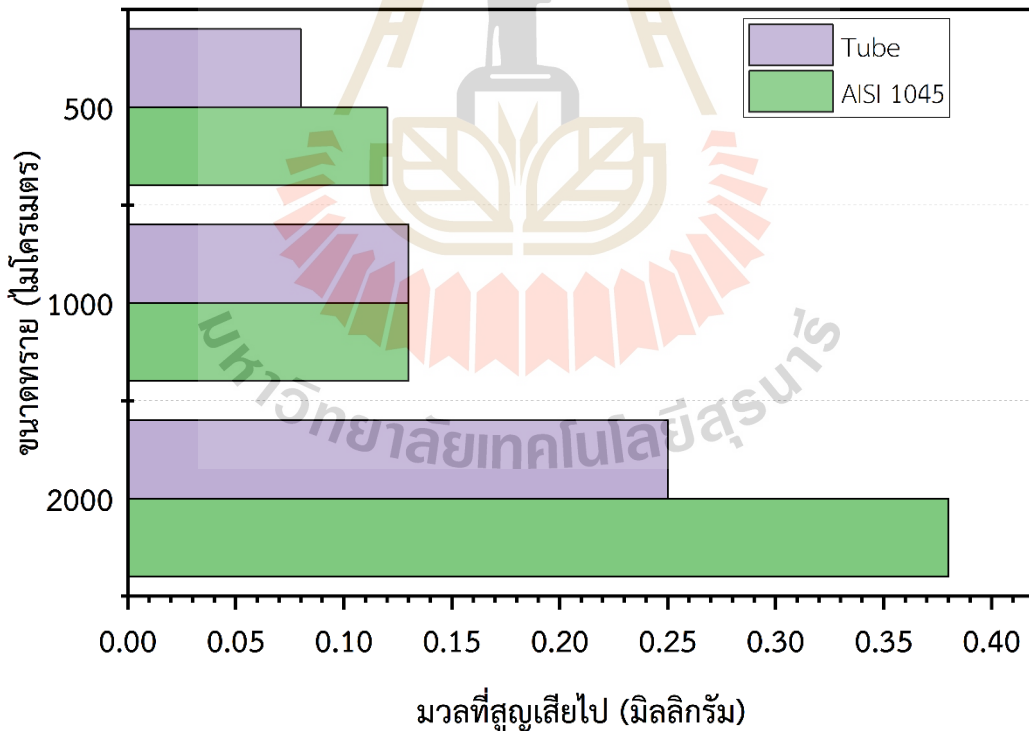
รูปที่ 3.20 แผนภาพระเบียบวิธีการทำวิจัย

บทที่ 4

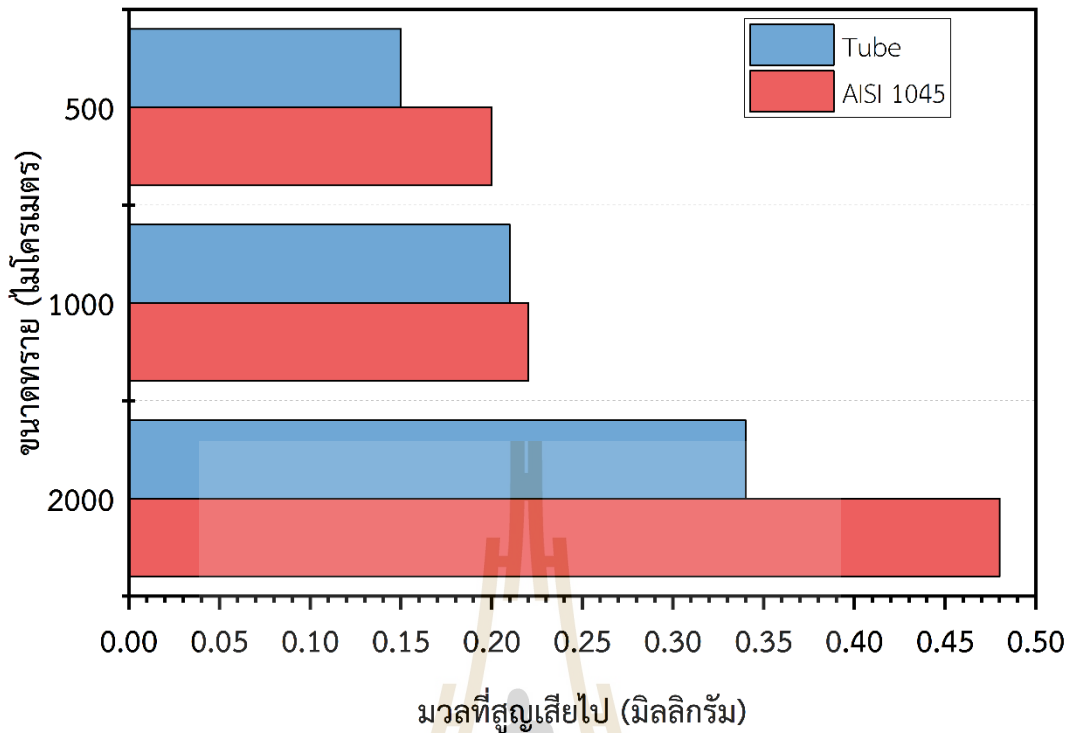
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

4.1.1 ผลทดสอบการกัดเซาะปราศจากการกัดกร่อนแสดงในรูป 4.1 และผลรวมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนแสดงในรูป 4.2 เมื่อควบคุมความเร็วคงที่ 1.4 เมตรต่อวินาที ดังนั้นขนาดของทรายจึงมีผลโดยตรงต่อโมเมนต์ที่พุ่งชนพื้นผิวชิ้นงานและทำให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิวของชิ้นงานโดยตรง กล่าวคือ เมื่อทรายขนาดเพิ่มขึ้น จะสร้างความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงานมากขึ้นตามขนาดอนุภาคทราย [23-26] โดยในเหล็กกล้า AISI 1045 มีการสูญเสียมวลสูงกว่า ท่อเหล็ก (Tube) ที่ทรายทุกๆ ขนาด เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของท่อเหล็ก Tube มีเกรนเล็กละเอียดกว่าเหล็กกล้า AISI 1045 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จึงมีความแข็งและความต้านทานการกัดเซาะมากกว่าเหล็กกล้า AISI 1045 [27]

