

เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน
พื้นผิวของโลหะผสม และเหล็กกล้าไร้สนิม

TRANSPORT OF INTENSITY TECHNIQUE FOR INVESTIGATION ON
CORROSION BEHAVIOR OF ALLOYS AND STAINLESS STEEL
SURFACES

ธรรณรัช ศรีสุวรรณ
THANTHANAT SRISUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-030-014

เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน
พื้นผิวของโลหะผสม และเหล็กกล้าไร้สนิม

TRANSPORT OF INTENSITY TECHNIQUE FOR INVESTIGATION ON
CORROSION BEHAVIOR OF ALLOYS AND STAINLESS STEEL
SURFACES

ธรรณัฐช ศรีสุวรรณ
THANTHANAT SRISUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562
KMITL-2019-SC-M-030-014

TRANSPORT OF INTENSITY TECHNIQUE FOR INVESTIGATION ON
CORROSION BEHAVIOR OF ALLOYS AND STAINLESS STEEL
SURFACES

THANTHANAT SRISUWAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-SC-M-030-014

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนพื้นผิวของโลหะผสมและเหล็กกล้าไร้สนิม
Transport of intensity technique for investigation on corrosion behavior of alloys and stainless steel surfaces
ชื่อนักศึกษา นางสาวธรรณธันช ศรีสุวรรณ
รหัสประจำตัว 59605114
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี ประธานกรรมการ	รัชภาคย์ จิตต์อารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชษฐา รัตนพันธ์ กรรมการ	เชษฐา รัตนพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ กรรมการ	ประธาน บุรณศิริ

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ วันพุธที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.30-12.30 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRAKABANG

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 4 เดือน มกราคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบ พฤติกรรมการกัดกร่อนพื้นผิวของโลหะผสมและ เหล็กกล้าไร้สนิม
ชื่อนักศึกษา	ธรรณธันช ศรีสุวรรณ
รหัสประจำตัว	59605114
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ประธาน บุรณศิริ

บทคัดย่อ

เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงนั้นเป็นการจัดแสงที่ไม่ใช่การจัดแสงแบบอินเตอร์เฟอโรเมทรี เพื่อใช้ในการคำนวณเฟสของวัตถุด้วยสมการการส่งผ่านความเข้มแสง โดยวิธีการบันทึกภาพด้วยกล้องที่ตำแหน่งโฟกัสและนอกโฟกัสโดยแต่ละตำแหน่งนั้นจะมีความเข้มแสงที่แตกต่างกันซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้ภาพเฟสที่มีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับการจัดแสงในแบบอินเตอร์เฟอโรเมทรี ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับใช้คำนวณหาเฟสเพื่อศึกษาความลึกของหลุมการกัดกร่อน และการเจริญเติบโตภายในหลุมบนพื้นผิวของโลหะผสม และเหล็กกล้าไร้สนิม โดยตำแหน่งที่ใช้ในการเคลื่อนกล้องจะอยู่ในช่วงเรย์ลีห์ของแหล่งกำเนิดแสงฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตรเพื่อลดการเกิดความพรางมัวของภาพ ผลการทดลองพบว่าเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงนี้สามารถถูกใช้ศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการกัดกร่อนบนพื้นผิวโลหะผสมและเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งทำให้เราสามารถประเมินความลึกของหลุมการกัดกร่อนและศึกษาการเจริญเติบโตภายในหลุมการกัดกร่อนได้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นโดยเทคนิคนี้ให้ข้อมูลที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จึงเหมาะที่จะประยุกต์ใช้ทำเป็นเครื่องมือสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนตามท่อในโรงงานอุตสาหกรรมในอนาคต

คำสำคัญ : การกัดกร่อน เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะผสม

Thesis Title	Transport of intensity technique for investigation on corrosion behavior of alloys and stainless steel surfaces
Student Name	Thanthannat Srisuwan
Student ID	59605114
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2019
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Prathan Buranasiri

Abstract

Transport of intensity technique is a noninterferometric method to determine the phase of an object by recording multiple intensities at different position in focus and defocus. This technique allows simple, inexpensive setups and effective phase imaging compared with an interferometric approach. In this research, phase retrieval using transport of intensity equation (TIE) has been used for determining the phase profile of corrosion behavior on surfaces of alloys and stainless steel. The experimental setup for TIE typically involves a 4f imaging system for reducing noise. By translating the camera, multiple intensity images at different propagation distance can be obtained. The range of defocus distances were selected within the Rayleigh range of He-Ne laser at 633 nm. The experimental results show the capability of TIE for observing the depth and growth of corrosion pits. The corrosion characteristics of alloys and stainless steel results have also been shown. The dynamic process of microstructure surface system would be conducted and may be applied to industry in the future.

Keywords : alloys, corrosion, stainless steel, transport of intensity equation

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญทางด้านวิทยาศาสตร์สำหรับความช่วยเหลืออันมีค่าที่ให้ข้อมูล และการช่วยเหลือค้นคว้าข้อมูลต่างๆ ขอขอบคุณ ผศ.ดร. ประธาน บุรณศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆด้านด้วยดีเสมอมาจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ รองผู้อำนวยการสำนักบริหารงานวิจัย และนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในเรื่องการทดสอบการ กัดกร่อนด้วยเทคนิคทางเคมี เป็นอย่างดีตลอดมาจนทำให้งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณ Prof. Anand Asundi ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำข้าพเจ้าทางด้านเทคนิค TIE และขอขอบคุณ Prof. Partha P. Banerjee ที่คอยให้คำแนะนำในเรื่องเทคนิคการจัดแสงแบบ TIE

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. รัชภาคย์ จิตต์อารี อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และ ผศ.ดร. เจริญธา รัตนพันธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สละเวลาเพื่อมาสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ และช่วยให้คำแนะนำจนทำให้เกิดวิทยานิพนธ์เล่มที่สมบูรณ์ขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านจากทุกภาควิชา โดยเฉพาะอย่างยิ่งคณาจารย์ประจำภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้มอบ ความรู้ในวิชาต่างๆให้กับข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้าได้นำความรู้นั้นมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยเล่มนี้

ขอขอบคุณพี่เบสเจ้าหน้าที่ประจำห้องแลปภาคเคมีที่คอยช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ต่างๆสำหรับ ทำงานวิจัย รวมถึงให้คำปรึกษาในการเตรียมสารเคมี และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆและ น้องๆประจำ ห้องปฏิบัติการโพตอนไดนามิกโดยเฉพาะนายทวีพล ประกอบแสง ที่คอยช่วยแนะนำข้าพเจ้าในเรื่อง ต่างๆ และห้องปฏิบัติการอื่นๆสำหรับคำปรึกษาและมิตรภาพดีๆ เสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณครอบครัวที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆด้าน จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในทุกวันนี้ ตลอดจนบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลือที่ข้าพเจ้า ไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของ ทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงกราบขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้ ประโยชน์และคุณค่าของงานวิจัยเล่มนี้ ข้าพเจ้าขอบอกแก่บิดา มารดา ครอบครัว และคณาจารย์ทุกท่าน

ธรรณธันช ศรีสวรรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การกีดกร่อน	3
2.1.1 ความหมายของการกีดกร่อน	3
2.1.2 ความสำคัญของการกีดกร่อน.....	4
2.1.3 ลักษณะของการกีดกร่อน	5
2.2 หัวอ่านฮาร์ดดิสและหลักการทำงาน	12
2.3 ความเป็นแม่เหล็กในสสาร	13
2.3.1 โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากออร์บิทัล	13
2.3.2 โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากสปิน	14
2.3.3 ประเภทของความเป็นแม่เหล็ก.....	14
2.4 เลเซอร์.....	15
2.3.1 ประวัติ.....	15
2.3.2 ส่วนประกอบของเลเซอร์.....	16
2.5 การส่งผ่านความเข้มแสง.....	16
2.6 การเคลื่อนที่ด้วยไฟฟ้า	20
2.7 การศึกษาการกีดกร่อนโดยวิธีการโพเทนทีโอไดนามิกส์ โพลาริเซชัน	21
2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	22
2.8.1 ประวัติ.....	22
2.8.2 หลักการทำงาน.....	22
2.9 โลหะทรานซิชั่น.....	23
2.9.1 คอปเปอร์.....	23
2.9.2 เหล็ก.....	24
2.9.3 โคบอลต์.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10 เหล็กกล้าไร้สนิม	26
2.11 น้ำตามธรรมชาติ	27
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 การเตรียมชิ้นงาน	29
3.1.1 การเตรียมโลหะผสม Co-Fe	30
3.1.2 การเตรียมสแตนเลสชนิด AISI 304	30
3.1.3 การเตรียมสารละลาย และสแตนเลสชนิด AISI 420	30
3.2 การวิเคราะห์ผล	33
3.2.1 วิธีการหาช่วงระยะที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการเคลื่อนกล้อง.....	33
3.2.2 วิเคราะห์ลักษณะการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe,	33
สแตนเลสชนิด AISI 420 และสแตนเลสชนิด AISI 304 ด้วยเทคนิคการส่งผ่าน	
ความเข้มแสง	
3.2.3 วิเคราะห์ลักษณะการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe,	35
สแตนเลสชนิด AISI 420 และสแตนเลสชนิด AISI 304 ด้วยเทคนิคกล้อง	
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	36
4.1 ผลจากการศึกษาการกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420.....	36
4.1.1 การเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก	
โพลาไรเซชัน.....	36
4.1.2 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของเหล็กกล้าไร้สนิม	
ชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก.....	38
4.1.3 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของเหล็กกล้าไร้สนิม	
ชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก.....	48
4.1.4 การวิเคราะห์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม	
ชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	50
4.2 ผลจากการศึกษาการกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304.....	51
4.2.1 การเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก	
โพลาไรเซชัน.....	51
4.2.2 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของเหล็กกล้าไร้สนิม	
ชนิด AISI 304.....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3 การวิเคราะห์ด้วยการกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด AISI 304 ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	63
4.3 ผลจากการศึกษาการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe.....	64
4.3.1 การเตรียมโลหะผสม Co-Fe ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติก โพลาริเซชัน.....	64
4.3.2 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20.....	64
4.3.3 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60.....	74
4.3.4 การวิเคราะห์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	85
5.1.1 ผลการศึกษาโลหะผสม Co-Fe ด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสง และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	85
5.1.2 ผลการศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	85
5.1.3 ผลการศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
เอกสารอ้างอิง	88
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก	91
ประวัติผู้เขียน	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติของทองแดง.....	23
2.2 แสดงคุณสมบัติของเหล็ก.....	24
2.3 แสดงคุณสมบัติของเหล็ก.....	25
2.4 ปริมาณน้ำมันดิบและน้ำตามธรรมชาติ (ลูกบาศก์เมตรต่อปี) ที่ผลิตได้ในปี 1996 จากแหล่งผลิตน้ำมัน 3 แหล่ง	27
3.1 ส่วนประกอบในน้ำ produced water ของหลุมผลิตก๊าซตามธรรมชาติ.....	30
3.2 ความเข้มข้นของสารเคมีสำหรับเตรียมน้ำ produced water จำลอง.....	31
3.3 องค์ประกอบทางเคมีของสแตนเลสชนิด AISI 420.....	32
4.1 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1).....	40
4.2 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองที่ 2).....	44
4.3 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองที่ 3).....	47
4.4 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก.....	50
produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก	
4.5 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1).....	55
4.6 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2).....	59
4.7 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 3).....	62
4.8 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1).....	66
4.9 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2).....	70
4.10 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 3).....	73
4.11 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1).....	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2).....	79
4.12 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 3).....	82

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรการเกิดการกัดกร่อนของเหล็ก.....	4
2.2 รลยนต์ที่เกิดการกัดกร่อนบนผิวเหล็กที่อยู่ภายใต้สภาวะที่หลุดร่อน.....	5
2.3 ตัวอย่างชิ้นส่วนเสาเหล็กกล้าที่เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า.....	5
2.4 ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบกัลวานิกโดยการยึดติดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน.....	6
2.5 ตัวอย่างการกัดกร่อนในที่อับ.....	7
2.6 ภาพจำลองแสดงการกัดกร่อนแบบรูเข็ม.....	7
2.7 ภาคตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคแสดงการกัดกร่อนตามขอบเกรน.....	8
2.8 การกัดกร่อนใต้ชั้นเคลือบแลกเกอร์.....	9
2.9 ตัวอย่างชิ้นส่วนวาล์วทองเหลืองที่เกิดการเสียหายด้วยการสูญเสียส่วนผสมบางตัว คือ มีการสูญเสียสังกะสีที่มีความไวต่อการกัดกร่อนมากกว่า แต่ยังคงเหลือทองแดงที่มีความเสถียรมากกว่าสังกะสี.....	11
2.10 ฮาร์ดดิส.....	12
2.11 หัวอ่าน.....	13
2.12 อิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียสทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก.....	13
2.13 ซี. เอช. ทาว์นส์.....	15
2.14 รูปแสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์.....	16
2.15 การทดลองด้วยวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง.....	17
2.16 ความเข้มที่ระยะ Rayleigh range.....	20
2.17 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า.....	20
2.18 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบสามขั้ว.....	21
2.19 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM.....	22
2.20 ลักษณะของแร่ทองแดง.....	23
2.21 ลักษณะของเหล็ก.....	24
2.22 ลักษณะของโคบอลต์.....	25
3.1 โลหะทองแดงรูปทรงกระบอก.....	29
3.2 สแตนเลสชนิด AISI 304 รูปทรงกระบอก.....	30
3.3 สแตนเลสชนิด AISI 420 รูปทรงกระบอก.....	32
3.4 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน.....	32
3.5 แสดงการออกแบบการทดลองสำหรับหาระยะเรย์ลีห์ของแหล่งกำเนิดแสง.....	33
3.6 แสดงการออกแบบการทดลองสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนในลักษณะ 3 มิติ.....	34
3.7 แสดงการออกแบบการทดลองสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนในลักษณะ 2 มิติ.....	34
3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	35

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 สแตนเลสชนิด AISI 420 ที่ถูกทำความสะอาดผิวหน้าแล้ว.....	36
4.2 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว.....	37
4.3 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก.....	37
4.4 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก.....	38
4.5 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิว เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก	39
4.6 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิว เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก.....	49
4.7 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	50
4.8 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	51
4.9 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่เตรียมจากเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน.....	51
4.10 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304.....	52
4.11 แสดงการเปลี่ยนความเข้มของภาพที่ระยะต่างๆเป็นเฟสโดยที่ (ก) แสดงภาพที่ความเข้มที่ระยะ focus และ defocus ที่ระยะ 2500 ไมโครเมตร (ข) แสดงภาพเฟสที่คำนวณได้จากความเข้มด้วยเทคนิค TIE.....	53
4.12 แสดงภาพเฟสที่คำนวณได้จากสมการการส่งผ่านความเข้มแสง(TIE).....	54
4.13 แสดงภาพเฟสที่ถูกขยายที่คำนวณได้จากสมการการส่งผ่านความเข้มแสง(TIE) ใช้ในการศึกษาการเจริญเติบโตภายในหลุมการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น.....	54
4.14 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	63
4.15 โลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 80:20 ซึ่งเตรียมจากเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน.....	64
4.16 โลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 40:60 ซึ่งเตรียมจากเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน.....	64
4.17 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20.....	65
4.18 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60.....	75
4.19 โลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 40:60 จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.20 โลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 40:60 จากเทคนิค กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การกัดกร่อนหมายถึงภาวะซึ่งวัสดุโลหะทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุโลหะนั้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานหรือวัตถุประสงค์การใช้งานลดลง ในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปสาเหตุการกัดกร่อนเกิดได้หลายอย่างเช่น ปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี หรืออาจเกิดจากปฏิกิริยาทางกายภาพของวัสดุนั้นเอง เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นแล้วทำให้มีผลกระทบต่อด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2545 พบว่ามีความสูญเสียที่เกิดจากการกัดกร่อนทั่วโลกคิดเป็นมูลค่ารวมประมาณ 11 ล้านล้านบาท และอัตราความเสียหายเกิดขึ้นกับประเทศกำลังพัฒนาประมาณร้อยละ 3 - 5 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมประชาชาติ (GNP) [1]

ในปัจจุบันการกัดกร่อนส่งผลกระทบต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมในเชิงลบโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้วัสดุที่มีมูลค่าสูงๆ เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ที่ต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อกรกัดกร่อนเป็นปัจจัยสำคัญเนื่องจากการผลิตก๊าซธรรมชาติจากหลุมปิโตรเลียมนั้นจะได้น้ำตามธรรมชาติ(Produced Water) ที่มีอยู่ในแหล่งปิโตรเลียมปะปนขึ้นมาด้วย ซึ่งใน Produced Water นี้มีส่วนประกอบของ คาร์บอนไดออกไซด์ คลอไรด์ไอออน และโซเดียมไอออน เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นในท่อที่ทำจากสแตนเลส AISI 420 (โครเมียม13%) [19] ดังนั้นการศึกษาการกัดกร่อนของเหล็กกล้าจะให้ข้อมูลพื้นฐานที่เป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้วัสดุสำหรับท่อลำเลียงก๊าซธรรมชาติ นอกจากนี้การกัดกร่อนยังส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประยุกต์ใช้โลหะผสมที่มีความเป็นแม่เหล็กในการผลิตหัวอ่านเพื่อใช้ในการบันทึกและอ่านข้อมูล โดยโลหะที่มีสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) เช่น Co Ni และ Fe ในการผลิตนั้นโลหะจำเป็นต้องสัมผัสกับสารเคมีหลายชนิดที่มีค่า pH ที่แตกต่างกัน รวมไปถึงมีการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหลายครั้งทำให้โลหะดังกล่าวสามารถเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้ ประกอบกับปัจจุบันอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความต้องการใช้วัสดุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กสูงขึ้นเพื่อเพิ่มความหนาแน่นในการจัดเก็บข้อมูล ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มสัดส่วนเชิงมวลของ Fe ในโลหะผสม และการประยุกต์ใช้โลหะผสมในลักษณะนี้อาจนำไปสู่ความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนที่เพิ่มมากขึ้นได้ในกระบวนการผลิต[2][3] ดังนั้นการศึกษาการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe จะให้ข้อมูลพื้นฐานที่เป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการผลิตอุปกรณ์อ่านและบันทึกข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อลดการกัดกร่อนที่อาจจะเกิดขึ้นได้อีกทั้งการกัดกร่อนยังเกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในชีวิตประจำวันเช่นการกัดกร่อนจากสแตนเลส AISI 304 (โครเมียม18%) ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมอาหาร, อุปกรณ์เครื่องครัว และเครื่องใช้ในบ้าน เป็นต้น [4]

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity) และออกแบบการทดลองในการนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบลักษณะ และรูปแบบการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม และสแตนเลสเพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากวิธีการทางเคมีนั้นสามารถศึกษาได้เฉพาะอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเท่านั้น โดยการทดลองนี้จะเป็นการจัดระบบแสงในลักษณะ noninterferometer ทำให้ไม่ต้องใช้เนื้อที่ในการจัดแสงมากเหมือนการจัดแสงในลักษณะ interferometer และมีความซับซ้อนในการจัดระบบแสงน้อยกว่าการจัดแสงแบบ interferometer เพราะไม่จำเป็นต้องทำให้แสงสองลำแทรกสอดกัน ซึ่งเป็นข้อดีในการประยุกต์ทำ

เป็นเครื่องมือซึ่งมีขนาดเล็กสะดวกในการพกพาในอนาคตเหมาะสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนตามระบบท่อในอุตสาหกรรมต่างๆ อีกทั้งเทคนิคนี้สามารถศึกษาพื้นผิวของตัวอย่างในลักษณะ 3 มิติได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและออกแบบเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวโลหะผสม
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe, สแตนเลสชนิด AISI 304 และสแตนเลส AISI 420 ด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง
- 3) เปรียบเทียบความสามารถในการตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อนด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity) กับเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมชิ้นงานสแตนเลสชนิด AISI 304 แล้วนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกโพลาริเซชัน
- 2) เตรียมชิ้นงานโลหะผสม Co-Fe โดยการเคลือบผิวด้วย $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 80:20 และ 40:60 แล้วนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกโพลาริเซชัน
- 3) เตรียมชิ้นงานสแตนเลสชนิด AISI 420 แล้วนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดินามิกโพลาริเซชัน โดยเพิ่มความเข้มข้นของ NaCl ใน Produced Water เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก และ 3.5 % โดยน้ำหนัก
- 4) วิเคราะห์ลักษณะและอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโลหะผสม Co-Fe, สแตนเลสชนิด AISI 304 และสแตนเลสชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้มีองค์ความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity)
- 2) ทำให้ได้เทคนิคใหม่สำหรับใช้ในการตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวโลหะผสม Co-Fe, สแตนเลส AISI 304 และสแตนเลส AISI 420
- 3) เพื่อพัฒนาทักษะกระบวนการคิดวิเคราะห์อย่างเป็นระบบเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อน รูปแบบของการกัดกร่อน หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ความเป็นแม่เหล็กในสสาร เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า การศึกษาการกัดกร่อนโดยวิธีการโพเทนทิโอดนามิกส์ โพลาริเซชัน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โลหะทรานซิชัน เหล็กกล้าไร้สนิม น้ำตามธรรมชาติ และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทั้งนี้ผู้วิจัยได้แบ่งหัวข้อเพื่อเรียบเรียงให้เกิดความเข้าใจดังหัวข้อต่อไปนี้