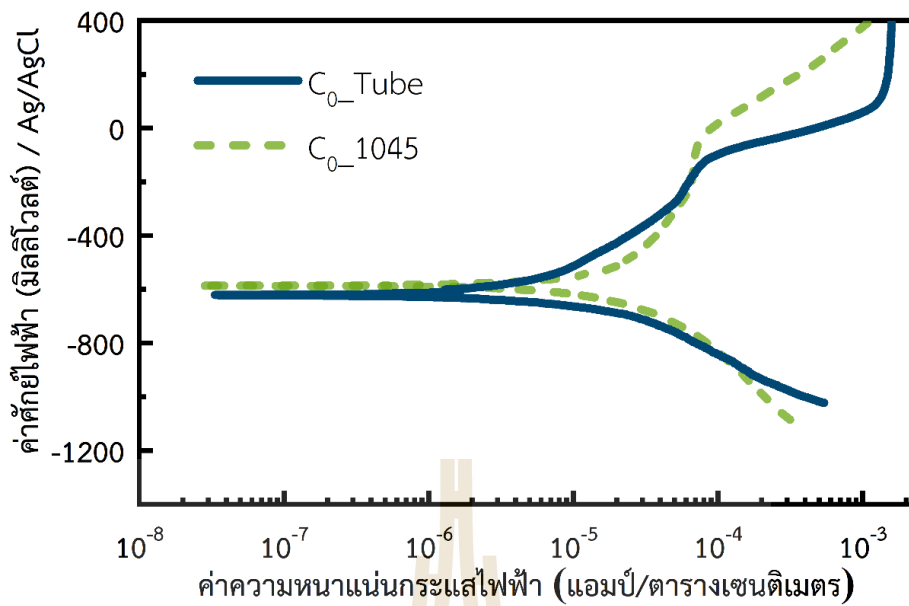


รูปที่ 4.1 มวลสูญเสียจากการทดสอบการกัดเซาะปราศจากการกัดกร่อน

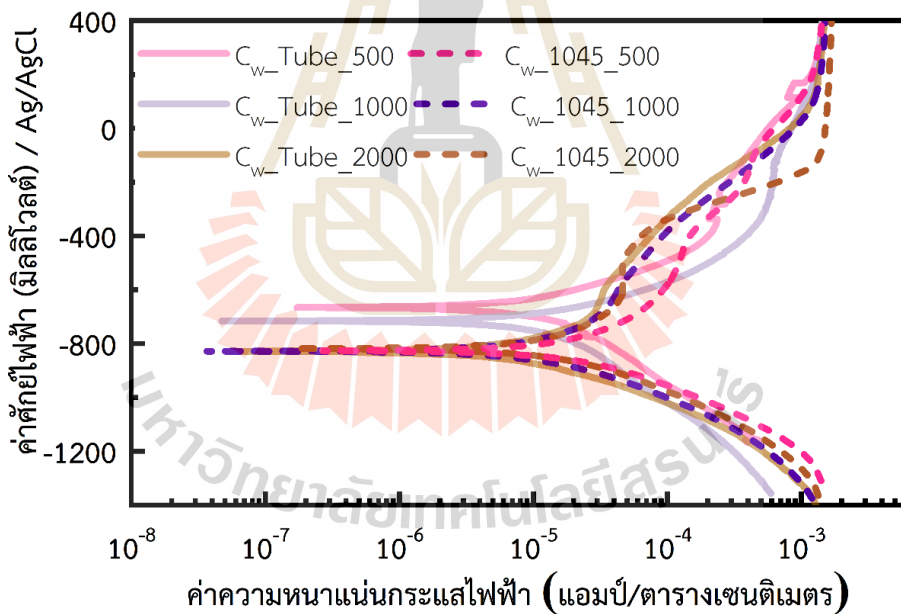


รูปที่ 4.2 มวลสูญเสียจากการทดสอบผลรวมการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

4.1.2 ผลทดสอบการกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ และผลการทดสอบองค์ประกอบ การกัดกร่อนรวม แสดงในรูป 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ค่าสำคัญที่ได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชันในรูป 4.3 และ 4.4 คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) ค่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (R_p) เส้นทาเฟลด้านแอนอด (β_a) เส้นทาเฟลด้านแคโทด (β_c) และ อัตราการกัดกร่อน (CR) ดังแสดงในตาราง 4.1 และ 4.2 พบว่าผลการทดสอบองค์ประกอบการกัดกร่อน มีอัตราการกัดกร่อนสูงกว่าอัตราการกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ เนื่องจากทราย ขัดถู เสียดสี บนพื้นผิวชิ้นงาน เกิดการทำลายฟิล์มบนผิวชิ้นงานส่งผลให้อิออนที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น และในส่วนของทดสอบองค์ประกอบการกัดกร่อนรวม ขนาดทราย 500 ไมโครเมตร เกิดการกัดกร่อนสูงสุดเนื่องจากปริมาณของทรายที่ขนาด 500 ไมโครเมตร มีจำนวนเม็ดทรายมากที่สุด เมื่อเกิดการกระทบและเสียดสีของทรายบนผิวชิ้นงานที่ทรายขนาด 500 ไมโครเมตรจึงมีจำนวนครั้งในการกระทบบนพื้นผิวมากกว่าทรายขนาดอื่น ๆ จึงเกิดความเสียหาย เสื่อมสภาพของพื้นผิวรุนแรงกว่า ส่งผลให้อิออนที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น [28-30] และจากผลการทดสอบพบว่าท่อเหล็ก Tube มีอัตราการกัดกร่อนน้อยกว่าเหล็ก AISI 1045 เนื่องจากขนาดเกรนที่เล็กกว่าส่งผลให้ความแข็งและความต้านทานการกัดกร่อนสูงมากขึ้น [27]



รูปที่ 4.3 เส้นโค้งโพลาริเซชันของการกัดกร่อนที่ปราศจากการกัดเซาะ [22]



รูปที่ 4.4 เส้นโค้งโพลาริเซชันของการทดสอบองค์ประกอบการกัดกร่อนรวม [22]

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) เส้นทาเฟลด้านแอโนด (β_a) เส้นทาเฟลด้านแคโทด (β_c) และค่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทาน (R_p) สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าชิ้นงานท่อเหล็ก (Tube) มีค่าโพลาริเซชันเนื่องจากความต้านทานสูงกว่า AISI 1045 ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของท่อเหล็ก (Tube) ต่ำกว่า AISI 1045 ดังนั้น ท่อเหล็ก (Tube) มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่า AISI 1045

ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (i_{corr}) เส้นทาเฟลด้านแอโนด (β_a) เส้นทาเฟลด้านแคโทด (β_c) และค่าโพลาไรเซชันเนื่องจากความต้านทาน (R_p) [22]

ชิ้นงาน	E_{corr}	i_{corr}	β_a	β_c	R_p
	(- mV)	($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	(mV/decade)	(mV/decade)	($\Omega \text{ cm}^2$)
C ₀ _1045	605	5.88	140.660	177.760	1320.15
C ₀ _Tube	637	2.49	139.360	138.470	2757.48
Cw_1045_500	839	6.88	127.810	122.880	900.00
Cw_1045_1000	850	6.43	145.870	178.670	1234.63
Cw_1045_2000	836	6.77	153.480	162.590	1152.84
Cw_Tube_500	688	6.65	178.580	190.630	1370.65
Cw_Tube_1000	736	6.12	124.930	135.940	1051.56
Cw_Tube_2000	796	6.29	168.560	192.950	1413.92

ค่าจากรูปที่ 4.1-4.2 และตารางที่ 4.1 นำไปคำนวณตามสมการที่ 3-8 ตามมาตรฐาน ASTM G119-09 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าสาเหตุความเสียหายที่ส่งผลต่อท่อเหล็ก (Tube) และ AISI 1045 เรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้ดังนี้ ผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน กัดเซาะปราศจากการกัดกร่อน องค์ประกอบรวมการกัดกร่อน และการกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ การกัดเซาะได้รับอิทธิพลจากขนาดของอนุภาคทราย กล่าวคือ เมื่อทรายมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้โมเมตัมพุ่งชนพื้นผิวชิ้นงานมีค่ามากขึ้น พื้นผิวชิ้นงานจึงถูกกัดเซาะมากขึ้น และยังเปิดโอกาสให้ผิวเปลือยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำได้ง่ายขึ้น การกัดกร่อนเกิดจากจากคลอไรด์ไอออน น้ำ และออกซิเจนที่ละลายในน้ำมันดิบทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีกับพื้นผิวชิ้นงาน นอกจากนี้การกัดเซาะจะรุนแรงหากจำนวนเม็ดทรายและจำนวนครั้งที่เม็ดทรายกระทบมากขึ้น [28-30]

ตารางที่ 4.2 ผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน การกัดเซาะปราศจากการกัดกร่อน การกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ และองค์ประกอบการกัดกร่อนรวม [22]

ชิ้นงาน	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)						
	T	E_0	C_0	C_w	S	ΔC_e	ΔE_c
1045_500	0.25512	0.15307	0.06975	0.08161	0.03230	0.01186	0.02044
1045_1000	0.28063	0.16583	0.06975	0.07627	0.04505	0.00652	0.03853
1045_2000	0.61229	0.48473	0.06975	0.08031	0.05781	0.01056	0.04725
Tube_500	0.19117	0.10196	0.02951	0.07881	0.05970	0.04930	0.01040
Tube_1000	0.26764	0.16568	0.02951	0.07253	0.07245	0.04302	0.02943
Tube_2000	0.43332	0.31861	0.02951	0.07454	0.08520	0.04504	0.04016

4.2 การวิเคราะห์สารละลายหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

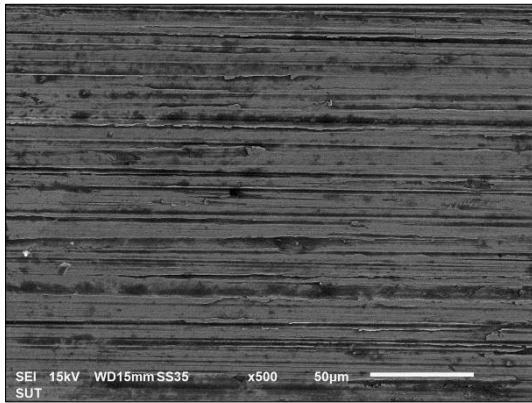
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณความเข้มข้นไอออนเหล็กที่ตรวจพบของ AISI 1045 และ ท่อเหล็ก (Tube) ที่ทดสอบในน้ำมันดิบหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อนด้วยเทคนิค ICP-OES ก่อนทดสอบ ICP-OES ต้องแยกน้ำออกจากน้ำมันดิบด้วยวิธี Free water method จากนั้นนำไปย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 65 โดยปริมาตร ด้วยไมโครเวฟ เพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันตามมาตรฐาน U.S. EPA Method 3051A จากผลความเข้มข้นไอออนเหล็กแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่ามีความสอดคล้องกับค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นตามตารางที่ 4.2 คือ ผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน มีความเข้มข้นของไอออนเหล็ก > การกัดเซาะปราศจากการกัดกร่อน > องค์ประกอบการกัดกร่อนรวม > การกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ เนื่องจากผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อนนั้นไม่ได้ป้องกันการกัดกร่อนด้วย ICCP แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้ระบบการป้องกันการกัดกร่อนแบบ ICCP ช่วยลดความเสียหาย และการเสื่อมสลายของท่อเหล็กได้ และผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน การกัดเซาะปราศจากการกัดกร่อน มีความเข้มข้นของไอออนเหล็กเพิ่มขึ้นตามขนาดทรายอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่า ผลทดสอบองค์ประกอบการกัดกร่อนรวมที่ทรายขนาดเล็กที่สุด เกิดอัตราการกัดกร่อนมากที่สุด มีความเข้มข้นไอออนเหล็กสูงกว่าการกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ ซึ่งสอดคล้องกับผลการกัดกร่อนในตารางที่ 4.2 [28]

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นของปริมาณไอออนเหล็กหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน [22]

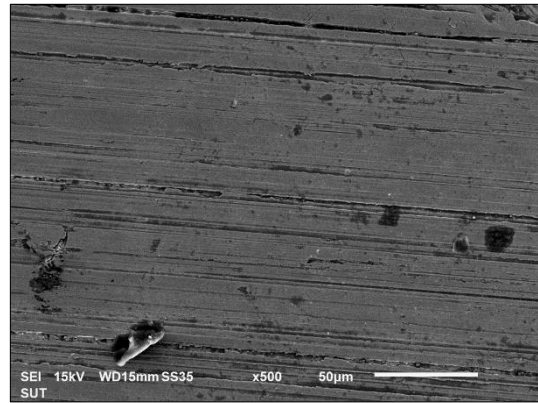
ชิ้นงาน	ความเข้มข้นไอออนเหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	T	E_0	C_0	C_w
1045	-	-	8.96	-
Tube	-	-	2.95	-
1045_500	42.79	25.82	-	18.86
1045_1000	46.58	30.83	-	15.03
1045_2000	77.86	69.52	-	18.22
Tube_500	35.69	19.42	-	16.11
Tube_1000	44.20	27.38	-	10.43
Tube_2000	65.11	49.64	-	12.52

4.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

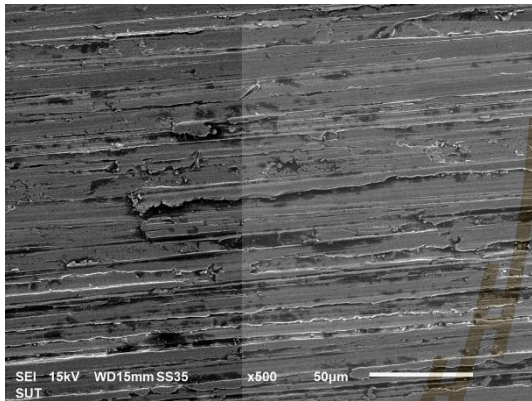
4.3.1 การตรวจสอบลักษณะความเสียหายของพื้นผิวหลังการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน นำชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็ก (Tube) ที่เสียหายน้อยสุดและมากที่สุด ไปตรวจสอบพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5-4.6 โดยในรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะพื้นผิวชิ้นงานจากผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน และรูปที่ 4.6 แสดงการกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ พบว่าเหล็กกล้า AISI 1045 มีสภาพความเสียหายบนพื้นผิวมากกว่าท่อเหล็ก (Tube)



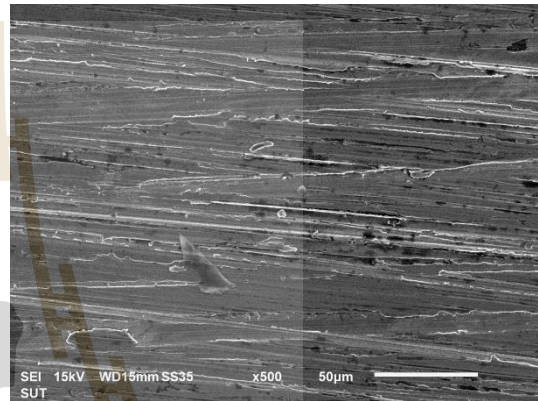
T_1045_500



T_Tube_500

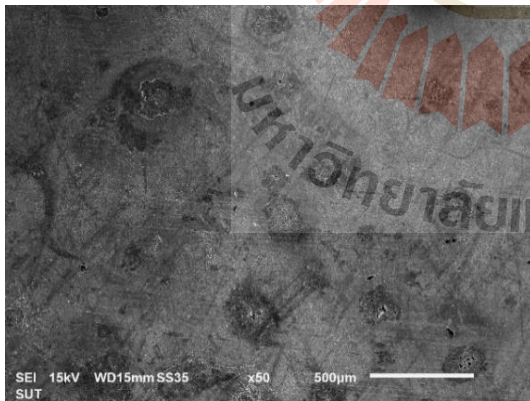


T_1045_2000

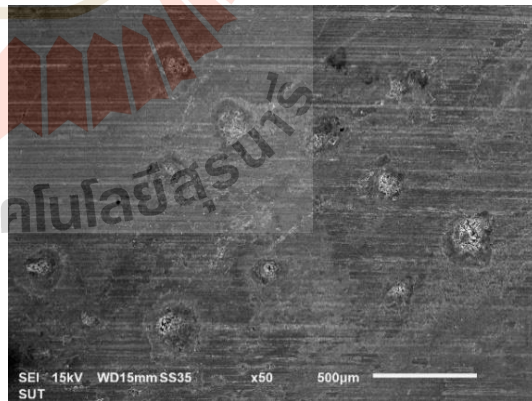


T_Tube_2000

รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานหลังทดสอบ ผลรวมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อน