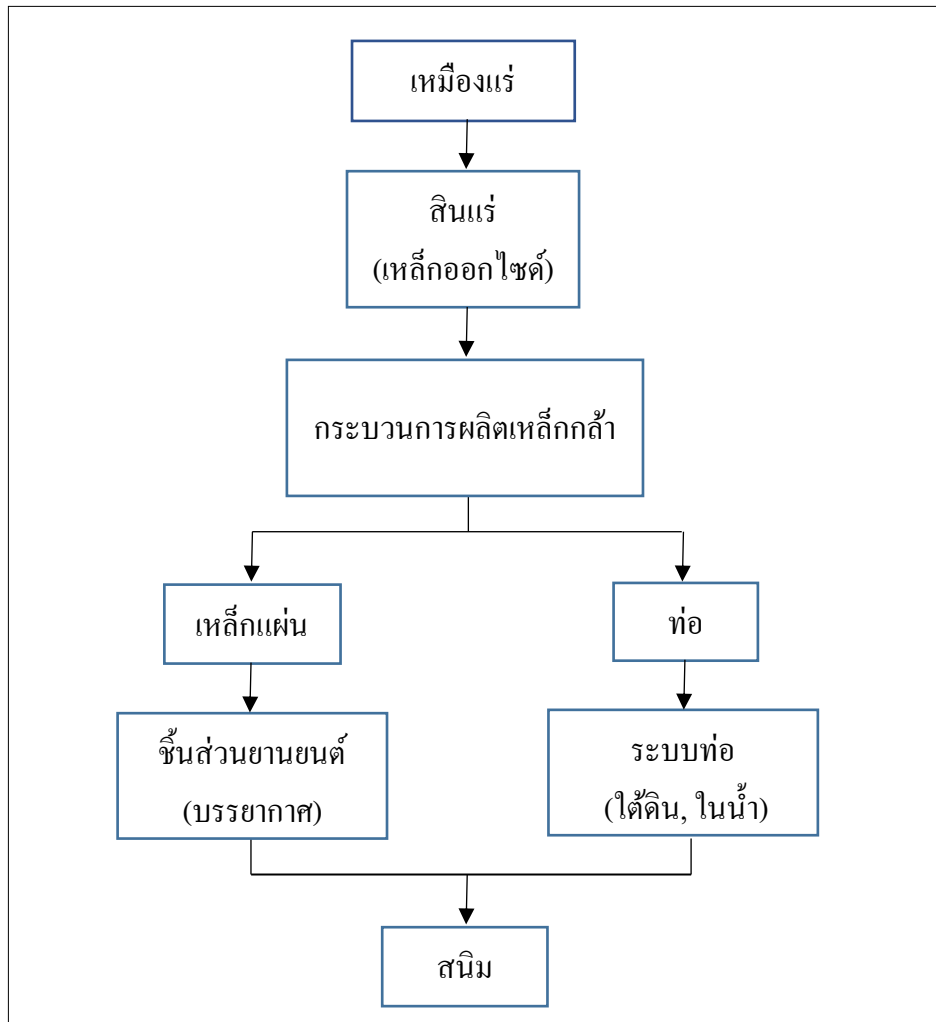
- 2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)
- 2.2 หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ และหลักการทำงาน
- 2.3 ความเป็นแม่เหล็กในสสาร (Magnetism)
- 2.4 การส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity)
- 2.5 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition)
- 2.6 การศึกษาการกัดกร่อนโดยวิธีการโพเทนทิโอดนามิกส์ โพลาริเซชัน(Potentiodynamic Polarisation)
- 2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
- 2.8 โลหะทรานซิชัน (Transition Metal)
- 2.9 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)
- 2.10 น้ำตามธรรมชาติ (Production Water)
- 2.11 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)

2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)

2.1.1 ความหมายของการกัดกร่อน

การกัดกร่อน (Corrosion) หมายถึง การทำลายหรือการเสื่อมสภาพของโลหะอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมโดยกระบวนการทางเคมีหรือไฟฟ้าเคมี เช่น การเกิดสนิมเหล็ก เริ่มจากการที่โลหะหรือเหล็กถูกสกัดจากสินแร่ซึ่งอยู่ในรูปเหล็กออกไซด์ผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ ผลิตเป็นโลหะหรือโลหะผสมและนำไปใช้งาน โลหะหรือเหล็กจะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือออกซิเจนกลายเป็นโลหะออกไซด์หรือเหล็กออกไซด์ก่อให้เกิดความเสียหายได้ วงจรการเกิดการกัดกร่อนแสดงดังรูปที่

2.1



รูปที่ 2.1 วงจรการเกิดการกัดกร่อนของเหล็ก

2.1.2 ความสำคัญของการกัดกร่อน

การศึกษาการกัดกร่อนมีผล 2 ประเด็น คือ

2.1.2.1 ผลทางเศรษฐศาสตร์หรือความประหยัด เพื่อลดการสูญเสียเนื้อวัสดุหรือเนื้อโลหะ การกัดกร่อนของโครงสร้างต่างๆ ได้แก่ ท่อ แทงค์ ส่วนประกอบของเครื่องจักร เรือ สะพานโครงสร้างต่างๆที่ใช้งานในทะเล เป็นต้น

2.1.2.2 ผลทางด้านความปลอดภัยของอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆที่อาจเกิดความเสียหายและเป็นอันตราย ได้แก่ หม้อความดัน หม้อกำเนิดไอน้ำ ภาชนะบรรจุสารเคมีอันตราย เป็นต้น

สำหรับผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับความสูญเสียทางเศรษฐกิจมีทั้งทางตรงและทางอ้อมคือ

- ก. ส่งผลต่อลักษณะปรากฏที่ไม่น่าดู
- ข. ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการผลิตและการซ่อมแซมรักษาเครื่องจักรที่สูงขึ้น
- ค. ส่งผลต่อการปิดโรงงานหรือหยุดการผลิตบางส่วน
- ง. ผลต่อการเกิดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์
- จ. ส่งผลต่อการสูญเสียผลิตภัณฑ์
- ฉ. ส่งผลต่อความปลอดภัยเนื่องจากการแตกหักของเครื่องมือหรืออุปกรณ์

- ข. ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์
- ค. ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิต



รูปที่ 2.2 รถยนต์ที่เกิดการกัดกร่อนบนผิวเหล็กที่อยู่ภายใต้สีเคลือบที่หลุดร่อน

2.1.3 ลักษณะการกัดกร่อน

ที่พบเราสามารถแบ่งออกเป็นหลายแบบ เช่นแบ่งตามกลไกของการกัดกร่อน แบ่งตามลักษณะทางกายภาพ หรือตัวแปรที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน

2.1.3.1 การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวหน้า (General or Uniform Corrosion)

การกัดกร่อนแบบนี้เห็นอยู่ทั่วไป โลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวของโลหะนั้น โดยปกติจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอบนผิวหรือเป็นบริเวณกว้าง มีผลให้โลหะบางเรื่อยๆ หรือมีน้ำหนักรายไป คือ เบาลงเรื่อยๆ

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอทั้งผิวหน้าไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางเทคนิคมากนัก เพราะโลหะถูกกัดกร่อนไปพร้อมๆกันทั้งผิวหน้า ทำให้สามารถคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้โดยตรงจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นตามหลักพื้นฐานของปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometry) และออกแบบเผื่อ พร้อมทั้งทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้ และเปลี่ยนใหม่เมื่อถึงเวลาอันควร [5]



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างชิ้นส่วนเสาเหล็กกล้าที่เกิดการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า

2.1.3.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion)

โลหะแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์เฉพาะตัว ดังนั้นถ้าหากมีโลหะ 2 ชนิด สัมผัสกันอยู่ และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์และส่วนโลหะเชื่อมต่อนำไฟฟ้า หรือต่อกันอย่างครบวงจรไฟฟ้าเคมี เมื่อเวลาผ่านไป โลหะที่ศักย์ต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน(อโนด) ขณะที่โลหะที่มีศักย์สูงกว่าจะไม่กัดกร่อน(คาโทด) ความต่างศักย์ของโลหะทั้งสองยิ่งมากเท่าไรความรุนแรงก็มากขึ้นเท่านั้น ความต่างศักย์จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสอง ทำให้เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อย และจะลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานมากกว่า โดยปกติโลหะที่มีค่าความต่างศักย์มากจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างน้อยหรือแทบจะไม่เกิดเลย เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของโลหะ จึงมีการเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่า Galvanic Corrosion หรือ Two-metal Corrosion ปริมาณกระแสและการกัดกร่อนขึ้นกับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะทั้งสอง

วิศวกรรมการออกแบบจะต้องทราบถึงความเป็นไปได้ของการกัดกร่อนแบบ galvanic ตั้งแต่การระบุรายละเอียดของวัสดุที่จะนำไปใช้ในเครื่องจักร บางครั้งเพื่อเป็นการประหยัดอาจ ใช้วัสดุต่างชนิดกันมาเชื่อมกันโดยเฉพาะโลหะที่มีค่าความต่างศักย์กันมากควรระมัดระวังให้ดี ความต่างศักย์ที่เกิดจาก Galvanic Cell สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา เนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน ที่สะสมอยู่ที่ขั้วคาโทดหรืออโนดจะทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง [5]



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบกัลวานิกโดยการยึดติดแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กกล้าคาร์บอน

2.1.3.3 การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion)

การสัมผัสระหว่างผิวโลหะและผิวที่ไม่ใช่โลหะ สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนในที่อับได้เช่นกัน ปะเก็นรอยต่อระหว่างยางกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่จุ่มอยู่ในน้ำทะเลเนื่องจากสารละลายที่ขังอยู่มีปริมาณจำกัดและหยุดนิ่ง ออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาคาโทดิกจึงลดจำนวนลดลงเรื่อยๆ จนหมด แต่ปฏิกิริยาอโนดิกยังดำเนินอยู่ จึงทำให้ความเข้มข้นของประจุบวกสูง ดังนั้นเพื่อรักษาสมดุลของประจุไว้ ถ้ามีสารเจือปนโดยเฉพาะคลอริน ประจุลบของคลอรินจะเคลื่อนที่เข้ามาในรอยแตก และทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เป็นโลหะไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก กรดนี้จะกัดผิวของโลหะออกมาทีละน้อย ส่งผลให้รอยแตกและรอยร้าวขยายตัวไปเรื่อยๆ [5]

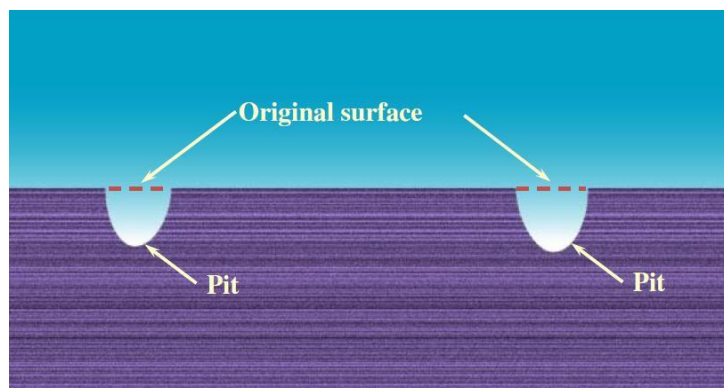


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการกัดกร่อนในที่อับ

2.1.3.4 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)

การกัดกร่อนแบบสนิมขุมหรือการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมากโดยเฉพาะกับโลหะที่ได้พัฒนาให้มีฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนแบบตัวผิวหน้าได้แล้ว แต่เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะ ที่กัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปกคลุมเอาไว้ การกัดกร่อน แบบนี้ทำให้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปสนิมขุมมักจะเกิดทิศทางเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงของโลก การเกิดการกัดกร่อน ในแนวอื่นก็เกิดได้แต่น้อย

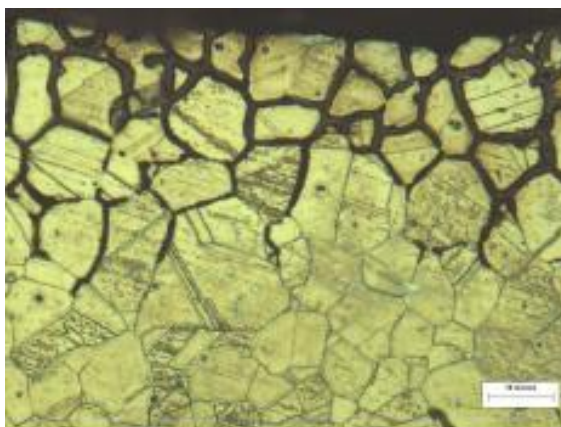
pitting เป็นลักษณะที่ทำให้เป็นรูหรือหลุมในเนื้อโลหะ รูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายอยู่ห่างกัน หรืออาจอยู่ใกล้กันจนดูคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระ pitting เป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุด ซึ่งทำให้อุปกรณ์เครื่องมือ หรือชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเจาะลึกด้วยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของโครงสร้างทั้งหมดที่น้อย ลักษณะมักยากที่จะตรวจสอบพบยากเพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังยากที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณและ ตรวจวัดการขยายตัวของสภาพการกัดกร่อนของ pitting ได้ เพราะความลึกและจำนวนของรูที่เปลี่ยนแปลง ภายใต้สภาวะเฉพาะสภาวะใดสภาวะหนึ่ง การเกิด pitting ยังยากที่จะทำนายได้จากการทดสอบในห้องทดลองอีกด้วย บางครั้งอาจใช้เวลานานจึงปรากฏสภาพของการกัดกร่อน การเกิด pitting เป็นการเกิดเฉพาะที่และเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรง ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักจะเกิดอย่างฉับพลัน



รูปที่ 2.6 ภาพจำลองแสดงการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

2.1.3.5 การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

โดยปกติขอบเกรนมักจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเนื้อเกรนอยู่แล้ว โดยขอบเกรนจะแสดงตัวเป็นซิวาโนด(สูญเสียเนื้อโลหะ) ภายในเกรนจะแสดงตัวเป็นซิวคาโรต หากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่นๆมาตกตะกอนอยู่ หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นอีก เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่ง บริเวณพื้นที่ที่แสดงตัว เป็นอานโนดจะเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป การกัดกร่อนก็จะเกิดกระจายอยู่ทั่วไปเป็นแบบ Uniform attack กัดเซาะทั้งก้อน บริเวณที่เป็นอานโนด คาโรต จะเปลี่ยนตลอดเวลา แต่ถ้าบริเวณขอบเกรนแสดงตัวเป็นอานโนดตลอดเวลา การกัดกร่อนก็จะเกิดเฉพาะบริเวณขอบเกรนตลอดเวลา เป็นการกัดกร่อนที่เรียกว่าการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ หากนำไปใช้งานอย่างไม่เหมาะสม โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทนการกัดกร่อนได้ดี แต่ถ้าเหล็กประเภทนี้ได้รับอุณหภูมิในช่วง 500-800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานานพอสมควร จะทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน โครเมียมที่เดิมเคยอยู่ในเนื้อเหล็กและคอยป้องกันการกัดกร่อนให้เหล็กก็จะมารวมตัวกับคาร์บอน ทำให้บริเวณใกล้ๆ หรือชิดกับขอบเกรนมีโครเมียมต่ำกว่าร้อยละ 12 ซึ่งถือว่าบริเวณนี้ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิมอีกต่อไป ดังนั้นบริเวณที่มีโครเมียมต่ำตามขอบเกรนจึงถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น [5]



รูปที่ 2.7 ภาคตัดขวางของโครงสร้างจุลภาคแสดงการกัดกร่อนตามขอบเกรน

2.1.3.6 การกัดกร่อนแบบไตชั้นเคลือบ (Filiform Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายใต้ชั้นเคลือบ เช่น การทาสีพลาสติกบนผิวเหล็กกล้า หรือ การเคลือบแล็กเกอร์บนผิวแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก จัดเป็นการกัดกร่อนแบบ Crevice ประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นแบบ Under film corrosion พบได้กับโลหะที่มีการทาเคลือบผิวเพื่อป้องกัน การกัดกร่อนทั่วผิวหน้า เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน แมกนีเซียม และอลูมิเนียม ที่เคลือบผิวด้วยดีบุก เงิน ทอง ฟอสเฟต สีนํ้ามัน และแล็กเกอร์

การกัดกร่อนแบบนี้มีผลให้สภาพผิวของชิ้นงานเสียไปเท่านั้น แต่ไม่ได้ทำความเสียหายแก่โครงสร้างของชิ้นงาน ดังนั้นงานที่ต้องการผิวที่ดี เช่น กระจ่างอาหาร รถยนต์ จึงต้องระวังปัญหาจาก filiform corrosion ภายใตผิวเคลือบจะเกิดการกัดกร่อนลุกลามเป็นบริเวณ ซึ่งเป็นผลจากการเกิดการกัดกร่อนภายใต้บริเวณจำกัดคือ ภายใตผิวเคลือบ ทำให้สนิมและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น วนเวียนอยู่

ภายใต้ผิวเคลือบแล้วส่งผลต่อเนื่องให้เกิดเป็นบริเวณกว้างขึ้น การกัดกร่อนแบบริเริ่มจากบริเวณหนึ่งซึ่งเรียกว่าส่วนหัว (active head) แล้วไปปรากฏสนิมเช่น สีน้ำตาลแดงของสนิมเหล็กในส่วนหาง (inactive tail) ดังนั้นปฏิกิริยาการกัดกร่อนดำเนินไปในบริเวณส่วนหัว สำหรับเหล็กจะเกิดเป็นอ็อกไซด์เหล็ก Fe^{2+} ที่จะให้ผลทดสอบสีน้ำเงินเขียวกับสารละลายไซยาไนด์ที่ใช้ทดสอบเฉพาะบริเวณหัวและจะเห็นคราบสนิมเหล็กที่บริเวณหาง การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 65-90% ทั้งนี้ชนิดของการเคลือบผิวสีน้ำมัน แล็กเกอร์ และโลหะชนิดที่ยินยอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อยจะช่วยลดการเกิด Filiform corrosion [5]

นอกจากนั้นการขัดผิวโลหะก่อนการเคลือบก็มีผลเพราะพบว่า ทิศทางการขยายตัวของการกัดกร่อนจะไปตามรอยขีดหรือรอยขัดผิวก่อนเคลือบ การกัดกร่อนแบบนี้เริ่มจากจุดหนึ่งบนผิวโลหะด้วยการซึมผ่านแบบออสโมซิส เพราะบริเวณนั้นมีอ็อกไซด์เหล็ก (Fe^{2+}) เกิดขึ้นมาก่อนและมีความเข้มข้นสูง น้ำจากภายนอกจึงผ่านเข้ามาได้ในบริเวณ active head แต่ในส่วนของ active tail จะปรากฏสนิมเหล็กจะมีการซึมออกของน้ำออกไป ขณะนี้ออกซิเจนซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้ทั่วผิว ในส่วนหางจะเกิดสภาพกรด จากการเกิดปฏิกิริยาของสนิมกับน้ำ ทำให้การกัดกร่อนเกิดการลุกลามได้ต่อไป



รูปที่ 2.8 การกัดกร่อนใต้ชั้นเคลือบแล็กเกอร์

2.1.3.7 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion)

การกัดกร่อนชนิดนี้จะเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อน และมีความเค้นแรงดึงกระทำกับโลหะ ความเค้นนี้อาจเป็นความเค้นตกค้าง หรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อน หรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย แต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็กๆ อยู่มากมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ทนต่ออ็อกไซด์คลอไรด์ เป็นต้น ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้อง จะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนก็ได้ [5]

ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

1. ความเค้น

ต้องเป็นความเค้นดึงซึ่งอาจเป็นความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุ ความเค้นมาจากภายนอก ความเค้นเนื่องจากความร้อนหรืออาจจะเกิดจากการเชื่อมก็ได้

2. สภาวะแวดล้อม

การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้โลหะเกิดความเสียหายเนื่องจาก cracking ที่เกิดขึ้นโดยการกระทำร่วมกันของสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อกรกัดกร่อนกับ tensile stress คำว่า tensile stress มุ่งหมายเอาความเค้นที่กระทำกับโลหะ (applied stress) และความเค้นภายใน (internal residual stress) ในบางกรณีความเค้นอาจเกิดจากการสะสมตัวของผลิตภัณฑ์อันเนื่องจากการกัดกร่อน ตัวอย่าง เช่น นี้อตและสกรู เมื่อถูกวางไว้ในสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน จะถูกสะสมตัวอยู่ระหว่างนี้อตและสกรู อย่างไรก็ตามปริมาณของผลิตภัณฑ์เหล่านี้มากกว่าปริมาณดั้งเดิมของโลหะ มันจึงทำให้เกิด tensile stress ขึ้นบนสกรูซึ่งก็จะเสียหายด้วยกระบวนการ cracking

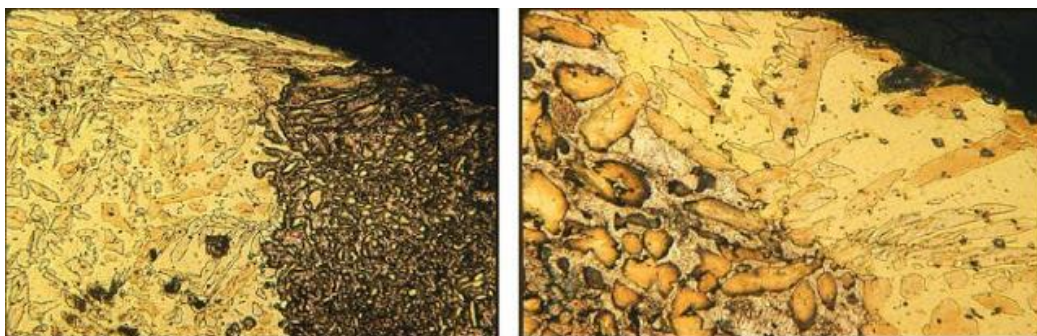
การกัดกร่อนแบบนี้ปกติมีลักษณะพิเศษคือ

- ก. ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะในโลหะผสมเท่านั้น ในโลหะบริสุทธิ์ไม่เกิด
 - ข. ประเภทของสิ่งแวดล้อมที่จะให้เกิดการแตกหักนั้นมีลักษณะเฉพาะตัว สำหรับโลหะผสมแต่ละชนิด
 - ค. การอบชุบด้วยความร้อนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปมีผลกับการแตกหัก
 - ง. การป้องกันแบบคาโรติกเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด
- ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับ stress corrosion cracking ได้แก่
- ก. อุณหภูมิ
 - ข. องค์ประกอบสารละลาย
 - ค. องค์ประกอบของโลหะ
 - ง. ขนาดของแรงเค้น
 - จ. โครงสร้างของโลหะ

2.1.3.8 การสูญเสียส่วนผสมบางตัว (Selective Leaching)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนซึ่งเกิดโดยการละลายของธาตุบางตัวจากโลหะอัลลอยด์ เป็นผลจากการกระทำซึ่งสิ่งแวดล้อมโลหะที่ว่องไวที่สุด ออกจากอัลลอยด์ เหลือไว้แต่โครงสร้างพูนซึ่งเต็มไปด้วยโลหะที่เสถียรที่สุด วัสดุที่เหลือจึงสูญเสียความแข็งแรงทางกายภาพไปมาก การกัดกร่อนแบบนี้ก็มีชื่อตามธาตุที่ละลายออกมา เช่น ถ้าสังกะสีละลายออกมาเรียกว่า dezincification

โลหะผสมประกอบด้วยโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป จากที่กล่าวมาว่าโลหะจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัว ดังนั้นโลหะที่เป็นส่วนผสมที่มีศักย์ต่ำกว่า จะถูกกัดกร่อนไป ตัวอย่างที่พบมากคือทองเหลือง (ประกอบด้วยทองแดงและสังกะสี) สูญเสียสังกะสีไปทำให้ทองเหลืองที่เหลืออยู่เป็นทองแดง ส่วนมากและพูน ความแข็งแรงต่ำลง การสูญเสียสังกะสีอาจสังเกตได้จากที่เดิมที่เคยมีสีเหลือง เมื่อสูญเสียสังกะสีไป จะทำให้มีสีแดงขึ้น ทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีผสมอยู่มากจะเกิดการสูญเสียสังกะสีได้ง่าย [5] ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างชิ้นส่วนวาล์วทองเหลืองที่เกิดการเสียหายด้วยการสูญเสียส่วนผสมบางตัว คือ มีการสูญเสียสังกะสีที่มีความไวต่อการกัดกร่อนมากกว่า แต่ยังคงเหลือทองแดงที่มีความเสถียรมากกว่าสังกะสี

กลไกการสูญเสียสังกะสีแบ่งเป็นแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

- ก. ทองเหลือง(ทองแดงและสังกะสี) ถูกกัดกร่อนหรือละลายลงไปในสารละลาย
- ข. สังกะสียังคงอยู่ในสารละลาย
- ค. ทองแดงกลับไปเป็นโลหะอีกครั้งโดยติดกับชิ้นงานเดิม

2.1.3.9 การกัดกร่อน-ความล้า (Fatigue Corrosion)

ความล้าหรือ fatigue เป็นอาการของโลหะที่ถูกแรงกระทำซ้ำๆ กัน หรือซ้ำแล้วซ้ำเล่า แรงที่กระทำเป็นได้ทั้ง tensile และ compressive stress จนที่สุดแล้วโลหะนั้นก็แตกหักเสียหาย (fracture) โดยปกติแล้ว การกัดกร่อนแบบนี้เกิดเมื่อขนาดแรงเค้นต่ำกว่าค่า yield point และเกิดเมื่อถูกกระทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าในช่วงเวลาหนึ่ง และในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วย ดังนั้นจึงถูกกระทำทั้งทางกล และทางเคมี โดยมีผลไปลดความต้านทานของโลหะจนถึงจุดที่เกิดความเสียหาย

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดในสภาวะบรรยากาศปกติ บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะ เมื่อโลหะนั้นกำลังถูกแรงกระทำ [5]

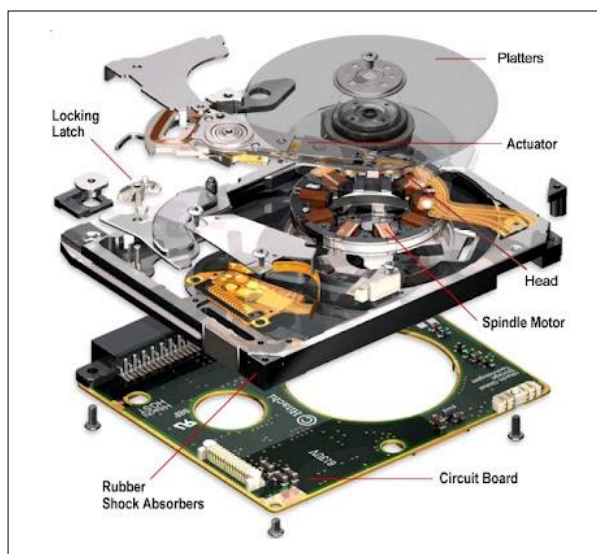
2.1.3.10 การกัดกร่อน-สึกกร่อน (Erosion Corrosion)

เมื่อมีการเสียดสีและการสึกกร่อนต่อโลหะในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ด้วยนั้น จะมีผลรวมของการกระทำต่อโลหะ อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เชิงกล และเชิงเคมีซึ่งส่งผลให้เกิดการทำลายและการเสื่อมสภาพของโลหะอย่างรวดเร็ว

การกัดกร่อนประเภทนี้เริ่มจากการกัดกร่อนที่มีของไหล ไหลผ่านโลหะและมักไหลด้วยความเร็วสูง หากของไหลนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เมื่อโลหะเริ่มสึกจะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น หากโลหะนั้นมีฟิล์มปกคลุมผิวได้ การไหลของของไหล อาจทำให้ฟิล์มถูกทำลายไปบางส่วน ถ้าฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้อย่างง่ายและรวดเร็ว การกัดกร่อนก็จะไม่รุนแรงนัก แต่ถ้าฟิล์มใหม่เกิดขึ้นได้ช้าก็จะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นรุนแรง และรวดเร็ว [5]

2.2 หัวอ่านฮาร์ดดิสและหลักการทำงาน

Hard Disk คือ อุปกรณ์สำคัญสำหรับใช้จัดเก็บ บริหารข้อมูล ในระบบคอมพิวเตอร์ ลักษณะเป็นจานโลหะที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็ก สามารถจัดเก็บ หรือลบข้อมูลได้อย่างถาวร ด้วยระบบไฟฟ้า โดยสามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เมื่อบันทึกข้อมูลลงจานแล้วข้อมูลจะคงอยู่ไม่สูญสลาย ดังนั้น Hard Disk จึงถูกจัดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บระบบปฏิบัติการโปรแกรม และข้อมูล



รูปที่ 2.10 ฮาร์ดดิส

ส่วนประกอบของ Hard Disk ที่สำคัญเรียกว่าหัวอ่าน (Head) แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการอ่านเขียนข้อมูลจะอยู่ที่ส่วนปลายของแขนหัวอ่าน (Actuator Arm) หัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์นับเป็นชิ้นส่วนที่มีราคาแพงที่สุด และลักษณะของมันก็มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์โดยรวมหัวอ่านเขียนจะเป็นอุปกรณ์แม่เหล็กมีรูปร่างคล้ายๆตัว “C” โดยมีช่องว่างอยู่เล็กน้อยโดยจะมีเส้นคอยล์พันอยู่รอบหัวอ่านเขียนนี้เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การเขียนข้อมูลจะใช้วิธีการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านคอยล์ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงที่แพลิตเตอร์ส่วนการอ่านข้อมูลนั้นจะรับค่าความเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กผ่านคอยล์ที่อยู่หัวอ่านเขียนแล้วแปลงค่าที่ได้เป็นสัญญาณส่งไปยังซีพียู ต่อไปเมื่อเทคโนโลยีพัฒนาไปความหนาแน่นของข้อมูลก็ยิ่งเพิ่มขึ้นในขณะที่เนื้อที่สำหรับเก็บข้อมูลก็จะลดขนาดลง ขนาดบิตของข้อมูลที่เล็กนี้ทำให้อายุการใช้งานที่เกิดขึ้นแล้วส่งไปยังหัวอ่านนั้นอ่อนลง และอ่านได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้ทางผู้พัฒนาจึงจำเป็นต้องวางหัวอ่านให้กับสื่อมากขึ้นเพื่อลดการสูญเสียสัญญาณจากเดิมในปี 1973 ที่หัวอ่านเขียนบินอยู่ห่างสื่อประมาณ 17 microinch (ล้านส่วนของนิ้ว) มาในปัจจุบันนี้หัวอ่านเขียนบินอยู่เหนือแผ่นแพลิตเตอร์เพียง 3 microinch เท่านั้น เหมือนกับการนำเครื่องบิน โบอิง 747 มาบินด้วยความเร็วสูงสุดโดยให้บินห่างพื้นเพียง 1 ฟุต แต่ที่สำคัญก็คือหัวอ่านเขียนนั้นไม่เคยสัมผัสกับแผ่นแพลิตเตอร์ที่กำลังหมุนอยู่เลยเมื่อเครื่องคอมพิวเตอร์ถูกปิดฮาร์ดดิสก์จะหยุดหมุนแล้วหัวอ่านเขียนจะเคลื่อนที่ไปยังพื้นที่ที่ปลอดภัยและหยุดอยู่ตรงนั้นซึ่งแยกอยู่ต่างหากจากพื้นที่ที่ใช้เก็บข้อมูล [6]



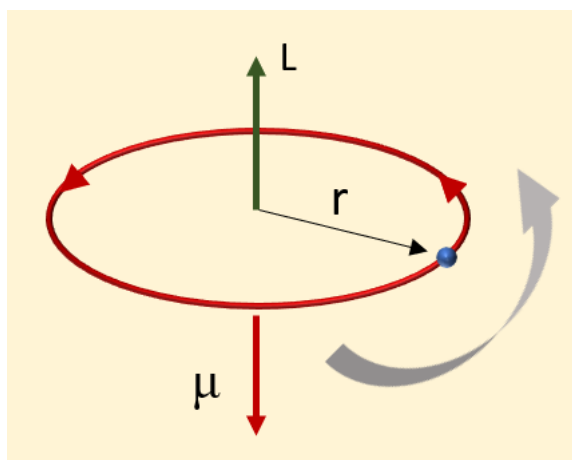
รูปที่ 2.11 หัวอ่าน

2.3 ความเป็นแม่เหล็กในสสาร (Magnetism)

ความเป็นแม่เหล็กของวัสดุเริ่มมาจากระดับพื้นฐาน คือการเกิดโมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากออร์บิทัล และสปินของอิเล็กตรอน

2.3.1 โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากออร์บิทัล

การที่กระแสไหลในขดลวดตัวนำก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก เป็นแบบจำลองที่ดีของการทำความเข้าใจว่ามีอะไรเกิดขึ้นในอะตอม และโมเลกุลของสสารบางอย่างที่ทำให้มีสมบัติแม่เหล็กแตกต่างกัน



รูปที่ 2.12 อิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียสทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก

การศึกษาเริ่มต้นด้วยแบบจำลองอะตอมง่ายๆ ที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนโคจรรอบ (Orbital Motion) นิวเคลียส ด้วยรัศมี r ซึ่งสามารถคำนวณกระแส(I) ได้ดังนี้

$$\text{จาก} \quad I = \frac{e}{T} \quad (2.1)$$

$$I = \frac{ev}{2\pi r} \quad ; \quad T = \frac{2\pi r}{v} \quad (2.2)$$

ขนาดของโมเมนต์แม่เหล็ก(μ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu = IA \quad (2.3)$$

$$\text{แทนค่าสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.3) ; } \mu = \frac{1}{2} evr \quad (2.4)$$

และเนื่องจากโมเมนต์เชิงมุมของการเคลื่อนที่เป็นวงกลม(L) คำนวณได้จาก

$$L = mvr \quad (2.5)$$

$$\text{แทนค่าสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.4) ; } \mu = \left(\frac{e}{2m} \right) L \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) จะเห็นว่าโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมแปรผันตรงกับโมเมนต์เชิงมุมของอิเล็กตรอน เนื่องจากสสารทุกชนิดประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก แต่สารส่วนใหญ่ไม่แสดงความเป็นแม่เหล็กเพราะโมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะถูกหักล้างกับโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอนตัวอื่น ทำให้สารส่วนใหญ่มีโมเมนต์แม่เหล็กรวมมีค่าเป็นศูนย์ [7]

2.3.2 โมเมนต์แม่เหล็กเนื่องจากสปิน

นอกจากออร์บิทัลแล้วอิเล็กตรอนยังมีสปิน(Spin) ที่ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็ก สปินเป็นสมบัติทางควอนตัมของอนุภาคเปรียบเทียบง่าย ๆ กับการหมุนรอบตัวเอง สปินของอิเล็กตรอนมี 2 ชนิด คือ อัป และดาวน์ โมเมนต์แม่เหล็กที่เกิดจากสปินในบางสารจะหักล้างกันหมด(โดยเฉพาะที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ที่มีสปินอัปและดาวน์เท่ากัน) สปินของโปรตรอนและนิวตรอน ก่อให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กเช่นกันแต่น้อยมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอน เนื่องจากอนุภาคทั้งสองนี้ต่างมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอน

2.3.3 ประเภทของความเป็นแม่เหล็ก

ความเป็นแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

1. Diamagnetism คือความเป็นแม่เหล็กที่อ่อนที่สุด เกิดในอะตอมที่มีโมเมนต์ลัพท์เป็นศูนย์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำสารจะแสดงความเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนๆ ในทิศต้านสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น ตามกฎของเลนซ์

2. Paramagnetism อะตอมของสารพาราแมกเนติกส์มีโมเมนต์แม่เหล็กลัพท์ไม่เป็นศูนย์แต่พลังงานความร้อนจะทำให้โมเมนต์ลัพท์ของแต่ละอะตอมชี้แบบสุ่ม ทำให้ความเป็นแม่เหล็กของสารทั้งก่อนเป็นศูนย์ ในกรณีที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำเท่านั้น ที่โมเมนต์แม่เหล็ก จะเรียงตัวไปในแนวเดียวกัน และแสดงความเป็นแม่เหล็ก

3. Ferromagnetism ที่อุณหภูมิห้องมีธาตุ 3 ชนิด คือ เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล ที่แสดงความเป็นแม่เหล็กแรงกว่าสารอื่นๆ เรียกว่าเป็นสารเฟอร์โรแมกเนติกส์ สารประกอบและโลหะผสมอื่นๆ ที่มีธาตุใดๆ ใน 3 ธาตุนี้ คือสารที่นำมาทำแม่เหล็กถาวร ความพิเศษของสารประเภทนี้คือมีการแบ่งเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่าโดเมนแม่เหล็ก (Magnetic Domain) ภายในโดเมนโมเมนต์แม่เหล็กชี้ไปทางเดียวกัน ระหว่างโดเมนจะถูกกั้นด้วยส่วนที่เรียกว่าผนังโดเมนแม่เหล็ก (Domain Wall)

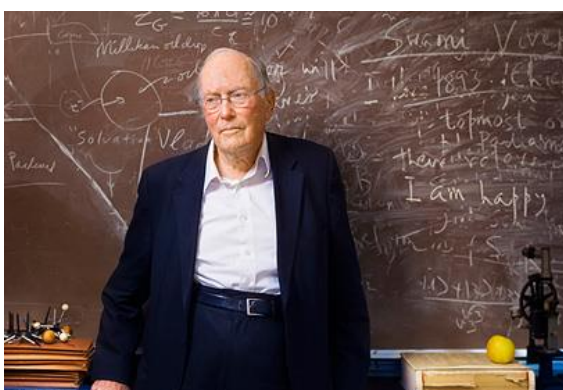
2.4 เลเซอร์

2.2.1 ประวัติ

เลเซอร์(LASER) ตรงกับคำภาษาอังกฤษที่ว่า Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ซึ่งแปลความได้ว่า การขยายแสงโดยอาศัยหลักการแผ่รังสีแบบกระตุ้น เลเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ให้กำเนิดแสง โดยพลังงานจากแสงเลเซอร์ มีคุณสมบัติที่หลากหลายขึ้นอยู่กับการออกแบบและการนำไปใช้งาน การค้นพบเลเซอร์เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1954 โดย ซี. เอช.ทาวน์ส (C.H. Townes) ได้เสนอเป็นหลักการหรือทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์เอาไว้ ซึ่งผลงานในครั้งนั้นทำให้เขาได้รับการประกาศเกียรติคุณให้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1964

หลักการของ ซี. เอช.ทาวน์ส (C.H. Townes) ก่อให้เกิดแรงผลักดันให้มีการศึกษาและสานต่อเรื่องเทคโนโลยีเลเซอร์จนมีวิวัฒนาการที่ก้าวหน้ามาเป็นลำดับโดยในเดือนพฤษภาคม ปีค.ศ. 1960 ที่ โอเตอร์ ไมแมน (Theodore Maiman) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับแสงเลเซอร์ขึ้นที่สถาบันวิจัย ฮิวจ์ (Hughes Research Laboratories)

ที่โอเตอร์ ไมแมนนำหลักการของซี. เอช.ทาวน์ส มาประดิษฐ์เลเซอร์เครื่องแรกของโลกขึ้นโดยเป็นเลเซอร์ที่ทำจากทับทิม(Ruby Laser) ซึ่งจัดว่าเป็นเลเซอร์ของแข็งและในปีเดียวกันนั้นเองจาแวน (Javan) ก็ได้ประดิษฐ์เลเซอร์ที่ทำจากก๊าซฮีเลียม-นีออนได้เป็นผลสำเร็จซึ่งถือว่าเป็นเลเซอร์แบบก๊าซ จากนั้นพัฒนาการเกี่ยวกับเทคโนโลยีเลเซอร์ก็พัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่อง มีการผลิตเลเซอร์ชนิดต่างๆ ออกมามากมาย ซึ่งมีทั้งที่ทำจาก ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และจากสารกึ่งตัวนำจำพวกไดโอด