C₀_1045



C₀_Tube

รูปที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานหลังทดสอบการกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ

4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวภายหลังจากทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อ

เหล็ก (Tube) ในน้ำมันดิบร่วมกับการเปลี่ยนขนาดทราย นำชิ้นงานหลังทดสอบการกัดเซาะปราศจากการกัดกร่อน การกัดกร่อนปราศจากการกัดเซาะ และองค์ประกอบของการกัดกร่อนรวมที่เกิดความเสียหายมากที่สุดและน้อยที่สุด ไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวจำนวน 4 ธาตุ ด้วยเทคนิค XPS คือ

- 1) C คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันดิบ และบ่งชี้การปนเปื้อนบนพื้นผิว
- 2) Fe เหล็กเป็นองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงาน AISI 1045 และ ท่อเหล็ก (Tube)
- 3) Si ซิลิคอนเป็นองค์ประกอบทราย
- 4) O บ่งชี้การเกิดสารประกอบออกซิเจนบนพื้นผิว

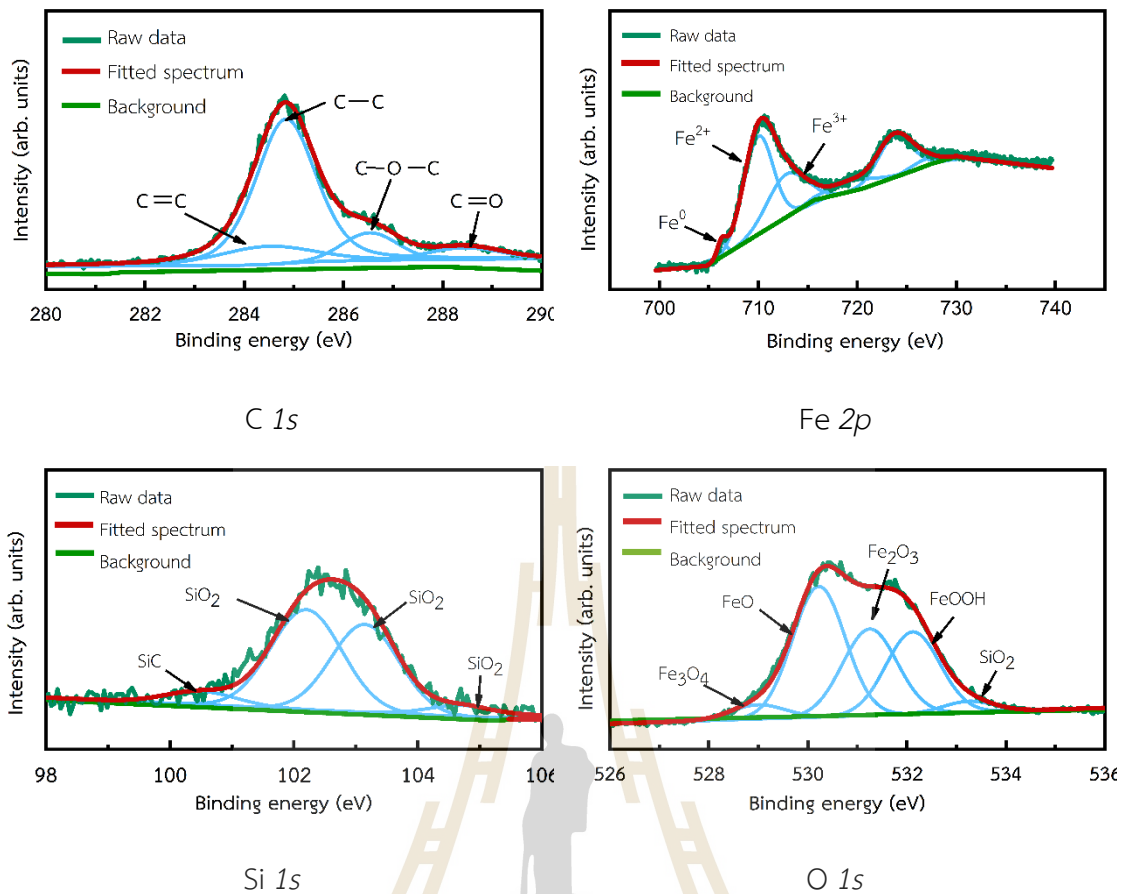
รูป 4.7 แสดงตัวอย่างการจำแนกจุดสูงสุดของกราฟ (XPS-fitted curve) จากเทคนิค XPS บนพื้นผิวชิ้นงานด้วยโมเดล Gaussian-Lorentzian line shapes [31-34] พบว่า

1) องค์ประกอบบนพื้นผิวของคาร์บอน (C1s) ที่ตำแหน่ง 283.4 284.2 285.0 286.0 และ 288.5 อิเล็กตรอนโวลต์ บ่งชี้โลหะคาร์ไบด์ (Metal carbide) กลุ่มแอลคีน (C=C) กลุ่มอัลเคน (C-C) กลุ่มอีเทอร์ (C-O-C) และกลุ่มคาร์บอนิล (C=O) ตามลำดับ [35, 36] กลุ่มอัลเคน (C-C) เป็นสารประกอบในน้ำมันดิบทำหน้าที่เป็นฟิล์มป้องกันการกัดเซาะ การสึกกร่อนและสภาพการกัดกร่อน [37-38] กลุ่มแอลคีน (C=C) พบบนพื้นผิววัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบทางเคมี กลุ่มอีเทอร์ (C-O-C) และกลุ่มคาร์บอนิล (C=O) เป็นสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ และน้ำ [39, 40]

2) องค์ประกอบบนพื้นผิวของเหล็ก (Fe 2p) ที่ตำแหน่ง 707.0 710.0 และ 712.2 อิเล็กตรอนโวลต์ บ่งชี้ Fe metal Fe (II) คือ FeO และ Fe₃O₄ และ Fe (III) คือ Fe₂O₃ Fe₃O₄ และ FeOOH ตามลำดับ [41-43]

3) องค์ประกอบบนพื้นผิวของซิลิคอน (Si 2p) ที่ตำแหน่ง 100.3 อิเล็กตรอนโวลต์ คือ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นผลจากกระดาดทราย และ ที่ตำแหน่ง 102.4 103.5 104.7 อิเล็กตรอนโวลต์ บ่งชี้ซิลิคอนออกไซด์ SiO₂ เป็นองค์ประกอบของทราย [44, 45]

4) องค์ประกอบของออกซิเจน (O 1s) ที่ตำแหน่ง 529.70 531.32 539.92 532.43 532.93 และ 534.50 อิเล็กตรอนโวลต์ บ่งชี้เหล็กออกไซด์ (Fe₃O₄ Fe₂O₃ FeO) เหล็กไฮดรอกไซด์ (FeOOH) และซิลิคอนออกไซด์ (SiO₂) ตามลำดับ [46-48]