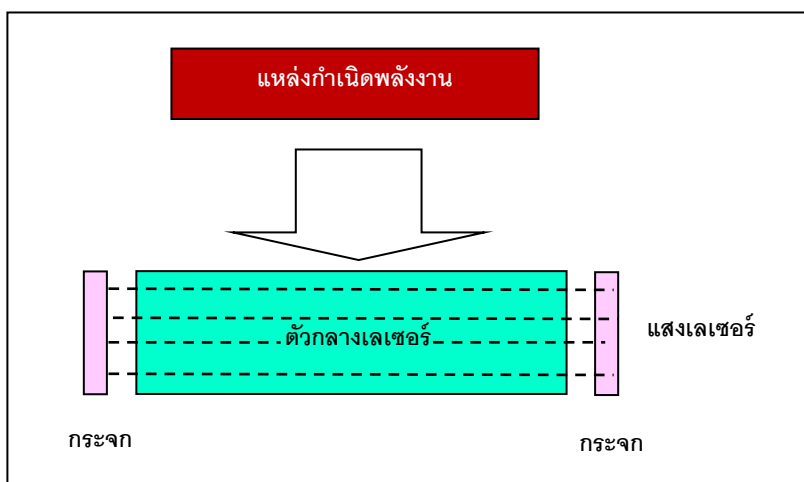


รูปที่ 2.13 ซี. เอช.ทาวน์ส

2.2.2 ส่วนประกอบของเลเซอร์

เลเซอร์จะต้องมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) เป็นวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งอาจเป็นแก๊ส ของแข็ง ของเหลว หรือสารกึ่งตัวนำ
2. ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (optical resonator) เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ที่ทำให้เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีกจนถึงจุดเลสซิง ประกอบด้วยกระจก 2 แผ่น วางหันหน้าเข้าหากัน โดยระหว่างกลางมีตัวกลางเลเซอร์อยู่
3. แหล่งกำเนิดพลังงาน (energy source) เป็นตัวกระตุ้นให้อะตอมอยู่ในสภาวะที่เป็นประชากรผกผัน



รูปที่ 2.14 รูปแสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์

2.5 การส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity)

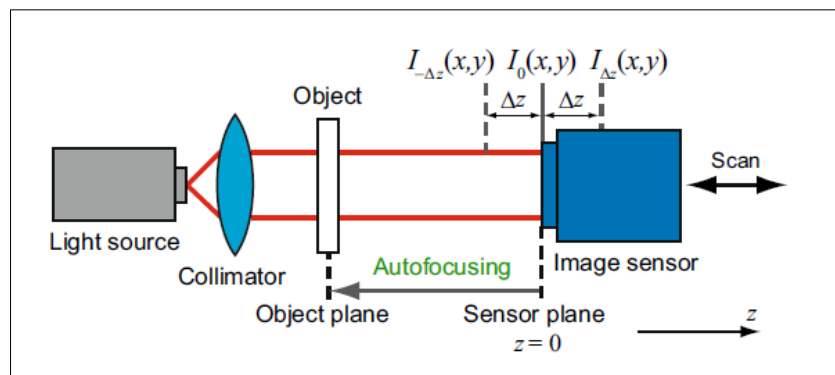
ดวงตาของมนุษย์สามารถบอกค่าความสว่างเล็กน้อย และบอกสีได้ (amplitude) แต่ไม่สามารถบอกความแตกต่างของเฟส (phase) ของคลื่นได้ เพื่อแก้ปัญหานี้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical phase microscope) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหานี้ โดยใช้หลักการแปลงความแตกต่างของ phase ให้เป็น amplitude หรืออาจกล่าวได้ว่าเปลี่ยน phase object ให้เป็น amplitude object ทำให้มนุษย์มองเห็นได้ด้วยตาซึ่งจะให้ผลลัพธ์เป็นเชิงคุณภาพ (qualitative) เทคนิคนี้ถูกคิดค้นโดย Zernike ซึ่งทำให้เขาได้รับรางวัล Nobel prize สาขาฟิสิกส์ปี 1953

บางเทคนิคนี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับเฟสเชิงคุณภาพ (qualitative phase) ในขณะที่บางส่วนให้ข้อมูลเชิงปริมาณ (quantitative phase) เช่น เทคนิคอินเตอร์เฟอโรเมทรี (interferometric techniques) การวัดเฟสเชิงปริมาณสามารถทำได้โดยถ่ายภาพความเข้มของแสงที่มารบกวน (noise intensity) ผ่านโพกัส ทั้งเทคนิค interferometric และเทคนิค non-interferometric โดยส่วนใหญ่จะใช้ในการวัด phase ส่วนทฤษฎี Kalman filter สามารถใช้วัดได้ทั้ง phase และ amplitude ดังนั้นจึงสามารถคาดคะเนรูปร่างของแหล่งกำเนิดที่ไม่รู้ได้ ซึ่งแสดงให้เห็นความคลาดเคลื่อนระหว่าง phase จริง และ phase ที่ถูกสร้างกลับขึ้นมาใหม่ (Reconstruction) โดยหลักการ TIE (Transport of Intensity Equation) นั้นถูกละเลยไป

หลักการคำนวณที่ใช้สำหรับหาฟังก์ชันคลื่นที่สมบูรณ์ (phases และ amplitudes) จากการบันทึกความเข้ม บนระนาบของรูปภาพและระนาบของการเลี้ยวเบน ถูกเสนอโดย Gerchberg และ Saxton Algorithm ของ Gerchberg และ Saxton อาศัยพื้นฐานความจริงที่ว่า การวัดสนามของแสง (optical fields) ในระนาบ 2 ระนาบ อาศัยความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของแสงในย่านสเปกตรัมต่างๆ อย่างไรก็ตาม การจำกัดศาของ temporal และ spatial coh ของคลื่นสำหรับการให้ได้เฟสกลับมาได้ถูกสร้างขึ้น

ในขณะที่วิธีการที่กล่าวข้างต้นทั้งหมดนี้เป็นวิธีแบบ non-interferometric ส่วนวิธีโฮโลกราฟฟิก (holographic) ถูกใช้ในการคำนวณ phase โดยการอาศัยหน้าคลื่นอ้างอิงของแสง ซึ่งวิธีนี้ได้ถูกริเริ่มโดย Gabor ตามที่ได้กล่าวไว้ ภาพโฮโลแกรมจะมีการแทรกสอดของแสงที่มีความเข้มเพียงพอที่จะสร้างภาพที่มีหน้าคลื่นสมบูรณ์ได้อย่างน่าสนใจ

Transport of Intensity (TI) เป็นวิธี non-interferometric ซึ่งวัด phase จากการถ่ายภาพความเข้มในการเดินทางของแสงที่ตำแหน่งต่างๆกัน ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การทดลองด้วยวิธีการส่งผ่านความเข้มแสง

Teague ได้เสนอวิธีการกู้คืนเฟสโดยใช้หลักการการแก้ปัญหาของ Green's function โดยใช้เทคนิค non-interferometric หลังจากนั้น Teague, Roddier และคณะ ได้เสนอวิธีแก้ปัญหา TIE ที่ง่ายขึ้นคือใช้ส่วนจินตภาพ (imaginary part) ของสมการอนุพันธ์ของคลื่น (paraxial wave) สมมุติฐานวิธีการแก้ปัญหาของ TIE นี้เป็นแบบ curl free การกู้คืน phase โดยใช้ TIE จะต้องจัดการทดลองอย่างง่ายโดยวัดค่าความเข้มของแต่ละระนาบตามทิศทางการแพร่กระจายของสนามของแสง (Optical Field) ทั้งก่อนและหลังระนาบของภาพ (image plane) [8]

สมการการส่งผ่านความเข้มแสงและเฟสนั้นได้เริ่มต้นมาจากสมการคลื่น ดังสมการที่ 2.7

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.7)$$

โดย c คือ อัตราเร็วของแสง (speed of light in free space) และ $E(\vec{r}, t)$ คือสนามของแสง (optical field) เมื่อสนามของแสงกับความถี่ (single frequency) เดียว ω_0 มีการเดินทางของแสงในระนาบแกน z ปกติ ดังนั้นสนามของแสงสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.8

$$E(r, z) = E(r, z)e^{j(\omega t - k_0 z)} \quad (2.8)$$

เมื่อ k_0 คือเลขคลื่น (wavenumber) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{2\pi}{\lambda}$ และ $\frac{\omega_0}{c}$ ส่วน E คือสนามของแสงเชิงซ้อน และ λ คือความยาวคลื่น แทนสมการที่ 2.8 ลงในสมการที่ 2.7 จะได้สมการที่ 2.9

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - 2jk_0 \frac{\partial}{\partial z}\right)E(r, z) = 0 \quad (2.9)$$

ในที่นี้เราสนใจเฉพาะการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน z ดังนั้นจะเขียนสนามของแสงให้อยู่ในรูปอนุพันธ์อันดับที่ 2 ดังสมการที่ 2.10

$$\left|\frac{\partial^2 E(r, z)}{\partial z^2}\right| \ll \left|2jk_0 \frac{\partial E(r, z)}{\partial z}\right| \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 เราสามารถลดรูปสมการได้ดังสมการที่ 2.11

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - 2jk_0 \frac{\partial}{\partial z}\right)E(r, z) = 0 \quad (2.11)$$

แอมพลิจูดเชิงซ้อน (complex amplitude) ของสนามของแสง สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.12

$$E(r, z) = \sqrt{I(r, z)}e^{-j\phi(r, z)} \quad (2.12)$$

เราสามารถหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 และอนุพันธ์อันดับที่ 2 จากสมการที่ 2.12 และแทนอนุพันธ์อันดับที่ 1 และอนุพันธ์อันดับที่ 2 ลงในสมการที่ 2.11 จะได้สมการคลื่นเฉียดแกน (Paraxial wave equation) ดังสมการที่ 2.13

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} I^{-\frac{1}{2}} - \frac{1}{4} \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 I^{-\frac{3}{2}} - \frac{j}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right) I^{-\frac{1}{2}} - j \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} I^{\frac{1}{2}} \\ & - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 I^{\frac{1}{2}} - \frac{j}{2} I^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} I^{-\frac{1}{2}} - \frac{1}{4} \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 I^{-\frac{3}{2}} \\ & - \frac{j}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right) I^{-\frac{1}{2}} - j \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} I^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 I^{\frac{1}{2}} \\ & - \frac{j}{2} I^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right) - 2jk_0 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial I}{\partial z}\right) I^{-\frac{1}{2}} - j \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right) I^{\frac{1}{2}} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 เราจะได้สมการการส่งผ่านเฟสดังสมการที่ 2.14

$$\frac{1}{2} I^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2}\right) \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2}\right) - \frac{1}{4} I^{-\frac{3}{2}} \left[\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2\right] - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 I^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 I^{\frac{1}{2}} - 2k_0 \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) I^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (2.14)$$

จากนั้นคูณสมการที่ 2.14 ด้วย $I^{-\frac{1}{2}}(k_0)^{-2}$ จะได้สมการที่ 2.15

$$\frac{1}{k_0^2} \left[\frac{1}{2I} \nabla_{\perp}^2 I - \frac{1}{4I^2} \left(\left(\frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \right) - \left(\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right) - 2k_0 \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] = 0 \quad (2.15)$$

และสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.16

$$\frac{1}{k_0^2} \left[\frac{1}{2I} \nabla_{\perp}^2 I - \frac{1}{4I^2} (\bar{\nabla}_{\perp} I \cdot \bar{\nabla}_{\perp} I) \right] = \frac{1}{k_0^2} (\bar{\nabla}_{\perp} \phi \cdot \bar{\nabla}_{\perp} \phi) + \frac{2}{k_0} \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (2.16)$$

และจากสมการที่ 2.16 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 2.17

$$\frac{1}{\sqrt{I}} \nabla_{\perp}^2 \sqrt{I} = \frac{1}{\sqrt{I}} \frac{\partial^2 (\sqrt{I})}{\partial x^2} = \frac{1}{2\sqrt{I}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sqrt{I}} \frac{\partial I}{\partial x} \right) = \frac{1}{2I} \nabla_{\perp}^2 I - \frac{1}{4I^2} (\bar{\nabla}_{\perp} I \cdot \bar{\nabla}_{\perp} I) \quad (2.17)$$

แทนสมการที่ 2.17 ลงในสมการที่ 2.16 จะได้สมการการส่งผ่านความเข้มเฟสดังสมการที่ 2.18

$$\nabla_{\perp}^2 \sqrt{I}(x, y) = \sqrt{I}(x, y) \left[\bar{\nabla}_{\perp} \phi(x, y) \cdot \bar{\nabla}_{\perp} \phi(x, y) + 2k_0 \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right] \quad (2.18)$$

ส่วนจินตภาพของสมการที่ 2.13 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.19

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right) I^{-\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} I^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right) I^{-\frac{1}{2}} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} I^{-\frac{1}{2}} \\ & - \frac{1}{2} I^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) I^{-\frac{1}{2}} = 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการของการส่งผ่านความเข้มแสง (TIE) ได้ดังสมการ

$$\left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right) \right] + \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) I + k_0 \left(\frac{\partial I}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.20)$$

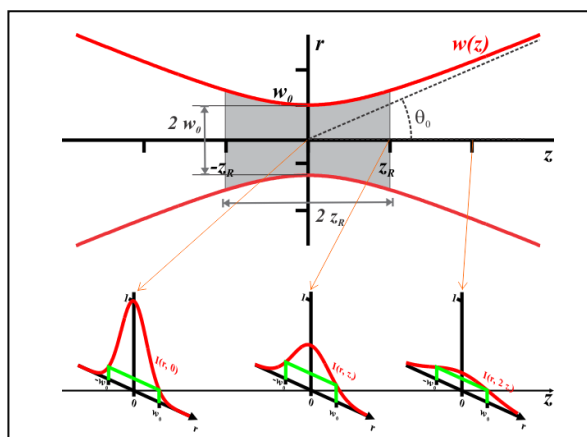
หรือ

$$\bar{\nabla}_{\perp} \cdot (I(x, y, z) \bar{\nabla}_{\perp} \phi(x, y, z)) = -k_0 \frac{\partial I(x, y, z)}{\partial z} ; \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.21)$$

โดยระยะที่ใช้ในการเคลื่อนที่เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งความเข้มควรเลือกระยะในช่วง Rayleigh range [9][10] ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.22 เพื่อนำไปใช้ในสมการ TIE [11] ดังสมการที่ 2.23

$$Z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial I(x, y; z)}{\partial z} \approx \frac{I_1(x, y, z_0 + \Delta z) - I_2(x, y, z_0 - \Delta z)}{2\Delta z} \quad (2.23)$$



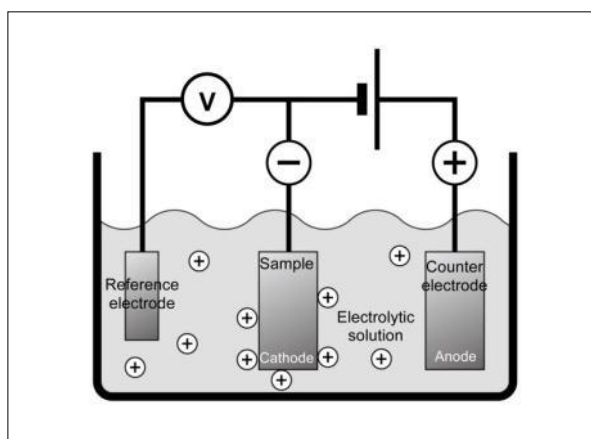
รูปที่ 2.16 ความเข้มที่ระยะ Rayleigh range

จากนั้นนำสมการ TIE มาคำนวณเฟสดังสมการ 2.24 [8][12]

$$\phi_0(x, y; z) = IFT \left[\frac{1}{(k_x^2 + k_y^2)} FT \left[\nabla_{\perp} \cdot \left[\frac{\nabla_{\perp}}{I_0(x, y; z)} \left[IFT \left[\frac{1}{(k_x^2 + k_y^2)} FT \left[k_0 \frac{\partial I_0(x, y; z)}{\partial z} \right] \right] \right] \right] \right] \right] \quad (2.24)$$

2.6 การเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition)

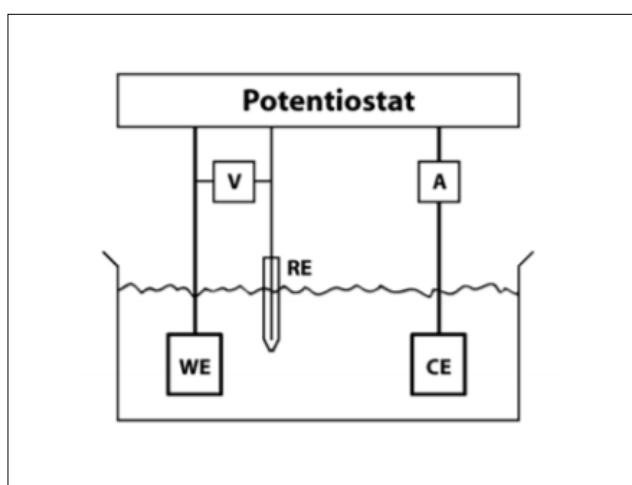
เป็นการเตรียมวัสดุนาโนโดยการทำให้โลหะไปพอกพูนอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า ทำให้โลหะไอออนที่อยู่ในสารละลายเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยโลหะไอออนจะเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบของอิเล็กโทรดและเปลี่ยนสภาพเป็นโลหะที่เป็นของแข็งพอกพูนอยู่ที่ขั้วดังรูปที่ 2.17 นิยมใช้ในการเตรียมท่อนาโน ฟิล์มบางนาโน



รูปที่ 2.17 กระบวนการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า

2.7 การศึกษาการกัดกร่อนโดยวิธีการโพเทนทีโอดนามิกส์ โพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarisation)

วิธีการโพเทนทีโอดนามิกส์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์พฤติกรรมของการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะ ตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมกำหนด โดยเฉพาะโลหะหรือโลหะผสมที่มีสมบัติสภาวะกัดกร่อน-สภาวะป้องกัน (Active passive) หรือฟิล์มบางที่มีสมบัติปกป้อง (Passive film) โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบสามขั้ว ดังรูปที่ 2.18 ประกอบด้วยชิ้นงานโลหะตัวอย่างเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode: WE) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าในระบบเคมีไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการกัดกร่อนอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะของความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนในสารละลาย ตามกำหนด ขั้วอ้างอิงมาตรฐาน (Reference electrode: RE) ใช้เพื่อสร้างความเสถียรให้กับการวัดค่าความต่างศักย์ในระบบ เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งาน จะเกิดค่าความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วทั้งสอง ทำให้การวัดค่าความต่างศักย์บริเวณนี้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงใช้ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงวัดความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยขั้วไฟฟ้านี้ต้องไม่มีกระแสที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าใช้งานไหลผ่าน จากนั้นต่อให้ครบวงจรด้วยขั้วไฟฟ้าคู่ใช้งาน (Counter Electrode: CE หรือ Auxiliary electrode) ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร โดยขั้วไฟฟ้านี้จะถูกออกแบบให้กระแสที่เกิดขึ้นในวงจรไหลผ่าน ได้โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าไปทางบวกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อเร่งการกัดกร่อน และติดตามกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส (i) หรือกราฟโพลาริเซชัน (Polarisation curve) ซึ่งแสดงพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะ ทั้งการกัดกร่อน การเกิดขึ้นของฟิล์ม การคงอยู่ของฟิล์ม และการแตกของฟิล์ม [13]



รูปที่ 2.18 องค์ประกอบของเซลล์ไฟฟ้าแบบสามขั้ว

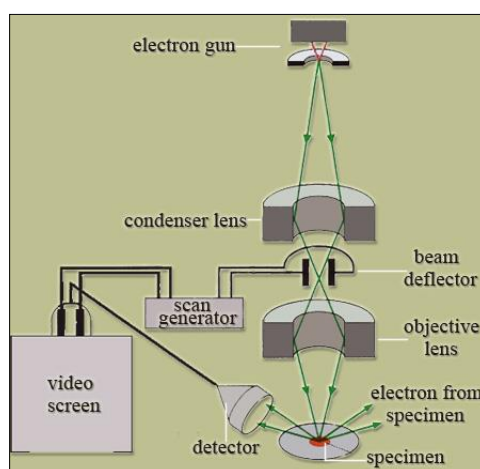
2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope)

2.8.1 ประวัติ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope) ประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2481 โดยเอม วอง เอนเดนนิ ใช้ศึกษาโครงสร้างภายนอกของวัตถุ ลักษณะผิวภายนอกของเซลล์ ผิวโลหะ มองเห็นความลึกภาพปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์เป็นภาพ 3 มิติ มีกำลังขยายสูงหลายหมื่นเท่า

2.8.2 หลักการทำงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย [14]



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM

2.9 โลหะทรานซิชัน (Transition Metal)

2.9.1 คอปเปอร์ (Cu)



รูปที่ 2.20 ลักษณะของแร่ทองแดง

โลหะทองแดงรู้จักกันตั้งแต่อ่อนประวัติศาสตร์ และได้มีการนำมาใช้ประโยชน์มากกว่า 6,000 ปีแล้ว ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดโลหะหนึ่งในรูปของโลหะอิสระ เพราะมีสมบัติที่ดีหลายประการคือ [15]

- ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก แม้ในสภาวะกัดกร่อนอย่างรุนแรง เช่น ในน้ำทะเล
- นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมาก
- แข็งแรง ดึงเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของทองแดง

เลขอะตอม	29 เป็นธาตุแรกของหมู่ IB จัดเป็นโลหะและโลหะทรานซิชัน
น้ำหนักอะตอม	63.54 amu
จุดหลอมเหลว	1083 °c
จุดเดือด	2582 °c
ความหนาแน่น	8.94 g/cc ที่ 20 °c
เลขออกซิเดชัน	+1, +2

2.9.2 เหล็ก (Fe)



รูปที่ 2.21 ลักษณะของเหล็ก

มนุษย์รู้จักเหล็กตั้งแต่อ่อนประวัติศาสตร์ มีหลักฐานยืนยันว่ามนุษย์เรารู้จักโลหะนี้ไม่น้อยกว่า 8,000 ปี อย่างไรก็ตาม 1,000 – 2,000 ปีก่อนคริสตศักราชเหล็กจัดเป็นโลหะที่หายาก และในสมัยนั้นแหล่งสำคัญของเหล็กมาจากสะเก็ดดาว (meteorites) ตั้งแต่ 1,000 – 2,000 ปีก่อนคริสตศักราช เป็นต้นมา มนุษย์เริ่มรู้จักวิธีถลุงเหล็กจากแร่เหล็ก และนำเหล็กมาใช้ประโยชน์ในทุกยุคทุกสมัย เหล็กเป็นโลหะที่ใช้ประโยชน์และมีประโยชน์มากที่สุดในปัจจุบัน เหล็กเกือบทั้งหมดที่ถลุงได้ใช้ประโยชน์ในรูปของโลหะและโลหะเจือ (คือเหล็กกล้า) ใช้เป็นโครงสร้างในการก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องจักร ฯลฯ เพราะเหล็กมีสมบัติที่ดีหลายประการ [16] คือ

สามารถหล่อแล้วขึ้นรูปใหม่ได้และความทนทาน

- สามารถใช้ในการโค้ง งอ ม้วน ตัดเป็นรูปร่างรูปแบบและอื่นๆ
- มีความต้านทานแรงดึงสูงมาก
- นำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของเหล็ก

เลขอะตอม	26 เป็นธาตุในหมู่ VIII ในตารางธาตุ เป็นธาตุแรกของไอร์ออนไตรเอต (Fe, Co และ Ni) จัดเป็นโลหะและโลหะทรานซิชัน
น้ำหนักอะตอม	55.847 amu
จุดหลอมเหลว	1536.5 +/- 1°C
จุดเดือด	3000°C
ความหนาแน่น	7.8733 g/cc ที่ 20°C
เลขออกซิเดชัน	+ 2, + 3

2.9.3 โคบอลต์ (Co)



รูปที่ 2.22 ลักษณะของโคบอลต์

ในปี ค.ศ. 1735 Brandt เป็นคนแรกที่ค้นพบธาตุ Co และในปี ค.ศ. 1742 เขาก็สามารถสกัดธาตุโคบอลต์ในรูปของธาตุอิสระได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1750 Bergman ได้ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของธาตุที่ค้นพบได้ใหม่นี้ ชื่อของธาตุนี้ตรงกับคำเยอรมัน "Kobalt" ซึ่งมาจากคำกรีก "cobalos" มีความหมายว่า "เหมือง" คำเยอรมัน "Kobalt" หมายถึงปีศาจแห่งเหมืองเป็นชื่อที่ใช้เรียกสินแร่บางชนิด โดยนักขุดเหมืองของเมือง Saxony เพราะสินแร่เหล่านี้ก่ออันตรายต่อมือและเท้าได้ ต่อมาพบว่าสินแร่เหล่านี้มีสารประกอบของโคบอลต์และอาร์เซนิกเป็นองค์ประกอบ [17]

- ประมาณ 80 % ของ Co ทั้งหมดใช้ในการผลิตโลหะเจือ และที่สำคัญได้แก่การผลิต แม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กอ่อน

- โคบอลต์ที่เหลือใช้ในรูปของสารประกอบ เช่น เป็นตัวช่วยทำให้สีแห้งเร็วขึ้น

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของเหล็ก

เลขอะตอม	27 เป็นธาตุในหมู่ VIII คาบที่ 4 ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน
น้ำหนักอะตอม	58.9332 amu
จุดหลอมเหลว	1493 °C
จุดเดือด	3100 °C
ความหนาแน่น	8.90 g/cc
เลขออกซิเดชัน	+2, +3

2.10 เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)

เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steels) มีสมบัติทนต่อการเกิดสนิมเนื่องมาจากการเติมธาตุโครเมียม (chromium) ลงไประหว่างกระบวนการหลอมเหล็ก ในปริมาณที่เหมาะสม (ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก) โครเมียมที่เติมลงไปจะทำให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ($Cr_xO_y(OH)_z$) ปกคลุมผิวเหล็กไว้ ทำให้เนื้อเหล็กไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอากาศเกิดเป็นสนิมได้ การทำให้ Stainless steel เป็นสนิมคือการถูกทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ที่เคลือบผิวออกไปในสภาวะที่ Stainless steel สามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น ถ้าเหล็กกล้าไร้สนิมถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรอยนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็กก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้ เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลัก ตามลักษณะของโครงสร้างจุลภาค [18]

1) เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade)

เป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่เป็นพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมทั้งหมด ได้แก่ AISI 430 AISI 446 AISI 409 เป็นต้น เป็นเหล็กกล้าที่ผสมโครเมียมในปริมาณร้อยละ 12-27 ขึ้นอยู่กับแต่ละเกรด โดยความต้านทานต่อการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุโครเมียมเป็นสำคัญ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ (ferrite) ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าทั่วไป ไม่สามารถทำการชุบแข็ง (hardening) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ และยังคงสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้

2) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade)

เป็นกลุ่มเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เกรดที่รู้จักกันมาก เช่น AISI 304 304L 316 และ 316L เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีโครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ (austenite) ซึ่งเป็นผลจากการเติมธาตุนิเกิล (nickel) หรือธาตุแมงกานีส (manganese) ขึ้นอยู่กับแต่ละเกรด โครงสร้างจุลภาคแบบออสเทนไนต์จะมีสมบัติโดดเด่นด้านการยึดตัวสูงกว่าโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ ทำให้สามารถขึ้นรูปเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้ได้โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกร้าว นอกจากนี้ โครงสร้างออสเทนไนต์ยังเป็นโครงสร้างที่แม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้ (แต่ถ้าหากทำการขึ้นรูปมาแล้วจะทำให้แม่เหล็กดูดติดบริเวณที่ทำการขึ้นรูปได้ เนื่องจากโครงสร้างบริเวณที่ถูกขึ้นรูปจะเปลี่ยนแปลงไปจากโครงสร้างออสเทนไนต์แล้ว)

3) เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic grade)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก แต่มีปริมาณธาตุคาร์บอนที่สูงกว่าเพื่อทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็ง (hardening) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ โดยเกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เช่น AISI 403 420 เป็นต้น โครงสร้างจุลภาคภายหลังการชุบแข็งจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ (martensite) การใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก ส่วนใหญ่คำนึงถึงความแข็งแรงและความทนทานต่อการเกิดสนิมในระดับปานกลางเท่านั้น เนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่สูงจะทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง แต่ก็ยังคงไม่เป็นสนิมในสารละลายที่มีการกัดกร่อนไม่สูงมากนักหรือในสารละลายที่เป็นกลางได้ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ลูกปืน เพล่า เฟือง สปริง เป็นต้น

4) เหล็กกล้าไร้สนิมสองเฟส (Duplex grade)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะร่วมทางโครงสร้างจุลภาคระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกแต่มีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 ชนิด โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เกิดจากการมีปริมาณของธาตุไนเกิลไม่ถึงร้อยละ 8 และมีปริมาณของธาตุโครเมียมสูงมากกว่าร้อยละ 20 ซึ่งทำให้ได้โครงสร้างผสมระหว่างเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ ตัวอย่างของกลุ่มนี้ เช่น AISI 329 เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีราคาค่อนข้างแพงเนื่องจากมีความแข็งแรงและความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง (เนื่องจากปริมาณโครเมียมสูง)

5) เหล็กกล้าไร้สนิมแบบตกผลึกแข็ง (Precipitation-hardening grade, PH grade)

เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการใช้งานน้อยในประเทศไทย โดยเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้มีความแข็งแรงสูงเนื่องจากเกิดการตกผลึกของเฟสต่างๆ เช่น Ni_3Al , Ni_3Ti และ Ni_3Cu ภายในเนื้อวัสดุที่มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (เกรด AISI 17-4 PH), โครงสร้างกึ่งออสเทนไนต์ (เกรด AISI 17-7 PH) หรือโครงสร้างออสเทนไนต์ (เกรด AISI 600) ซึ่ง จุดเด่นที่สำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้คือชิ้นงานภายหลังจากการอบชุบมีโอกาสบิดเบี้ยวน้อย

2.11 น้ำตามธรรมชาติ (Production Water)

Production Water คือน้ำตามธรรมชาติที่มีอยู่ในแหล่งปิโตรเลียมผลิตขึ้นมาได้พร้อมกับการผลิตน้ำมัน โดยปริมาณน้ำตามธรรมชาติที่ผลิตขึ้นได้จะแตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณน้ำมันดิบและน้ำตามธรรมชาติ (ลูกบาศก์เมตรต่อปี) ที่ผลิตได้ในปี 1996 จากแหล่งผลิตน้ำมัน 3 แหล่ง [19]

แหล่งน้ำมัน	น้ำมันดิบที่ผลิตได้ (ลูกบาศก์เมตรต่อปี)	น้ำตามธรรมชาติที่ผลิตได้ (ลูกบาศก์เมตรต่อปี)
Oseberg	29,000,000	1,432,000
Brage	7,000,000	1,856,000
Troll	14,500,000	4,382,000

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)

M. Basunia [8] ได้ศึกษาความลึกของรูลูกเต๋า ด้วยวิธีการส่งผ่านความเข้มของแสง (Transport of Intensity Equation) และเฟส (Transport of Phase Equation) โดยใช้ Ar-ion เลเซอร์ 514 นาโนเมตร ทำให้แสงขนานโดยใช้ pinhole และเลนส์นูน L1 ที่มีความยาวโฟกัส 250 มิลลิเมตร จากนั้นใช้ beam splitter แยกแสงขนานออกเป็น 2 ลำ โดยให้แสงขนาน 1 ลำ ไปตกกระทบยังตัวอย่าง แล้วสะท้อนกลับมาผ่าน beam splitter ไปยังเลนส์นูน L2 และ L3 ที่มีความยาวโฟกัส 200 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อให้แสงขนานอีกครั้ง จากนั้นใช้กล้อง CCD ในการรับภาพ โดยใช้ระยะในการเลื่อนกล้องเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร โดยบันทึกภาพความเข้มทั้งหมด 7 ภาพ คือ $I_{-3}, I_{-2}, I_{-1}, I_0, I_1, I_2, I_3$ จากนั้นแปลงความเข้มที่ได้เป็นเฟส $\varphi_{-2}, \varphi_{-1}, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ และแปลงเฟสที่ได้กลับไปเป็นความเข้มอีกครั้ง

จะได้ I_{-1} , I_0 , I_1 แล้วแปลงความเข้มที่ได้กลับเป็นเฟสสุดท้ายคือ ϕ_0 นำเฟสสุดท้ายไปคำนวณหาความลึกของรูลูกเต๋าโดยใช้โปรแกรม MATLAB

A. Chansena และ S.Sutthirungwong [20] ได้ศึกษาอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe ซึ่งเป็นอุปกรณ์หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยการจำลองชิ้นงานตัวอย่างด้วยการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าลงบนโลหะทองแดง ด้วยอัตราส่วนเชิงมวลของ Co-Fe ต่างๆกัน และหาอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าโดยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาไรเซชัน จากนั้นนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไปหาอัตราการกัดกร่อน จากผลการทดลองพบว่าอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสม Co-Fe มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนเชิงมวลของ Fe

T. Pojtanabuntoeng, C. Saiwan, S. Sutthiruangwong และ D. L. Gallup [19] ได้ศึกษาผลกระทบของปรอท อุณหภูมิ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณความเข้มข้นคลอไรด์ และค่าพีเอชต่อการกัดกร่อนของผลึกผลิตก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทย โดยเลือกใช้เหล็กกล้าคาร์บอนชนิด L80 และ สแตนเลสสตีล ชนิด 420 ซึ่งมีปริมาณธาตุโครเมียมเจืออยู่ 13% (โดยน้ำหนัก) เพื่อศึกษาโดยวิธี โพเทนชิโอดนามิกโพลาไรเซชัน สารละลายยกัดกร่อนที่นำมาใช้เป็นสารละลายจำลองของน้ำที่ผลิตได้จากหลุมโดยใช้องค์ประกอบตามข้อมูลจากหลุมผลิตจริงจากอ่าวไทย จากผลการทดลองพบว่าคลอไรด์ไอออน (1% - 3.5% โซเดียมคลอไรด์) เร่งการกัดกร่อนโดยทำลายฟิล์มที่ผิวหน้าของวัสดุ

B. Emrah, F. Emmanuel, N. Masih Nilchian, S. Daniel และ U. Michael [21] ได้ศึกษาเซลล์เฮลาโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity Equation) จากการถ่ายภาพในระยะโฟกัส (focus) และระยะที่ไม่ใช่โฟกัส (defocus) โดยการเลือกใช้ Δz น้อยๆเพื่อลด noise ที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากระยะ Δz จะมีผลต่อการ reconstruction ภาพ และเปรียบเทียบกับกล้องจุลทรรศน์โฮโลกราฟฟิกแบบดิจิทัล (Digital Holographic Microscope, DHM) ซึ่งเป็นเทคนิคการทดสอบเชิงคุณภาพ โดยภาพที่ได้มีความละเอียดของปริมาณความเข้มสีของเฟสสูงในระดับนาโนเมตร และมีความละเอียดในการวิเคราะห์ภาพสูง แต่เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์โฮโลกราฟฟิกแบบดิจิทัลมีข้อเสียในเรื่องของราคาที่สูง

Koshi Komuro และ Takanori Nomura [12] ได้ใช้เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity Equation) ซึ่งจัดระบบแสงโดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 685.2 นาโนเมตร แล้วทำให้แสงขนานไปตกกระทบวัตถุ แสงผ่านวัตถุมาตกกระทบที่กล้อง CCD จากนั้นบันทึกภาพ 3 ภาพ คือที่ระยะโฟกัส $I_0(x,y)$ แล้วทำการเคลื่อนกล้อง $\Delta z = 1$ มิลลิเมตร จะได้ภาพ $I_{\Delta z}(x,y)$ และ $I_{-\Delta z}(x,y)$ ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดการรบกวน (noise) น้อย เนื่องจากเป็นระยะที่เคลื่อนตำแหน่ง (defocus) น้อยๆ

Chao Zuo, Qian Chen, และ Anand Asundi [22] ได้ศึกษาการการจัดเรียงตัวของ micro-bumps บนพื้นผิวของซิลิกอนด้วยเทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟฟี และเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง ผลการทดลองพบว่าเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงให้ผลลัพธ์ของเฟสที่ดีกว่าเนื่องจากเป็นการจัดแสงในลักษณะ noninterferometer ซึ่งไม่ต้องทำให้แสงสองลำแทรกสอดกัน แต่เทคนิคดิจิทัลโฮโลกราฟฟีนั้นเป็นการจัดแสงในลักษณะ interferometer

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีดำเนินงานวิจัย รวมทั้งอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ โดยเนื้อหาจะประกอบไปด้วย (1) การเตรียมชิ้นงานสำหรับใช้ในการศึกษาการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization) และสารละลายเพื่อใช้ในการทดสอบ ซึ่งเนื้อหาในหัวข้อนี้ประกอบด้วย 1. การเตรียมโลหะผสม Co-Fe 2. การเตรียมสแตนเลสชนิด AISI 304 และ 3. การเตรียมสารละลายสำหรับใช้ในการทดสอบสแตนเลสชนิด AISI 420 รวมถึงการเตรียมสแตนเลสชนิด AISI 420 (2) การวิเคราะห์ผลการทดลอง ประกอบด้วย 1. วิเคราะห์ลักษณะและรูปแบบของการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe, สแตนเลสชนิด AISI 304 และสแตนเลสชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity) และ 2. วิเคราะห์ลักษณะและรูปแบบของการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe, สแตนเลสชนิด AISI 304 และสแตนเลสชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมชิ้นงาน

3.1.1 การเตรียมโลหะผสม Co-Fe

นำโลหะทองแดงรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.625 นิ้ว ดังรูปที่ 3.1 มาขัดด้วยกระดาษทรายหมายเลข 600 1200 และ 2000 ตามลำดับ โดยใช้ น้ำปราศจากไอออนร่วมในการขัดเพื่อลดความร้อน นำทองแดงที่ได้แช่ในเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำชิ้นโลหะทองแดงมาเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า โดยสารละลายที่ใช้ในการเคลือบผิวซึ่งประกอบด้วย $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 80:20 และ 40:60 แล้วนำไปทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) โดยสารละลายเพื่อการทดสอบการกัดกร่อนเตรียมจากน้ำปราศจากไอออนผสมกรดไฮโดรคลอริกที่มี pH เท่ากับ 5 [2] โดยโลหะผสม Co-Fe ที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนทิโอดนามิกโพลาริเซชันแล้วนั้นได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ รองผู้อำนวยการสำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.1 โลหะทองแดงรูปทรงกระบอก

3.1.2 การเตรียมสแตนเลสชนิด AISI 304

นำสแตนเลสชนิด AISI 304 รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.625 นิ้ว ดังรูปที่ 3.2 มาขัดด้วยกระดาษทรายหมายเลข 600 1000 1500 และ 2000 ตามลำดับ โดยใช้ น้ำปราศจากไอออนร่วมในการขัดเพื่อลดความร้อน แล้วนำสแตนเลสชนิด AISI 304 ที่ได้แช่ในเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำชิ้นสแตนเลสมาเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน ก่อนนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) โดยสารละลายเพื่อการทดสอบการกัดกร่อนเตรียมจากน้ำปราศจากไอออน โดยสแตนเลสชนิด AISI 304 ที่ผ่านการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนทีโอไดนามิกโพลาริเซชันนั้นได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ รองผู้อำนวยการสำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.2 สแตนเลสชนิด AISI 304 รูปทรงกระบอก

3.1.3 การเตรียมสารละลาย และสแตนเลสชนิด AISI 420

3.1.3.1 การเตรียมสารละลาย (produced water) สำหรับทดสอบการกัดกร่อน

ในการทดลองนี้จะใช้สารเคมีเกรด analytical reagent สำหรับทดสอบการกัดกร่อนซึ่งมีความบริสุทธิ์เพียงพอที่ใช้กับงานทางวิทยาศาสตร์ โดยสารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมสารละลาย produced water จำลอง ประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความบริสุทธิ์ 99.98%, โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) ความบริสุทธิ์ 99.7%, โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความบริสุทธิ์ 99.8%, แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต (CaCl₂·2H₂O) ความบริสุทธิ์ 99% และแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂·6H₂O) ความบริสุทธิ์ 99% ซึ่งสารเคมีทั้งหมดนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยสารละลาย produced water จำลอง ถูกเตรียมจากค่าความเข้มข้นของไอออนต่างๆโดยอ้างอิงตามข้อมูลจริงของหลุมผลิตก๊าซตามธรรมชาติดังตารางที่ 3.1 [23]

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบในน้ำ produced water ของหลุมผลิตก๊าซตามธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
ค่าความเข้มข้น (mg/L)	7.7	1.65	0.35	41	1682.5	2317.75	615.75

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมสารละลายสำหรับทดสอบการกัดกร่อนเป็น 2 การทดลองโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095%wt และ 3.5%wt

- การทดลองที่ 1 เตรียมสารละลาย produced water โดยการชั่ง NaCl 0.9470 กรัม, KCl 0.0783 กรัม, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.0047 กรัม, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ = 0.0029 กรัม และ NaHCO_3 3.1910 กรัม ในปริมาตร 1 ลิตร จะทำให้ได้ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของไอออนต่างๆดังตารางที่ 3.2 และจากตารางที่ 3.2 จะได้ความเข้มข้นรวมของ Na^+ 1245.7959 มิลลิกรัมต่อลิตร, Cl^- 615.6441 มิลลิกรัมต่อลิตร, K^+ 41.0612 มิลลิกรัมต่อลิตร, Ca^{2+} 1.6503 มิลลิกรัมต่อลิตร, Mg^{2+} 0.3467 มิลลิกรัมต่อลิตร และ HCO_3^- 2317.7299 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของไอออนชนิดต่างๆใกล้เคียงกับข้อมูลดังตารางที่ 3.1