รูปที่ 4.7 ตัวอย่าง XPS-fitted curve ของชิ้นงานหลังทดสอบการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน

[22]

จากผลการจำแนกจุดสูงสุดของกราฟ (XPS-fitted curve) นำปริมาณสารประกอบของแต่ละธาตุหาความสัมพันธ์เชิงกึ่งปริมาณ (Semi-quantitative analysis) ดังในตารางที่ 4.4 แสดงสัดส่วนองค์ประกอบของคาร์บอน เหล็ก ซิลิคอน และออกซิเจน ดังนี้ สัดส่วนของ C-C/(C=C + C-O-C + C=O) ควรจะมีค่าสูงเพื่อช่วยป้องกันและยับยั้งการกัดเซาะ-การกัดกร่อน เพราะ C-C ทำหน้าที่เป็นฟิล์มป้องกันการขัดสีบนพื้นผิว สัดส่วน Fe(II)/Fe(III) จะมีค่าน้อย ในกลุ่มตัวอย่างที่มีอัตราการกัดเซาะ-กัดกร่อนสูง เนื่องจากเมื่อชิ้นงานเกิดการกัดเซาะ-การกัดกร่อนมาก ความขรุขระบนพื้นผิวมากขึ้นส่งผลปริมาณของ Fe(III) สูง ทำให้สัดส่วน Fe(II)/Fe(III) มีค่าต่ำ บ่งบอกถึงความต้านทานการกัดเซาะ-การกัดกร่อนต่ำ [48, 49] ซิลิคอนออกไซด์ (SiO₂) เป็นองค์ประกอบทราย พบในเหล็กกล้า AISI 1045 สูงกว่าท่อเหล็ก Tube เนื่องจากเหล็กกล้า AISI 1045 มีโครงสร้างจุลภาคที่อ่อนกว่าท่อเหล็ก Tube ทำให้ SiO₂ ฝังตัวและหลงเหลืออยู่บนผิวชิ้นงานมากกว่า

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนองค์ประกอบของคาร์บอน เหล็ก ซิลิคอน และออกซิเจนบนพื้นผิวชิ้นงานหลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน [22]

ชิ้นงาน	C 1s	Fe 2p	Si 2p
	C—C/((C=C) + (C—O—C) + (C=O))	Fe(II)/Fe(III)	SiO ₂ (102.4)
1045	0.00	0.73	
Tube	0.00	1.48	
E ₀ _1045_500	1.99	0.65	52.32
E ₀ _1045_2000	0.35	0.50	69.40
E ₀ _Tube_500	2.32	2.33	48.16
E ₀ _Tube_2000	1.34	1.47	65.82
C ₀ _1045	0.97	0.84	
C ₀ _Tube	0.95	0.81	
C _w _1045_500	1.19	1.23	60.00
C _w _1045_1000	1.59	0.73	56.29
C _w _Tube_500	1.93	0.86	58.59
C _w _Tube_1000	0.95	0.70	31.96



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ท่อเหล็ก (Tube) มีความต้านทานการกัดเซาะ-การกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้า AISI 1045 เพราะมีขนาดเกรนเล็กละเอียดกว่า (เหล็กทั้งสองชนิดมีโครงสร้างจุลภาคเหมือนกัน คือ ประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์) ขนาดเกรนที่เล็กเป็นปัจจัยที่ทำให้มีความแข็งและความต้านทานการกัดเซาะ-การกัดกร่อนดีกว่า

5.1.2 ขนาดทรายที่ใหญ่ขึ้นมีผลต่อการกัดเซาะ คือ ขนาดทรายขนาดใหญ่มีแรงกระแทกมาก (โมเมนตัม ความเค้นที่กระทำบนพื้นผิวชิ้นงานสูง) ส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานถูกกัดเซาะ ผิวเปิดมากขึ้น เปิดโอกาสให้พื้นผิวสัมผัส/ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำได้ง่ายขึ้น

5.1.3 ทรายขนาดเล็กมีผลกระทบชัดเจนต่อการกัดกร่อน เพราะในปริมาตรทรายที่เท่ากัน ทรายขนาดเล็กมีจำนวนเม็ดทรายและจำนวนครั้งที่เม็ดทรายกระทบ/เสียดสีเปิดผิวชิ้นงานมากกว่าทรายขนาดใหญ่ กล่าวคือ ผิวเปิดมาก และบ่อย ทำให้ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมการกัดกร่อนมากขึ้น จึงส่งผลในทางการกัดกร่อนชัดเจน

5.1.4 ท่อเหล็ก (Tube) ที่ใช้งานจริงในการขุดเจาะน้ำมันดิบมีความหนา 7 มิลลิเมตร และจากผลการวิจัยครั้งนี้ พบว่า ท่อเหล็ก (Tube) มีความเสียหายรุนแรงที่สุด คือ 0.43332 มิลลิเมตร ต่อปี และจากสมมติฐานงานวิจัยของ Neville W. Sachs พบว่าท่อจะไม่สามารถใช้งานต่อไปได้อีก หากความหนาของผนังท่อน้อยกว่า 5.1 มิลลิเมตร (หมายความว่า ท่อเหล็ก (Tube) จะเกิดการกัดเซาะ-กัดกร่อนจนผนังท่อหายไปไม่เกิน 1.9 มิลลิเมตร) จึงทำนายได้ว่า ท่อเหล็ก (Tube) นี้จะใช้งานได้ 1.9 มิลลิเมตร/0.43332 มิลลิเมตรต่อปี เท่ากับ 4 ปี 4 เดือน 18 วัน โดยสมมติว่าใช้งานต่อเนื่องทุกวัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

พฤติกรรมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนของชิ้นงาน AISI 1045 และท่อเหล็ก (Tube) เปลี่ยนแปลงตามหลายตัวแปร เช่น โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ขนาดอนุภาคทราย หรือ ความเร็วของสารละลาย โดยในงานวิจัยนี้ ศึกษาผลของตัวแปรเหล่านี้ โดยได้ผลการทดลองดังแสดงในบทที่ผ่าน มา แต่ข้อมูลดังกล่าวเป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น แต่เพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริงควรมีการทำ วิจัยศึกษาเพิ่มเติม ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงมีข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป ดังนี้

5.2.1 ลักษณะของเม็ดทรายในแบบอื่น ๆ หรือจากแหล่งน้ำมันอื่น ๆ ส่งผลต่อความเสียหายในรูปแบบการกัดเซาะ-การกัดกร่อนอย่างไร

5.2.2 ควรปรับค่าปริมาณไอออนที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนในน้ำมันดิบ ให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของน้ำมันดิบในแต่ละพื้นที่ เนื่องจากในหลุมขุดเจาะน้ำมันแต่ละพื้นที่มีปริมาณไอออนที่ แตกต่างกันเพื่อการประเมินอายุการใช้งานท่อได้จริง

5.2.3 ควรทดสอบโดยใช้วัสดุอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อศึกษาว่าในกระบวนการผลิตน้ำมันดิบ วัสดุชนิดใดเหมาะสมที่สุด ทั้งในด้านของราคา และความทนทานต่อการสึกหรอ



บรรณานุกรม

- [1] Joseph, P. R., Gordon, I. A., & Priscilla, G. M. 2019. Petroleum (Online). Available FTP: <https://www.britannica.com/science/petroleum>.
- [2] Adam, A. , et al. 2019. List of petroleum products (Online) . Available FTP: <https://www.britannica.com/topic/list-of-petroleum-products-2069393>.
- [3] Polish Geological Institute National Research Institute. 2020. News service of Polish Geological Survey (Online). Available FTP: <https://infolupki.pgi.gov.pl/en/oil/7-life-after-life-petroleum-products>.
- [4] Emmanuel, A. B. 2018. Nigeria plans to support oil price with lower production cost per barrel (Online). Available FTP: <https://nairametrics.com/2020/03/12/nigeria-plans-to-support-oil-price-with-lower-production-cost-per-barrel/>
- [5] Popov, B.N., & Lee, J.-W. (2018). Chapter 24 - Cathodic Protection of Pipelines. in: M. Kutz (Ed.). Handbook of Environmental Degradation of Materials (Third Edition). William Andrew Publishing. pp. 509-532.
- [6] Nicholas, H. (2014). Fine tubes (Online). Available FTP: <https://www.finetubes.co.uk/markets/oil-and-gas-tubes>
- [7] ISO 11960. (2011). Petroleum and natural gas industries-Steel pipes for use as casing or tubing for wells (Online) . Available FTP: <https://www.iso.org/standard/46587.html>
- [8] กชนันท์ วิมุตกุล. (2560). แหล่งปิโตรเลียม. เชื้อเพลิงเพื่อการคมนาคม (ออนไลน์). ที่มา: <https://sites.google.com/site/kchnanthwimutkul/cheux-pheling-pheux-kar-khmnakhm/kar-sarwc-laea-kar-phli-pitorleiyim/5-haelng-pitorleiyim>.
- [9] กระทรวงพลังงาน. (2019). นิยามศัพท์ (ออนไลน์). ที่มา: <https://dmf.go.th/public/list/data/index/menu/670?fbclid=IwAR2KuiVmuagLO1mChEPARPPM7mo5KTjkl-I8M-fqywsyfd7ihFbapCYTG4>
- [10] วิชัย วรยศอำไพ. (1999). ทรัพยากรแร่ทรายในประเทศไทย. กรมทรัพยากรธรณี (ออนไลน์). ที่มา: http://library.dmr.go.th/Document/DMR_Technical_Reports/2542/7937.pdf
- [11] ปริญา บัญญา, ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ และ อภิชาติ โรจนโรวรรณ. (2017). ภาพรวมของการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในอุตสาหกรรม. The Journal of Industrial Technology. 13.
- [12] สลิลา รักรวนิชย์ และ วันชัย ยอดสุดใจ. (2016). ประสิทธิภาพของระบบป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโดยวิธีกัลวานิกคาโทดิก. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 53.

- [13] El-Alem, A., Azmy, A. & Hossam-Eldin, A. (2013). Design of a Cathodic Protection System to Prevent Corrosion of Metallic Structures using Hybrid Renewable Energy Sources.
- [14] รุจีภรณ์ นาคขุนทด. (2017). การประเมินผลพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะจากเส้นโค้งโพลาริเซชัน (polarization curve). งานบริการ วิเคราะห์ ทดสอบ สอบเทียบ นวัตกรรมวัสดุ (ออนไลน์). ที่มา: <https://www.tistr.or.th/tistrblog>
- [15] ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยาพงศ์. (2545). การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ. เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ศูนย์ผลิตตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ: กรุงเทพมหานคร.
- [16] Palm Sens Compact Electrochemical Interfaces. 2019. Tafel Plot and Evans Diagram (Online). Available FTP: <https://www.palmsenscorrosion.com/knowledgebase/tafel-plot-and-evans-diagram/>
- [17] ASTM G102. 2015. Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements (Online). Available FTP: [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?G102+89\(2015\)e1](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?G102+89(2015)e1)
- [18] ASTM G119. 2016. Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion (Online). Available FTP: [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?G119+09\(2016\)](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?G119+09(2016))
- [19] Hamzah, R., Stephenson, D.J. & Strutt, J.E. (1995). Erosion of material used in petroleum production. *Wear*. 186-187. 493-496.
- [20] Yang, Y., & Cheng, Y.F. (2012). Parametric effects on the erosion-corrosion rate and mechanism of carbon steel pipes in oil sands slurry. *Wear*. 276-277. 141-148.
- [21] Elemuren, R., et al. (2019). Erosion-corrosion of 90° AISI 1018 steel elbows in potash slurry: Effect of particle concentration on surface roughness. *Wear*. 430-431. 37-49.
- [22] Wongpanya, P., et al. (2020). Erosion-corrosion behaviors of 1045 and J55 steels in crude oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 106965.
- [23] Zhang, J., et al. (2016). Study on erosion wear of fracturing pipeline under the action of multiphase flow in oil & gas industry. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 32. 334-346.

- [24] Stack, M.M., & Pungwiwat, N. (2004). Erosion–corrosion mapping of Fe in aqueous slurries: some views on a new rationale for defining the erosion– corrosion interaction. *Wear*. 256(5). 565-576.
- [25] Nguyen, V.B., et al. (2016). Effect of particle size on erosion characteristics. *Wear*. 348- 349. 126-137.
- [26] Zheng, C., et al. (2017). Finite element analysis on the dynamic erosion process using multiple-particle impact model. *Powder Technology*. 315. 163-170.
- [27] Li, L., et al. (2018). Preferred corrosion and its effect on delamination of steel. *Construction and Building Materials*. 193. 576-588.
- [28] Guo, H.X., Lu, B.T., & Luo, J.L. (2005). Interaction of mechanical and electrochemical factors in erosion–corrosion of carbon steel. *Electrochimica Acta*. 51(2). 315-323.
- [29] Lindgren, M., et al. (2016). Erosion–corrosion resistance of various stainless-steel grades in high-temperature sulfuric acid solution. *Wear*. 364-365. 10-21.
- [30] Stack, M.M., & Abd El-Badia, T.M. (2008). Some comments on mapping the combined effects of slurry concentration, impact velocity and electrochemical potential on the erosion–corrosion of WC/Co–Cr coatings. *Wear*. 264(9). 826-837.
- [31] Abdallah, W.A., & Taylor, S.D. (2008). Study of Asphaltenes Adsorption on Metallic Surface Using XPS and TOF-SIMS. *The Journal of Physical Chemistry C*. 112(48). 8963-18972.
- [32] Guzmán, H. J., et al. (2017). X-ray Photoelectron Spectroscopy Analysis of Hydrotreated Athabasca Asphaltenes. *Energy & Fuels*. 31(10). 10706-10717.
- [33] Li, C., et al. (2013). Study on XPS of Venezuela heavy oil asphaltene. *Shiyou Jiaogong/Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*. 29(3). 459-463.
- [34] Strein, E. (2008). STUDYING AND ELIMINATING ADVENTITIOUS CARBON CONTAMINATION ON SILICON WAFERS. Brigham Young University.
- [35] Abdallah, W.A., & Taylor, S.D. (2008). Study of Asphaltenes Adsorption on Metallic Surface Using XPS and TOF-SIMS. *The Journal of Physical Chemistry C*. 112(48). 18963-18972.
- [36] Jahn, F., Cook, M., & Graham, M. (2008). *Hydrocarbon Exploration and Production* (Vol. 55).
- [37] Cheremisinoff, N.P. (1999). *Handbook of Industrial Toxicology and Hazardous Materials*.