- การทดลองที่ 2 เตรียมสารละลาย produced water โดยการชั่ง NaCl 35.0000 กรัม, KCl 0.0783 กรัม, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.0047 กรัม, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ = 0.0029 กรัม และ NaHCO_3 3.1910 กรัม ในปริมาตร 1 ลิตร จะทำให้ได้ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของไอออนต่างๆดังตารางที่ 3.2 และจากตารางที่ 3.2 จะได้ความเข้มข้นรวมของ Na^+ 14641.3841 มิลลิกรัมต่อลิตร, Cl^- 21273.0559 มิลลิกรัมต่อลิตร, K^+ 41.0612 มิลลิกรัมต่อลิตร, Ca^{2+} 1.6503 มิลลิกรัมต่อลิตร, Mg^{2+} 0.3467 มิลลิกรัมต่อลิตร และ HCO_3^- 2317.7299 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นของสารเคมีสำหรับเตรียมน้ำ produced water จำลอง

ชนิดสารเคมี	ความเข้มข้นของสารเคมี (mg/L)	ความเข้มข้นของแคตไอออน (mg/L)	ความเข้มข้นของแอนไอออน (mg/L)
NaCl (0.095% wt)	947.0000	372.5258	574.4742
NaCl (3.5% wt)	35000.0000	13768.1140	21231.8860
KCl	78.3000	41.0612	37.2388
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	4.5700	1.6503	2.9197
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2.9000	0.3467	1.0114
NaHCO_3	3191.0000	873.2701	2317.7299

3.1.3.2 การเตรียมสแตนเลสชนิด AISI 420

นำสแตนเลสชนิด AISI 304 รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.625 นิ้ว ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมืองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 3.3 มาขัดด้วยกระดาษทราย หมายเลข 600 1000 1500 และ 2000 ตามลำดับ โดยใช้น้ำปราศจากไอออนร่วมในการขัดเพื่อลดความร้อน นำสแตนเลสที่ได้แช่ในเอทิลแอลกอฮอล์ เป็นเวลา 5 นาที

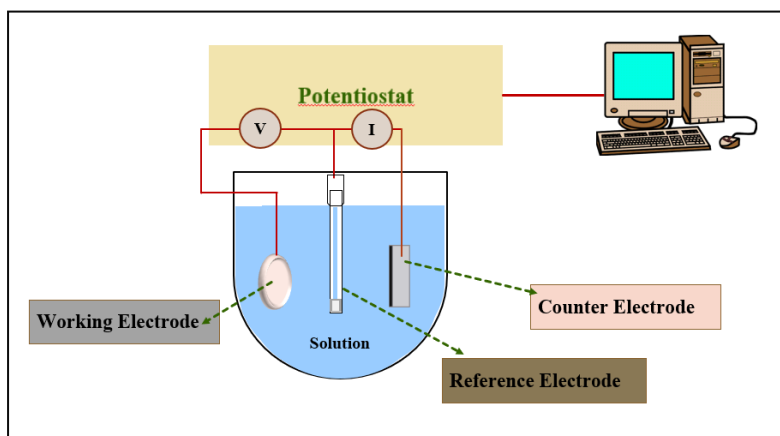


รูปที่ 3.3 สแตนเลสชนิด AISI 420 รูปทรงกระบอก

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของสแตนเลสชนิด AISI 420

ชนิด	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)											
	Al	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	Sn	Fe
13% Cr	0.01	0.35	12.94	0.08	0.42	0.04	0.24	0.019	0.022	0.25	0.01	Bal.

จากนั้นนำชิ้นสแตนเลสมาเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน ก่อนนำไปทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมี โดยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ถูกนำมาต่อเข้ากับเซลล์ทดสอบการกัดกร่อนชนิด 3 ขั้ว ดังรูปที่ 3.4 ประกอบไปด้วยขั้วทำงาน (Working electrode) คือ สแตนเลสชนิด AISI 420 ขั้วตรงข้าม (Counter electrode) ซึ่งเป็นแผ่นแพลทินัมผิวเรียบขนาด $1.5 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$ และขั้วอ้างอิง (Reference electrode) จะเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดคาลอเมลอิ่มตัว (Saturated calomel electrode) ซึ่งชี้เข้าหาขั้วทำงานผ่านทางท่อขนาดเล็กของลั๊กกิน ที่ผิวหน้าของสแตนเลส AISI 420 จะถูกปิดด้วยวงแหวนเทฟลอนเพื่อให้มีพื้นที่ผิวเปิดออกสู่สารละลายเท่ากับ 1 cm^2 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งใช้น้ำ produced water จำลอง ในหัวข้อ 3.1.3.1 เป็นสารละลายเพื่อการทดสอบการกัดกร่อน สารละลายนี้จะถูกไล่ความชื้น และออกซิเจน โดยการพ่นด้วยไนโตรเจนก่อนการทดสอบเป็นเวลา 30 นาที และยังคงพ่นไนโตรเจนต่อไประหว่างที่ดำเนินการทดสอบการกัดกร่อน

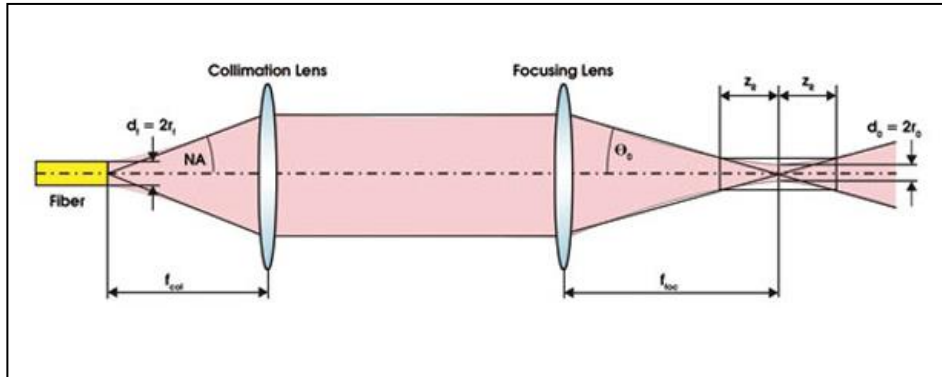


รูปที่ 3.4 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน

3.2 การวิเคราะห์ผล

3.2.1 วิธีการหาช่วงระยะที่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนกล้อง

ก่อนทำการทดลองต้องหาระยะที่เหมาะสมในการเคลื่อนกล้อง CCD ซึ่งระยะที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงของเรย์ลีห์ของแหล่งกำเนิดแสง [24] โดยในการทดลองนี้ใช้ He-Ne เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร การทดลองแสงดังรูปที่ 3.5

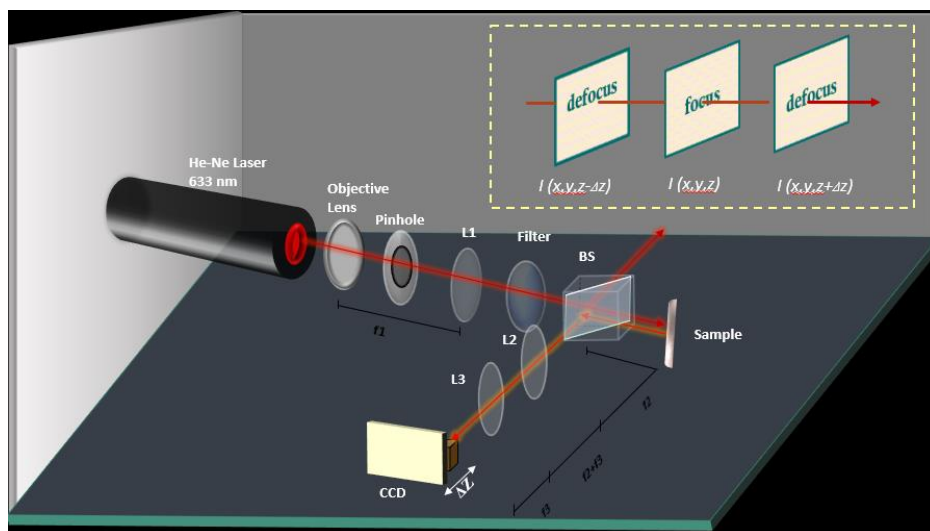


รูปที่ 3.5 แสดงการออกแบบการทดลองสำหรับหาระยะเรย์ลีห์ของแหล่งกำเนิดแสง

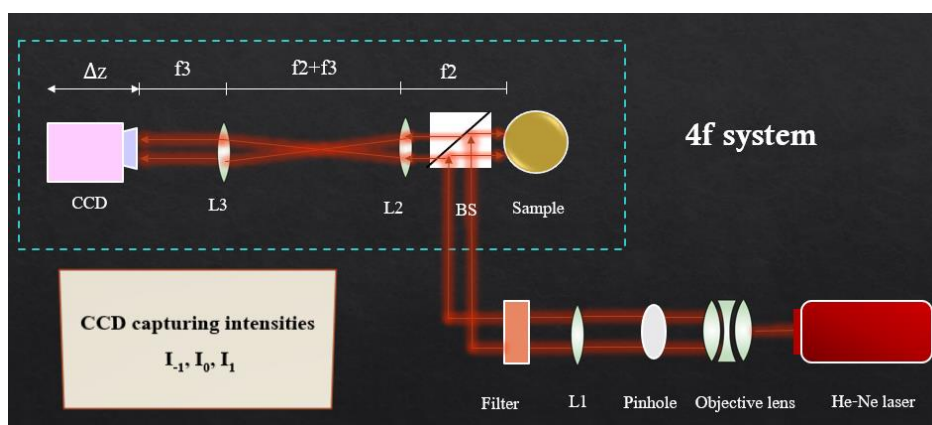
3.2.2 วิเคราะห์ลักษณะการกักร้อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe, สแตนเลสชนิด AISI 420 และสแตนเลสชนิด AISI 304 ด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง (Transport of Intensity)

สำหรับการทดลองนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร กำลัง 12.0 มิลลิวัตต์ ขนาดลำแสง 0.88 มิลลิเมตร เนื่องจากแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดนั้นมีขนาดเล็กมากจึงวาง objective lens ไว้หน้าแหล่งกำเนิดแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ เมื่อแสงเลเซอร์ผ่าน objective lens ทำให้ขนาดของลำแสงใหญ่ขึ้น จากนั้นวาง pinhole ซึ่งทำหน้าที่บีบลำแสงเพื่อจะใช้ลำแสงเฉพาะส่วนที่มีความเข้มเท่านั้น แล้วทำให้ลำแสงขนานโดยใช้เลนส์นูน L1 โดยวางห่างจาก objective lens เป็นระยะเท่ากับความยาวโฟกัสของเลนส์นูน L1 เมื่อลำแสงขนานตลอดระยะนั้นแล้วจึงวาง filter เพื่อกรองความเข้มของแสง เนื่องจากถ้าใช้แสงที่มีความเข้มมากเกินไปนั้นจะทำให้ถ่ายภาพไม่ชัดจน เมื่อได้ขนาดและความเข้มของลำแสงตามที่ต้องการแล้วจึงวาง beam splitter เมื่อแสงขนานผ่าน beam splitter จะถูกแยกเป็นสองทางที่ beam splitter คือ 50% ทะลุผ่านไปทางด้านขวาไปยังชิ้นงานตัวอย่าง และอีก 50% สะท้อนขึ้นไปด้านบน โดยการทดลองนี้จะใช้เฉพาะลำแสงขนานที่สะท้อนไปทางด้านขวาเท่านั้น จากนั้นชิ้นงานตัวอย่างจะสะท้อนลำแสงกลับไปในแนวเดิมไปยัง beam splitter อีกครั้ง แล้วลงมาตกที่เลนส์นูน L2 ด้านล่าง โดยระยะจากชิ้นงานตัวอย่างถึงเลนส์นูน L2 เท่ากับความยาวโฟกัสของเลนส์นูน L2 จากนั้นวางเลนส์นูน L3 ที่ระยะห่างจากเลนส์นูน L2 เป็นระยะเท่ากับความยาวโฟกัสของเลนส์นูน L2+L3 เพื่อให้ลำแสงขนานอีกครั้ง แล้วนำกล้อง CCD มารับภาพ โดยวางกล้อง CCD ห่างจากเลนส์นูน L3 เป็นระยะเท่ากับความยาวโฟกัสของเลนส์นูน L3 จากนั้นบันทึกภาพที่ตำแหน่ง focus ซึ่งเป็นระยะที่ชัดที่สุดจะได้ความเข้มแสงเท่ากับ $I(x,y,z)$ และเลื่อนกล้อง CCD ที่ตำแหน่ง defocus ในแกน z ก่อนและหลังระยะนั้น แล้วบันทึกภาพ ทำให้ได้ภาพที่มีความเข้มเท่ากับ $I(x,y,z-\Delta z)$ และ $I(x,y,z+\Delta z)$ โดยการออกแบบการทดลองสำหรับ

งานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 [8][25][26][27] จากนั้นนำภาพที่บันทึกได้ทั้ง 3 ภาพมาประมวลผลเพื่อศึกษาความลึกและการเจริญเติบโตของหลุมการกัดกร่อนด้วยโปรแกรม ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก Prof. Anand Krishna Asundi มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ประเทศสิงคโปร์



รูปที่ 3.6 แสดงการออกแบบการทดลองสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนในลักษณะ 3 มิติ



รูปที่ 3.7 แสดงการออกแบบการทดลองสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนในลักษณะ 2 มิติ

3.2.3 วิเคราะห์ลักษณะการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe, สแตนเลส AISI 304 และ สแตนเลส AISI 420 ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope)

ยี่ห้อ : Carl Zeiss

รุ่น : EVO@MA10

สถานที่ตั้งอุปกรณ์ : ศูนย์เครื่องมือวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สจล.

ในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe, สแตนเลส AISI 304 และ สแตนเลส AISI 420 โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด นำไปติดบนแท่นวางชิ้นงาน แล้วถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ได้กับเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสง



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 4

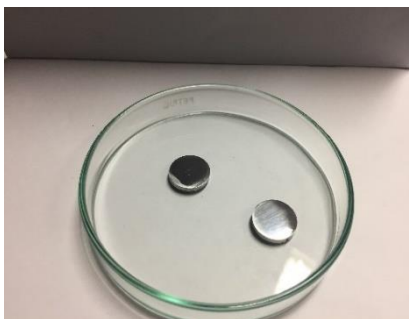
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และผลการทดลองของเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับใช้ในการตรวจสอบการกัดกร่อน โดยเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจสอบการกัดกร่อนกับเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยตัวอย่างสำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 1 การเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 แล้วนำไปทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท โดยการเพิ่มความเข้มข้นในสารละลายที่ใช้ในการทดสอบ(produced water) เป็น 0.095 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์การกัดกร่อนด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงและเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รวมถึงผลการทดลองจากการประมวลผลภาพในลักษณะ 3 มิติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาความลึกและแนวโน้มการเจริญเติบโตของหลุมการกัดกร่อน การทดลองที่ 2 การเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 แล้วนำไปทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์การกัดกร่อนด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงและเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการทดลองที่ 3 การเตรียมโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ซึ่งเตรียมได้จากเทคนิคการเคลือบผิวด้วยสารละลาย $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 80:20 และ 40:60 แล้วนำไปทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์การกัดกร่อนด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงและเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1 ผลจากการศึกษาการกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420

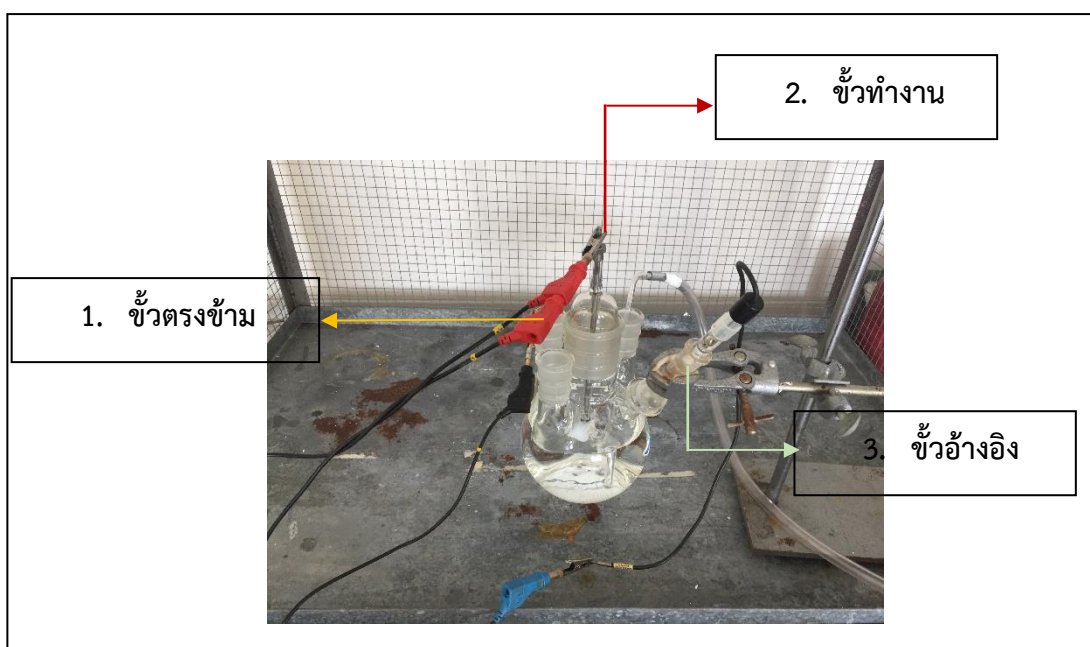
4.1.1 การเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท

นำสแตนเลสชนิด AISI 420 รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.625 นิ้ว มาขัดด้วยกระดาษทราย หมายเลข 600 1000 1500 และ 2000 ตามลำดับ เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและชั้นออกไซด์ที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ โดยใช้น้ำปราศจากไอออนร่วมในการขัดเพื่อลดความร้อน นำสแตนเลสชนิด AISI 420 ที่ได้แช่ในเอทิลแอลกอฮอล์ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างสแตนเลสมาเป่าให้แห้งด้วยลมร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.1 ก่อนนำไปทดสอบการกัดกร่อน



รูปที่ 4.1 สแตนเลสชนิด AISI 420 ที่ถูกทำความสะอาดผิวหน้าแล้ว

จากนั้นนำชิ้นสแตนเลสมาทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat) ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ถูกนำมาต่อเข้ากับเซลล์ทดสอบการกัดกร่อนชนิด 3 ขั้ว ดังรูปที่ 4.2 ประกอบไปด้วย 1. ขั้วทำงานสแตนเลสชนิด AISI 420 2. ขั้วตรงข้าม(แผ่นแพลทินัม) และ 3. ขั้วอ้างอิงชนิดคาโลเมลอิมตัวซึ่งชี้เข้าหาขั้วทำงานผ่านทางท่อขนาดเล็กของลั๊กกิน ที่ผิวหน้าของสแตนเลส AISI 420 จะถูกปิดด้วยวงแหวนเทฟลอนเพื่อให้มีพื้นที่ผิวเปิดออกสู่สารละลายเท่ากับ 1 cm^2 ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งใช้น้ำ produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.3 และ 3.5% โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.4 โดยอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชันนั้นได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ รองผู้อำนวยการสำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 4.2 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิด 3 ขั้ว



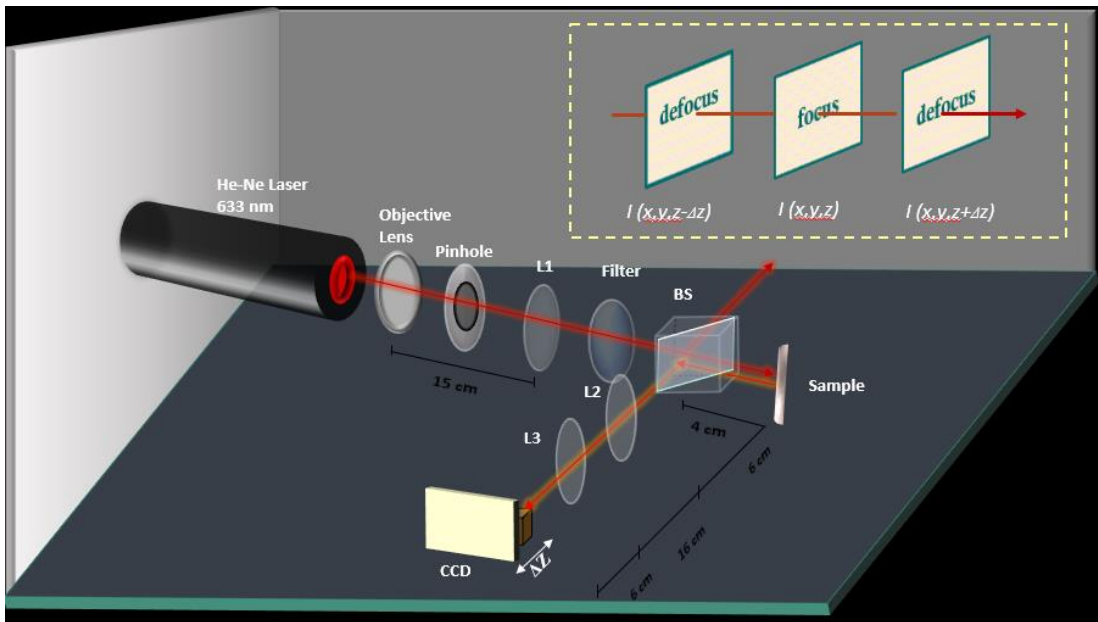
รูปที่ 4.3 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.4 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก

4.1.2 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก

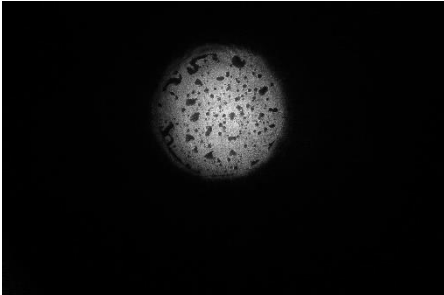
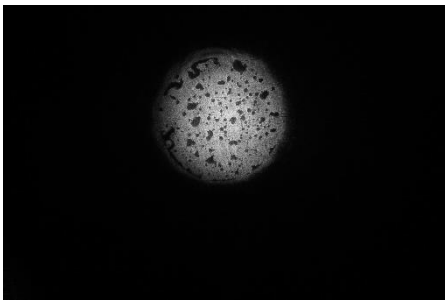
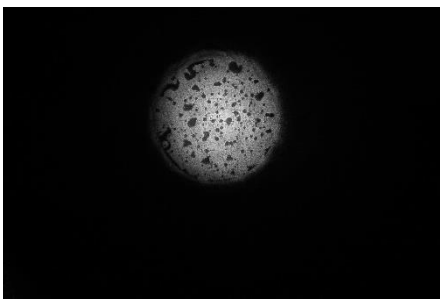
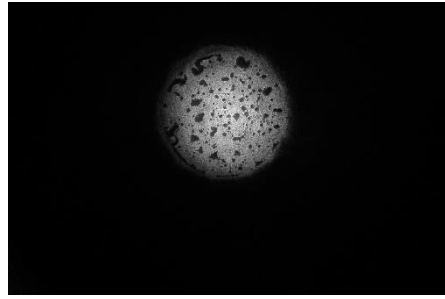
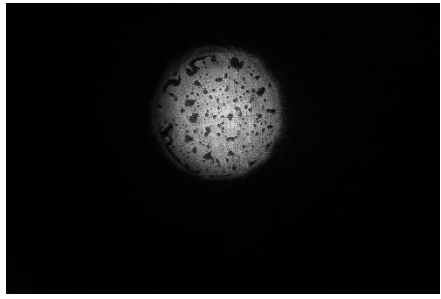
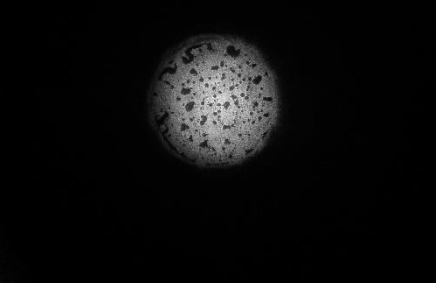
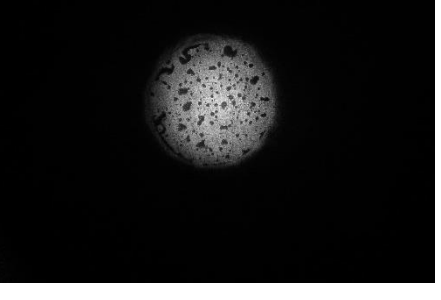
นำตัวอย่างที่เตรียมได้จากเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันมาตรวจสอบลักษณะการกัดกร่อน โดยสำหรับการทดลองนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ขนาดลำแสง 0.88 มิลลิเมตร เนื่องจากแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดนั้นมีขนาดเล็กมากจึงวาง objective lens ไว้หน้าแหล่งกำเนิดแสง เมื่อแสงเลเซอร์ผ่าน objective lens ทำให้ขนาดของลำแสงใหญ่ขึ้น จากนั้นวาง pinhole ซึ่งทำหน้าที่บีบลำแสงเพื่อจะใช้ลำแสงเฉพาะส่วนที่มีความเข้มและกำหนดขนาดลำแสงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่นำมาศึกษา จากนั้นทำให้ลำแสงขนานโดยใช้เลนส์นูน L1 ที่มีความยาวโฟกัสเท่ากับ 150 มิลลิเมตร โดยวางห่างจาก objective lens เป็นระยะเท่ากับ 15 เซนติเมตร เมื่อลำแสงขนานตลอดระนาบแล้วจึงวาง filter เพื่อลดความเข้มของแสงลงเนื่องจากถ้าใช้แสงที่มีความจํามากเกินไปนั้นจะทำให้ถ่ายภาพไม่ชัดเจน เมื่อได้ขนาดและความเข้มของลำแสงตามที่ต้องการแล้วจึงวาง beam splitter เมื่อแสงขนานผ่าน beam splitter จะถูกแยกเป็นสองทางที่ beam splitter คือ 50% สะท้อนขึ้นไปด้านบน และอีก 50% ทะลุผ่านไปทางด้านขวาไปยังชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 โดยการทดลองนี้จะใช้เฉพาะลำแสงขนานที่สะท้อนไปทางด้านขวาเท่านั้น จากนั้นชิ้นงานตัวอย่างจะสะท้อนลำแสงกลับไปแนวเดิมไปยัง beam splitter อีกครั้ง แล้วใช้เลนส์นูน L2 ที่มีความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร รวมแสงที่ด้านล่าง โดยระยะจากชิ้นงานตัวอย่างถึงเลนส์นูน L2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร จากนั้นวางเลนส์นูน L3 ที่มีความยาวโฟกัส 60 มิลลิเมตร โดยวางเลนส์นูน L3 ไว้ที่ระยะห่างจากเลนส์นูน L2 เป็นระยะเท่ากับ 16 เซนติเมตร เพื่อให้ลำแสงขนานและมีขนาดเท่าเดิมมาตกที่กล้อง CCD โดยวาง CCD ไว้ห่างจากเลนส์นูน L2 เป็นระยะ 6 เซนติเมตร จากนั้นบันทึกภาพที่ความเข้มแสงเท่ากับ $I(x,y,z)$ และเลื่อนกล้อง CCD ที่ตำแหน่ง defocus ในแกน z ก่อนและหลังระนาบ แล้วบันทึกภาพ ทำให้ได้ภาพที่มีความเข้มเท่ากับ $I(x,y,z-\Delta z)$ และ $I(x,y,z+\Delta z)$ ที่ระยะต่างๆดังตารางที่ 4.1 ซึ่งระยะ defocus จะอยู่ในช่วง Rayleigh range (Z_R) คือ 0.31 เมตร โดยการออกแบบการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.5



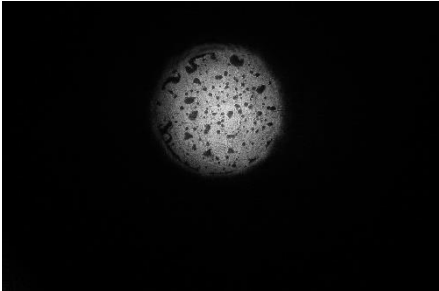
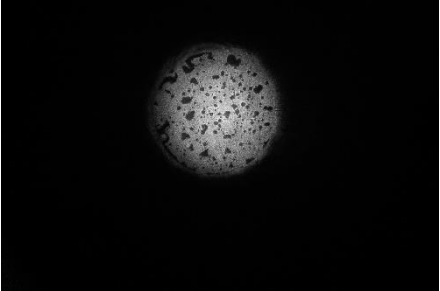
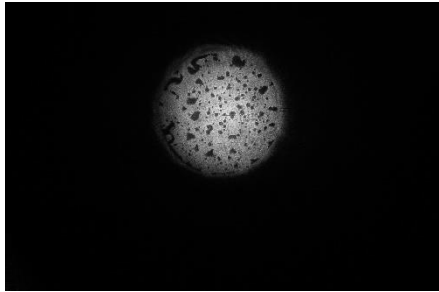
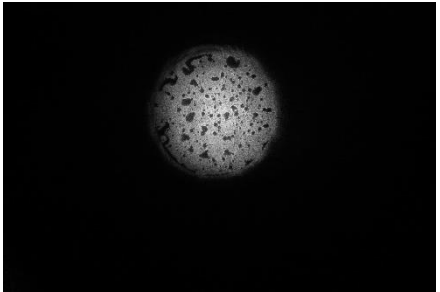
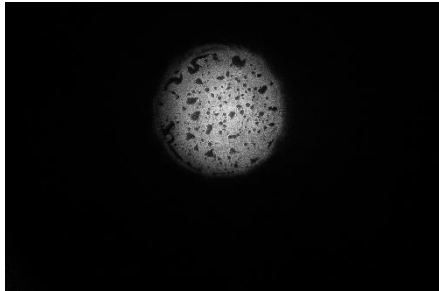
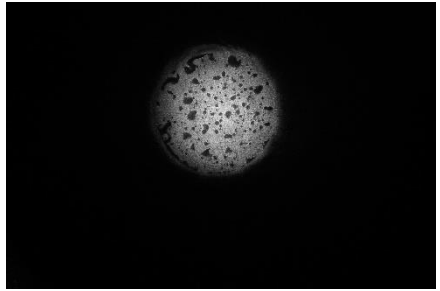
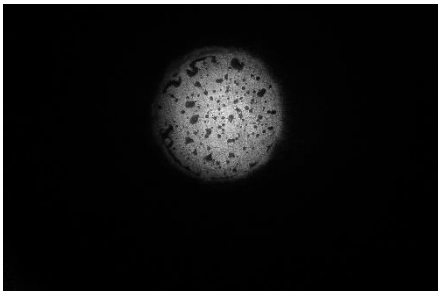
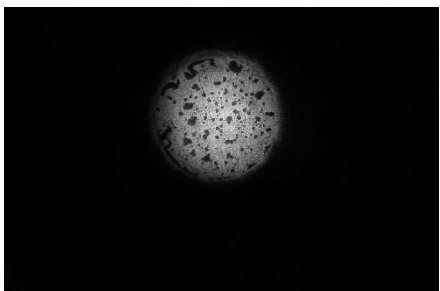
รูปที่ 4.5 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก

โดยจากการทดลองนั้นได้เก็บผลการทดลองเป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 จะถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 10 20 30 40 50 100 200 300 400 500 600 700 800 900 และ 1000 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.1 พบว่าที่ตำแหน่ง 1000 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง focus ต่อมาจึงเริ่มทำการทดลองครั้งที่ 2 โดยถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 100 200 300 400 500 600 700 800 900 และ 1000 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.2 พบว่าที่ตำแหน่ง 1000 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง และครั้งที่ 3 ถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 800 850 900 950 และ 1000 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.3 พบว่าที่ตำแหน่ง 1000 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง focus จึงได้เลือกภาพจากการทดลองที่ 3 ที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 1000 ไมโครเมตร เพื่อนำไปคำนวณเฟสโดยใช้เทคนิค TIE ทำให้ได้ภาพพื้นผิวในลักษณะ 3 มิติ และสามารถประเมินความลึกของหลุมการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ และจากภาพที่ถ่ายได้ซึ่งมีเฉพาะความเข้ม(แอมพลิจูด)นั้น สามารถบอกลักษณะของหลุมและรูปแบบของการกัดกร่อนได้ โดยจากภาพนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) กระจายทั่วผิวหน้า ซึ่งขนาดของหลุมแต่ละหลุมไม่เท่ากัน

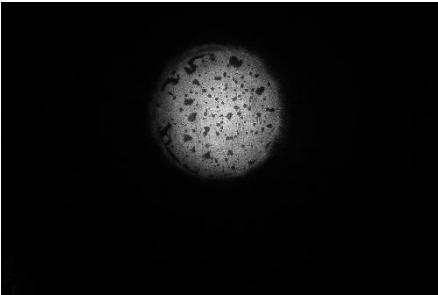
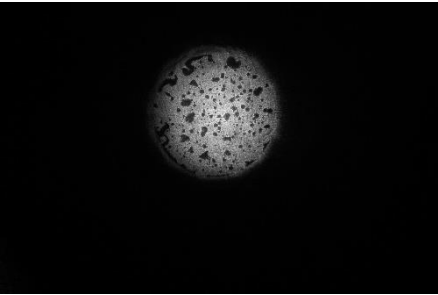
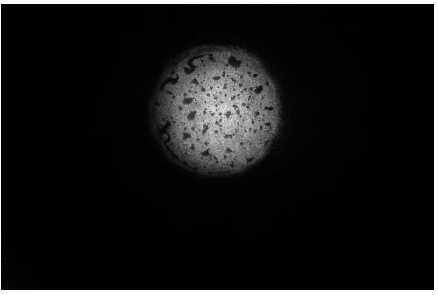
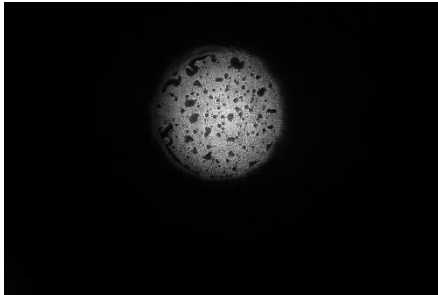
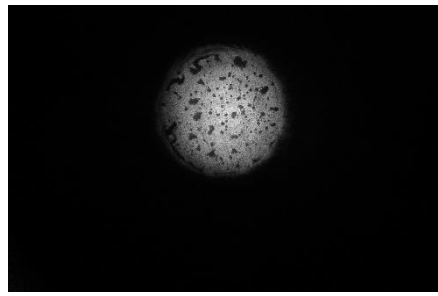
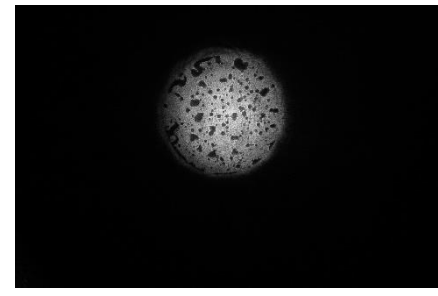
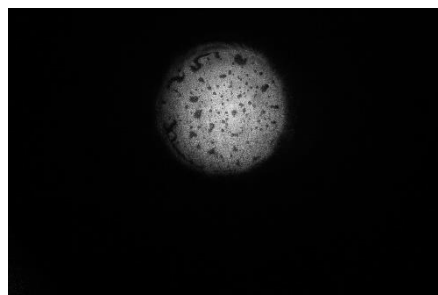
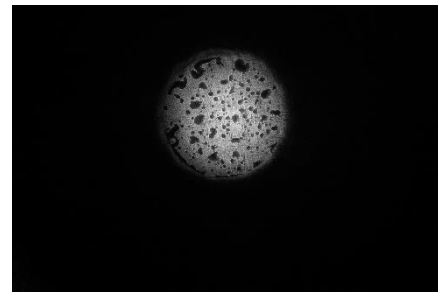
ตารางที่ 4.1 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1)

focus		
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
10		
20		
30		

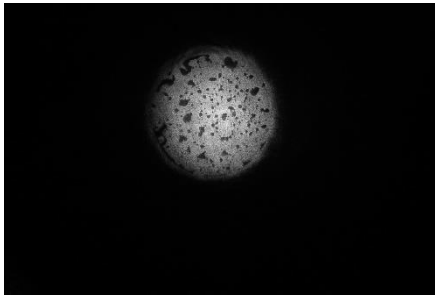
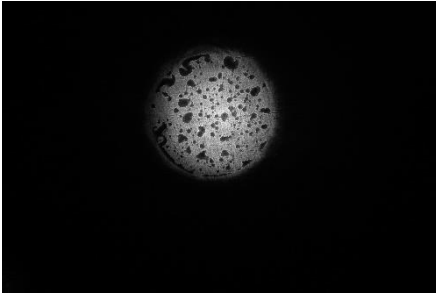
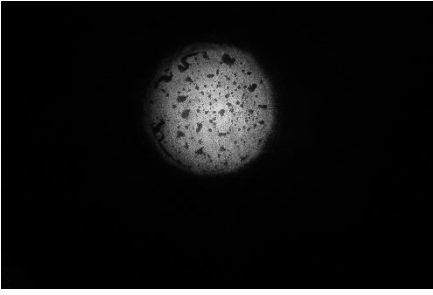
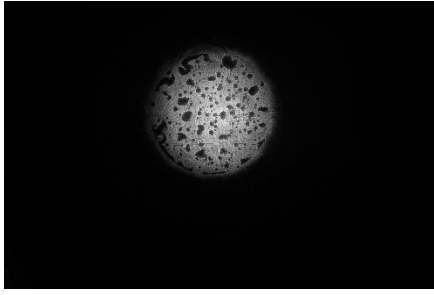
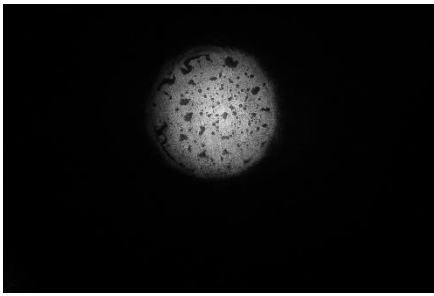
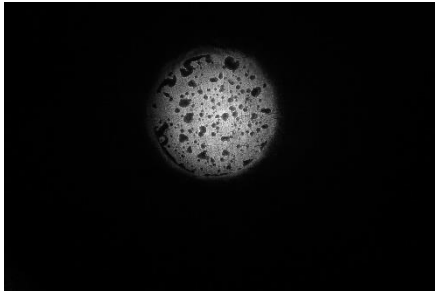
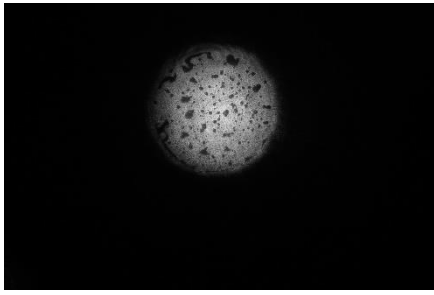
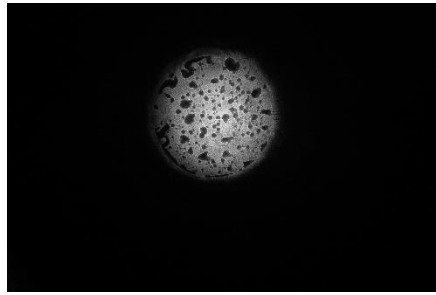
ตารางที่ 4.1 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
40		
50		
100		
200		

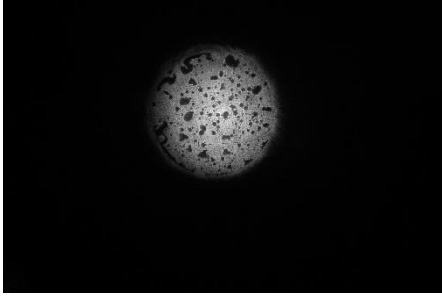

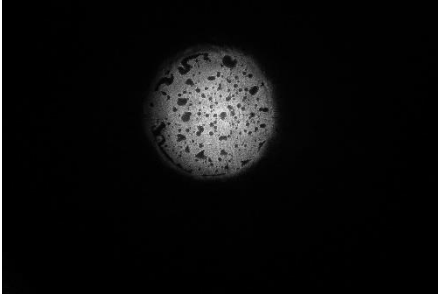
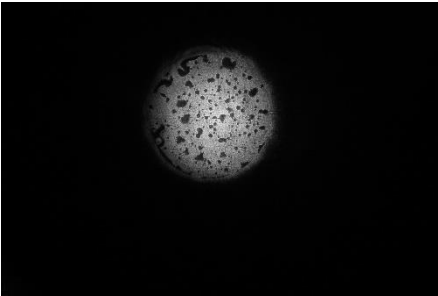

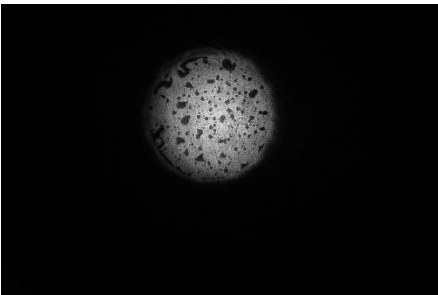

ตารางที่ 4.1 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
300		
400		
500		
600		