- [38] Guzmán, H. J., et al. (2017). X-ray Photoelectron Spectroscopy Analysis of Hydrotreated Athabasca Asphaltenes Energy & Fuels. 31(10). 10706-10717.
- [39] Johnson, D.C., et al. (2003). Treatment of Methyl tert-Butyl Ether Contaminated Water Using a Dense Medium Plasma Reactor: A Mechanistic and Kinetic Investigation. Environmental Science & Technology. 37(20). 4804-4810.
- [40] Hashim, N.Z.N., et al. (2019). XPS and DFT investigations of corrosion inhibition of substituted benzylidene Schiff bases on mild steel in hydrochloric acid. Applied Surface Science. 476. 861-877.
- [41] Idczak, K., Idczak, R., & Konieczny, R. (2016). An investigation of the corrosion of polycrystalline iron by XPS, TMS and CEMS. Physica B: Condensed Matter. 491. 37-45.
- [42] Yamashita, T., & Hayes, P. (2008). Analysis of XPS spectra of Fe²⁺ and Fe³⁺ ions in oxide materials. Applied Surface Science. 254(8). 2441-2449.
- [43] Logofatu, C., et al. (2011). Study of SiO₂/Si Interface by Surface Techniques.
- [44] Guo, H.X., Lu, B.T., & Luo, J.L. (2005). Interaction of mechanical and electrochemical factors in erosion-corrosion of carbon steel. Electrochimica Acta. 51(2). 315-323.
- [45] Nam, N.D., et al. (2018). A study on the mixed corrosion inhibitor with a dominant cathodic inhibitor for mild steel in aqueous chloride solution. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 91. 556-569.
- [46] Ralston, K.D., Birbilis, N., & Davies, C.H.J. (2010). Revealing the relationship between grain size and corrosion rate of metals. Scripta Materialia. 63(12). 1201-1204.
- [47] Zeng, L., Guo, X.P., & Zhang, G.A. (2017). Inhibition of the erosion-corrosion of a 90° low alloy steel bend. Journal of Alloys and Compounds. 724. 827-840.
- [48] Xu, W., Han, E.-H., & Wang, Z. (2019). Effect of tannic acid on corrosion behavior of carbon steel in NaCl solution. Journal of Materials Science & Technology. 35(1). 64-75.
- [49] Sun, H., et al. (2014). Formation and release behavior of iron corrosion products under the influence of bacterial communities in a simulated water distribution system. Environmental Science: Processes and Impacts. 16(3).

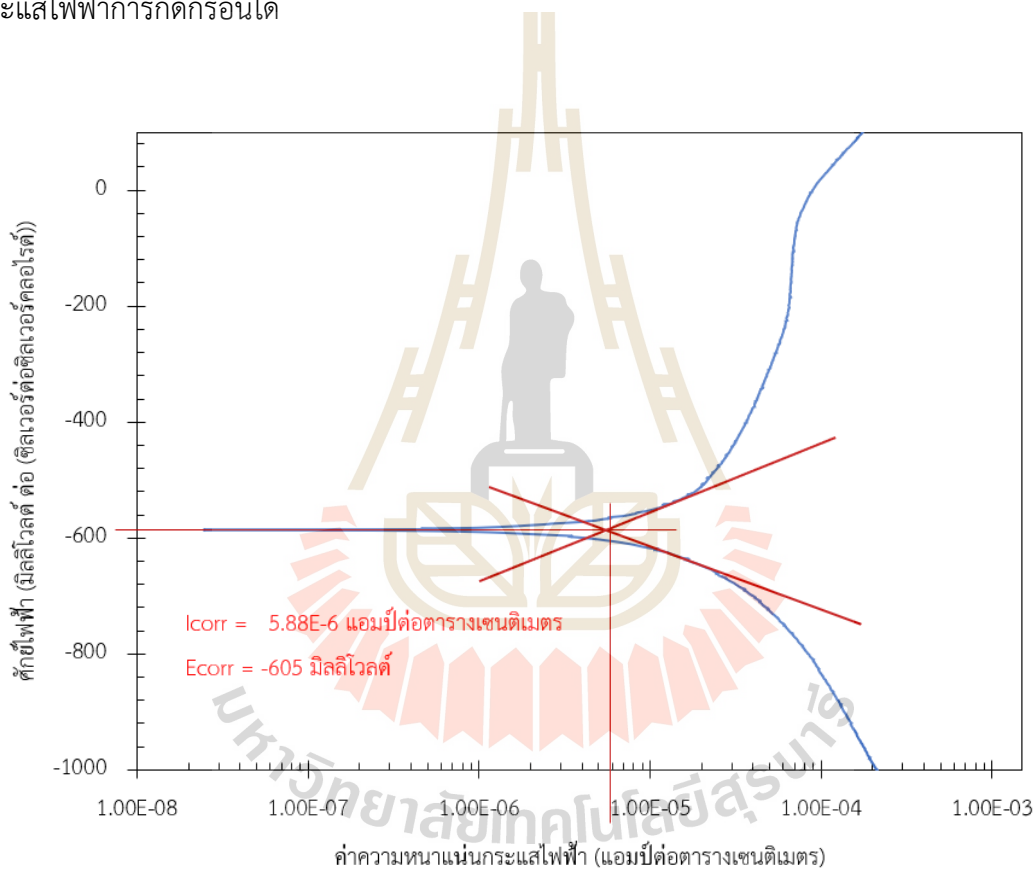
ภาคผนวก ก

การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกักถ่วง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักถ่วง และ
อัตราการกักถ่วง



การหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็ก (Tube)

ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของชิ้นงานหลังการทดสอบการกัดกร่อนหาได้จากการใช้โปรแกรมลิเนียร์รีเกรสชัน (Linear regression program) ที่อยู่ในเครื่อง AUTOLAB PGSTAT 320H ซึ่งมีวิธีการหาโดยกำหนดตำแหน่ง 2 จุดบนเส้นโค้งโพลาไรเซชันแล้วใช้คำสั่งลิเนียร์รีเกรสชัน โปรแกรมจะทำการคำนวณเส้นตรงระหว่างจุด 2 จุด ที่กำหนดไว้ดังรูปที่ ก.1 ซึ่งแสดงจุดตัดระหว่างเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแอโนด และเส้นความชันของเส้นกราฟช่วงที่เกิดปฏิกิริยาแคโทด โดยที่จุดตัดนี้จะสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนได้



รูปที่ ก.1 วิธีหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จากเส้นโพลาไรเซชัน

อัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 และท่อเหล็ก (Tube)

การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนสามารถหาได้จากการนำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่อ่านได้จากเส้นโพลาริเซชัน ความหนาแน่นของโลหะ และน้ำหนักสมมูลของโลหะ แทนลงในสมการที่ ก.1 โดยค่าอัตราการกัดกร่อนที่คำนวณได้จะแสดงผลในหน่วยมิลลิเมตรต่อปี

$$CR_{\left(\frac{mm}{year}\right)} = \frac{(0.00327 \times i_{corr} \times EW)}{\rho} \quad \text{ก.1}$$

โดยที่

$CR_{(mm/year)}$	คือ	อัตราการเกิดการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
i_{corr}	คือ	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร)
EW	คือ	น้ำหนักสมมูลของโลหะ (มีค่า 28.32)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของโลหะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ในเหล็กกล้า AISI 1045 เท่ากับ 7.807 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และท่อเหล็กจากลานกระบือ เท่ากับ 7.814 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการวัดเส้นโพลาริเซชันที่ทำการทดลองจากเครื่องโพเทนชิโอสแตทและจากการวัดน้ำหนักที่หายไปเครื่องชั่งน้ำหนัก



ข.1 ข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดเส้นโพลาริเซชันจากการกระบวนทดสอบการกักกรองในสารละลายน้ำมันดิบและจากการทดสอบผลรวมของอัตราการกักกรองในสารละลายน้ำมันดิบผสมทราย

ตารางที่ ข.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักกรองของชิ้นงานในสารละลายน้ำมันดิบ

ชิ้นงาน	ครั้งที่		ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2		
C ₀ _1045	-605	-420	-512.5	130.81
C ₀ _Tube	-637	-590	-613.5	33.23
C _w _1045_500	-839	-780	-809.5	41.72
C _w _1045_1000	-850	-1020	-935	120.21
C _w _1045_2000	-836	-760	-798	53.74
C _w _Tube_500	-688	-830	-759	100.41
C _w _Tube_1000	-736	-800	-768	45.25
C _w _Tube_2000	-796	-810	-803	9.90

ตารางที่ ข.2 ค่าอัตราการกักกรองของชิ้นงานในสารละลายน้ำมันดิบ

ชิ้นงาน	ครั้งที่		ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2		
C ₀ _1045	0.0697	0.0237	0.0467	0.03253
C ₀ _Tube	0.0295	0.0652	0.0473	0.02524
C _w _1045_500	0.0816	0.0474	0.0645	0.02418
C _w _1045_1000	0.0763	0.0949	0.0856	0.01315
C _w _1045_2000	0.0803	0.0474	0.0639	0.02326
C _w _Tube_500	0.0788	0.1067	0.0927	0.01973
C _w _Tube_1000	0.0725	0.0830	0.0777	0.00742
C _w _Tube_2000	0.0745	0.0889	0.0817	0.01018

ข.2 ข้อมูลดิบที่ได้จากการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการกัดเซาะและผลรวมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนในสารละลายน้ำมันดิบผสมทราย

ตารางที่ ข.3 ค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการกัดเซาะและผลรวมการกัดเซาะ-การกัดกร่อนในสารละลายน้ำมันดิบผสมทราย

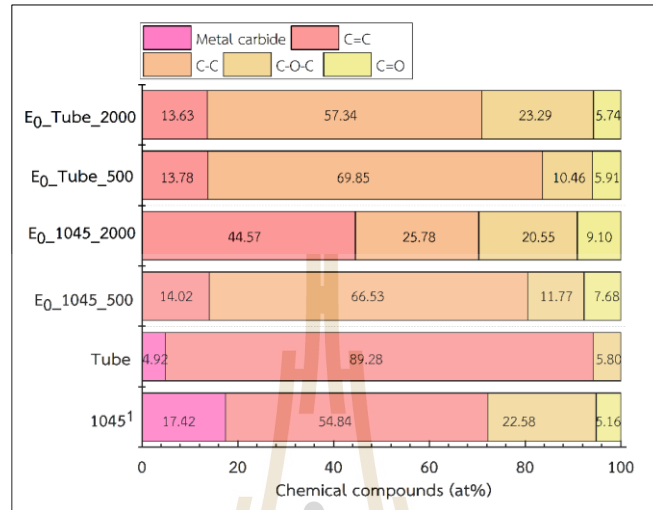
ชิ้นงาน	ครั้งที่			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	1	2	3		
E ₀ _1045_500	0.12	0.11	0.13	0.12	0.01
E ₀ _1045_1000	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00
E ₀ _1045_2000	0.40	0.38	0.36	0.38	0.02
E ₀ _Tube_500	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00
E ₀ _Tube_1000	0.12	0.14	0.13	0.13	0.01
E ₀ _Tube_2000	0.24	0.26	0.25	0.25	0.01
T_1045_500	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00
T_1045_1000	0.22	0.21	0.23	0.22	0.01
T_1045_2000	0.50	0.48	0.46	0.48	0.02
T_Tube_500	0.15	0.14	0.16	0.15	0.01
T_Tube_1000	0.23	0.21	0.22	0.21	0.01
T_Tube_2000	0.34	0.34	0.34	0.34	0.00

ภาคผนวก ค

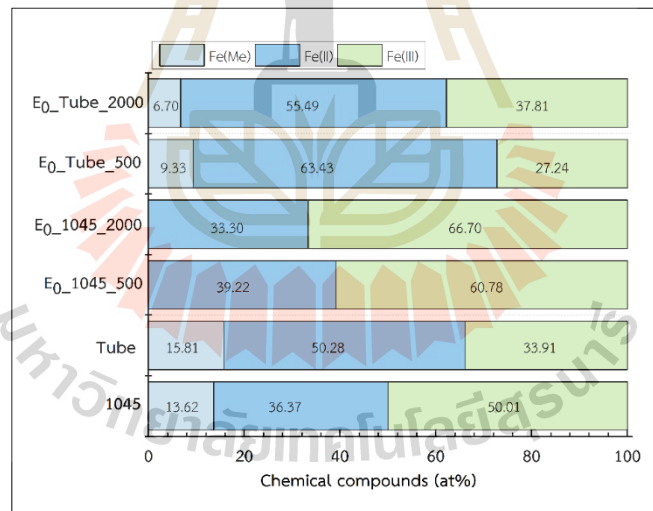
ผลวิเคราะห์พื้นผิวที่เสียหายด้วยเทคนิค XPS
หลังทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบบนพื้นผิวชิ้นงานหลังทดสอบด้วยเทคนิค XPS ดังแสดงในรูป ค.1 ที่แสดงปริมาณองค์ประกอบของ C1s และ Fe2p ของชิ้นงานหลังทดสอบการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน



C 1s



Fe 2p

รูปที่ ค.1 ปริมาณองค์ประกอบของ C 1s และ Fe 2p ของชิ้นงานหลังทดสอบการกัดเซาะที่ปราศจากการกัดกร่อน

ภาคผนวก ง

ผลวิเคราะห์ความหนาแน่นของชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1045 และ Tube ก่อน
ทดสอบการกัดเซาะ-การกัดกร่อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1 แสดงความหยาบผิวของเหล็กกล้า AISI 1045

กระดาษทราย	R_a1 (μm)	R_a2 (μm)	R_a3 (μm)	\bar{R}_a (μm)
180	0.341	0.376	0.489	0.402
240	0.246	0.291	0.281	0.273
320	0.193	0.178	0.185	0.185
400	0.167	0.171	0.169	0.169

ตารางที่ ง.2 แสดงความหยาบผิวของเหล็กกล้าของท่อเหล็ก (Tube)

กระดาษทราย	R_a1 (μm)	R_a2 (μm)	R_a3 (μm)	\bar{R}_a (μm)
180	0.493	0.401	0.504	0.466
240	0.297	0.315	0.345	0.319
320	0.195	0.189	0.188	0.191
400	0.148	0.201	0.202	0.183

ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

P. Wongpanya, Y. Saramas, C. Chumkratoke, A.Wannakomol, Erosion-corrosion behaviors of 1045 and J55 steels in crude oil. *Journal of Petroleum science and Engineering*, Vol. 189 No. June 2020 pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.106965>

(Received 23 September 2019, Revised 23 December 2019, Accepted 16 January 2020, Available online 23 January 2020. ISI Journal, Q1 IF 2.886)



ประวัติคณะผู้วิจัย

1. นางสาวพรวสา วงศ์ปัญญา สำเร็จการศึกษา Doktor-Ingenieur in Mechanical Engineering จาก Helmut-Schmidt-Universität, Germany เมื่อปี พ.ศ. 2551 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 300000

2. นายอัมพรรค วรรณโกมล สำเร็จการศึกษา Doctor of Philosophy สาขา Natural Science วิชาเอก Remote Sensing & Geophysics จาก Free University of Berlin Germany เมื่อปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 300000