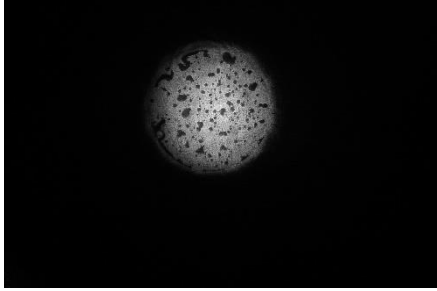
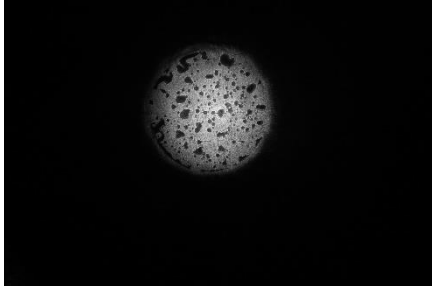
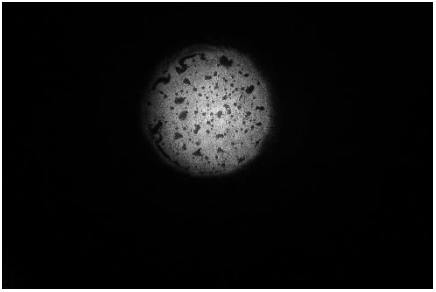
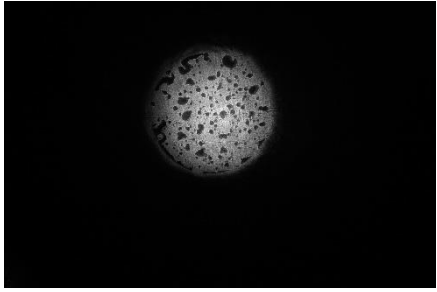
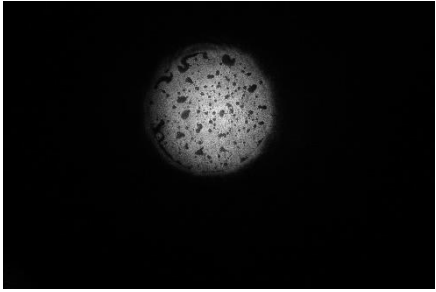
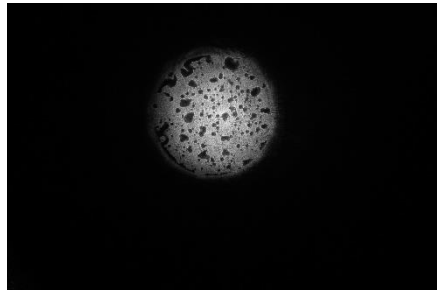
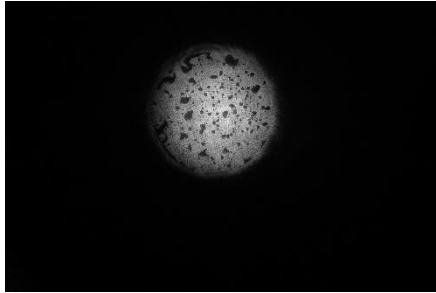
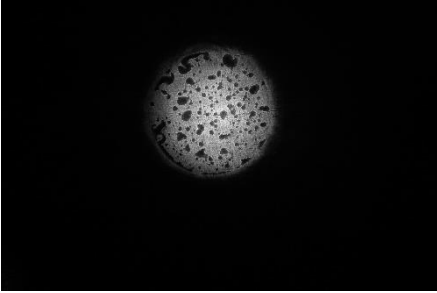
ตารางที่ 4.1 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
700		
800		
900		
1000		

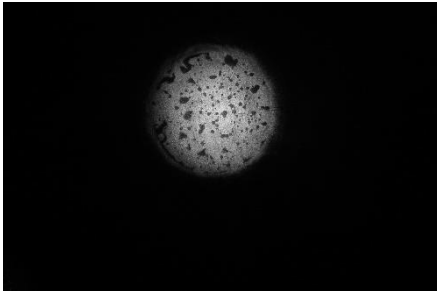
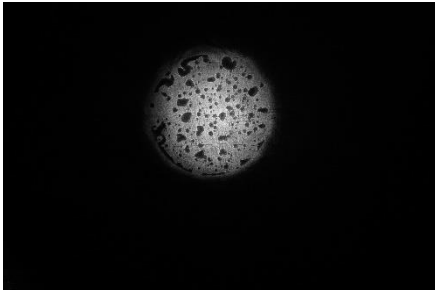
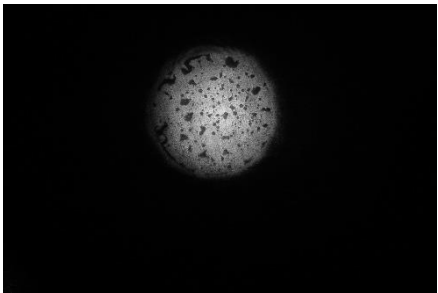

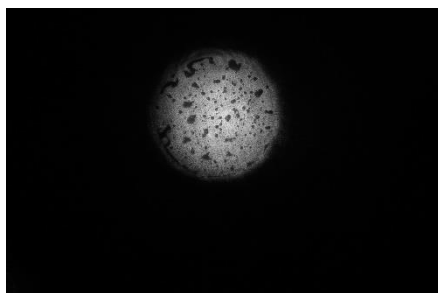
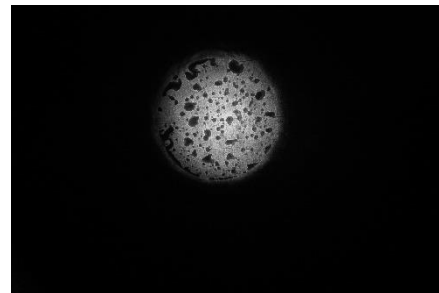
ตารางที่ 4.2 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองที่ 2)

focus		
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
100		
200		
300		

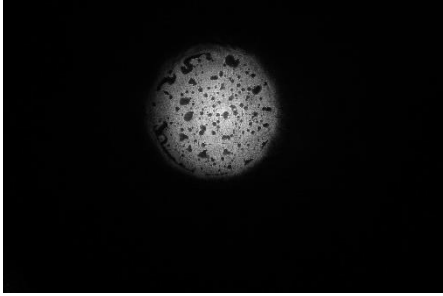
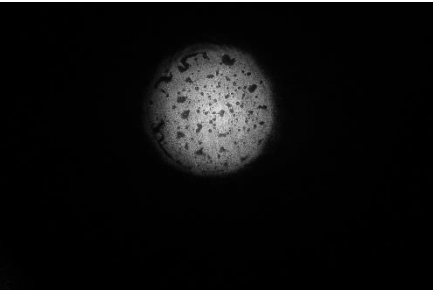
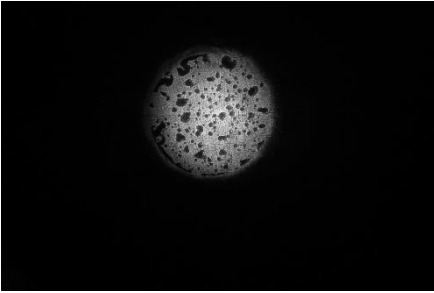
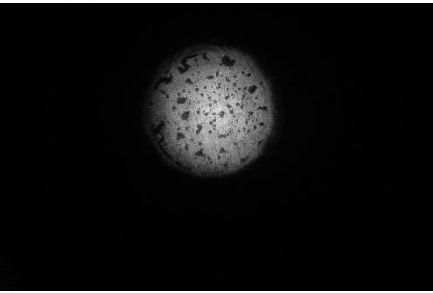
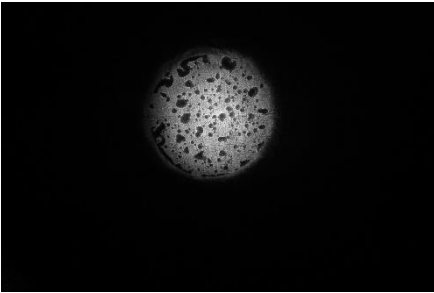
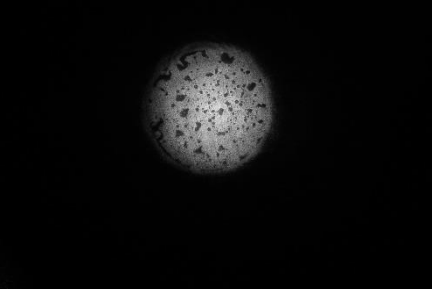
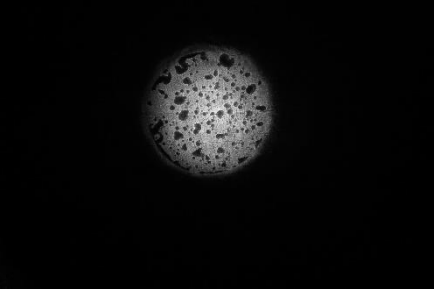
ตารางที่ 4.2 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองที่ 2) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
400		
500		
600		
700		

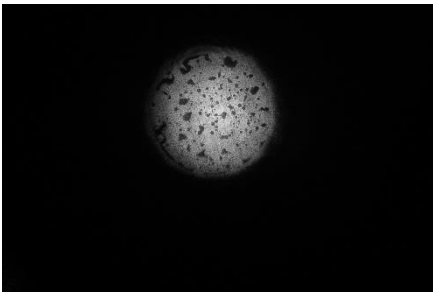
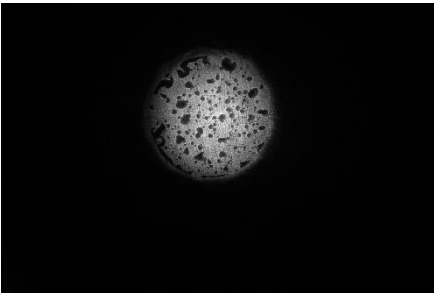
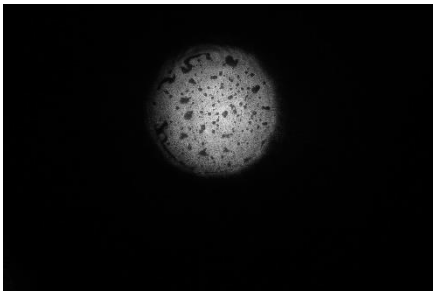
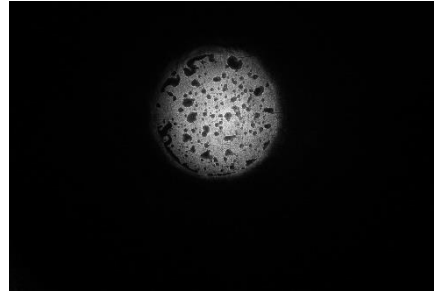
ตารางที่ 4.2 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองที่ 2) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
800		
900		
1000		

ตารางที่ 4.3 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองที่ 3)

focus		
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
800		
850		
900		

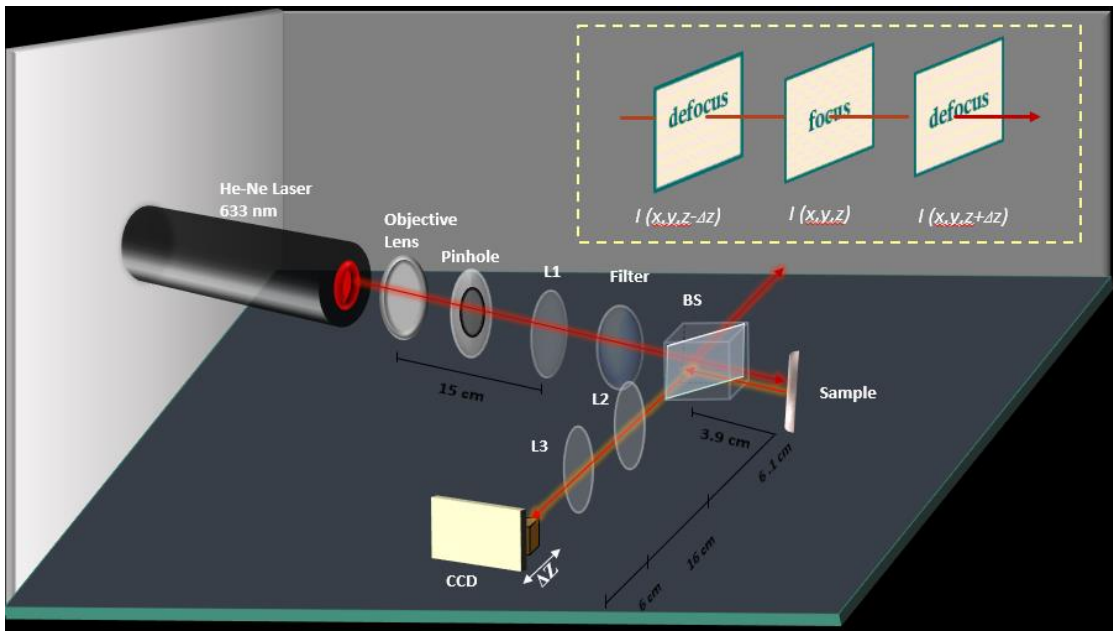
ตารางที่ 4.3 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองที่ 3) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
950		
1000		

4.1.3 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก

จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้จากเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันมาศึกษาลักษณะการกัดกร่อน โดยสำหรับการทดลองนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ขนาดลำแสง 0.88 มิลลิเมตร เนื่องจากแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดนั้นมีขนาดเล็กมากจึงวาง objective lens ไว้หน้าแหล่งกำเนิดแสง เมื่อแสงเลเซอร์ผ่าน objective lens ทำให้ขนาดของลำแสงใหญ่ขึ้น จากนั้นวาง pinhole ซึ่งทำหน้าที่บีบลำแสงเพื่อจะใช้ลำแสงเฉพาะส่วนที่มีความเข้มและกำหนดขนาดลำแสงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่นำมาศึกษา จากนั้นทำให้ลำแสงขนานโดยใช้เลนส์นูน L1 ที่มีความยาวโฟกัสเท่ากับ 150 มิลลิเมตร โดยวางห่างจาก objective lens เป็นระยะเท่ากับ 15 เซนติเมตร เมื่อลำแสงขนานตลอดระนาบแล้วจึงวาง filter เพื่อลดความเข้มของแสงลงเนื่องจากถ้าใช้แสงที่มีความจํามากเกินไปนั้นจะทำให้ถ่ายภาพไม่ชัดเจนเมื่อได้ขนาดและความเข้มของลำแสงตามที่ต้องการแล้วจึงวาง beam splitter เมื่อแสงขนานผ่าน beam splitter จะถูกแยกเป็นสองทางที่ beam splitter คือ 50% สะท้อนขึ้นไปด้านบน และอีก 50% ทะลุผ่านไปทางด้านขวาไปยังชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 โดยการทดลองนี้จะใช้เฉพาะลำแสงขนานที่สะท้อนไปทางด้านขวาเท่านั้น จากนั้นชิ้นงานตัวอย่างจะสะท้อนลำแสงกลับไปในแนวเดิมไปยัง beam splitter อีกครั้ง แล้วใช้เลนส์นูน L2 ที่มีความยาวโฟกัส 100

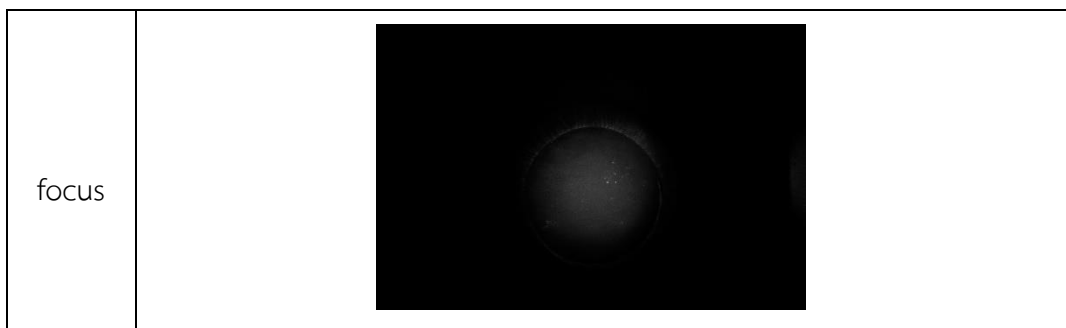
มิลลิเมตร รวมแสงที่ด้านล่าง โดยระยะจากชิ้นงานตัวอย่างถึงเลนส์นูน L2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร จากนั้นวางเลนส์นูน L3 ที่มีความยาวโฟกัส 60 มิลลิเมตร โดยวางเลนส์นูน L3 ไว้ที่ระยะห่างจากเลนส์นูน L2 เป็นระยะเท่ากับ 16 เซนติเมตร เพื่อให้ลำแสงขนานและมีขนาดเท่าเดิมมาตกที่กล้อง CCD โดยวาง CCD ไว้ห่างจากเลนส์นูน L2 เป็นระยะ 6 เซนติเมตร จากนั้นบันทึกภาพที่ความเข้มแสงเท่ากับ $I(x,y,z)$ และเลื่อนกล้อง CCD ที่ตำแหน่ง defocus ในแกน z ก่อนและหลังระนาบ แล้วบันทึกภาพ ทำให้ได้ภาพที่มีความเข้มเท่ากับ $I(x,y,z-\Delta z)$ และ $I(x,y,z+\Delta z)$ ที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งระยะ defocus จะอยู่ในช่วง Rayleigh range (Z_R) คือ 0.31 เมตร โดยการออกแบบการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก

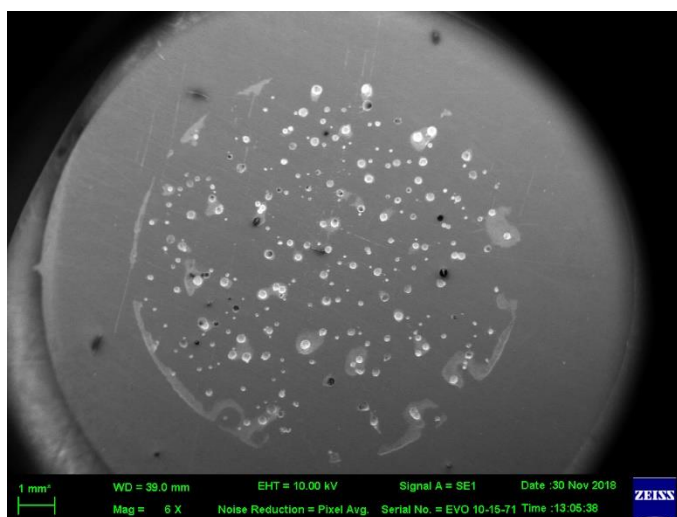
โดยจากการทดลองนั้นพบว่าการศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมได้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม โดยพื้นผิวเกิดการกัดกร่อนอย่างหนักทำให้เนื้อเหล็กสูญหายและเป็นพื้นผิวขรุขระ ดังนั้นเมื่อแสงไปตกกระทบพื้นผิวทำให้แสงกระเจิงไปทุกทิศทาง ทำให้แสงที่สะท้อนกลับมายังกล้อง CCD นั้นมีความเข้มไม่เท่าเดิม ภาพที่ถ่ายได้จึงมืด ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งบันทึกภาพเฉพาะที่ระยะ focus เท่านั้น

ตารางที่ 4.4 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก

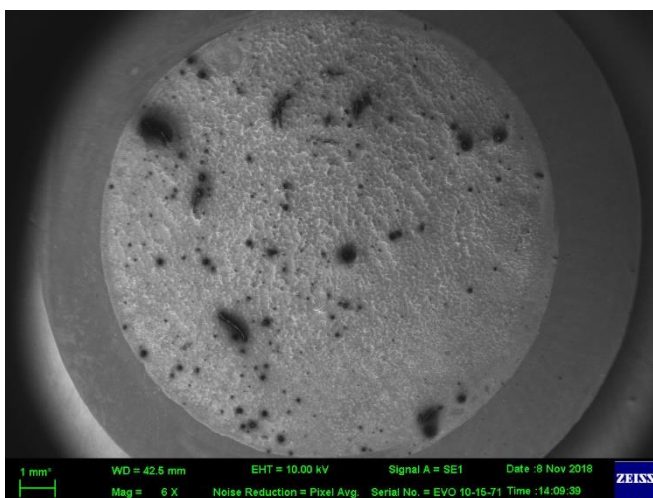


4.1.4 การวิเคราะห์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มทั่วผิวน้ำ ดังรูปที่ 4.7 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก เกิดการกัดกร่อนแบบรุนแรงทั่วผิวน้ำจนทำให้พื้นผิวของเหล็กกล้านั้นหายไปดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 0.095% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.8 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่เตรียมจาก produced water จำลองที่มีความเข้มข้นของ NaCl เป็น 3.5% โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.2 ผลจากการศึกษาการกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304

4.2.1 การเตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาไรเซชัน

จากการทดสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลป์วาโนสแตท จะได้ชิ้นงานตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.9

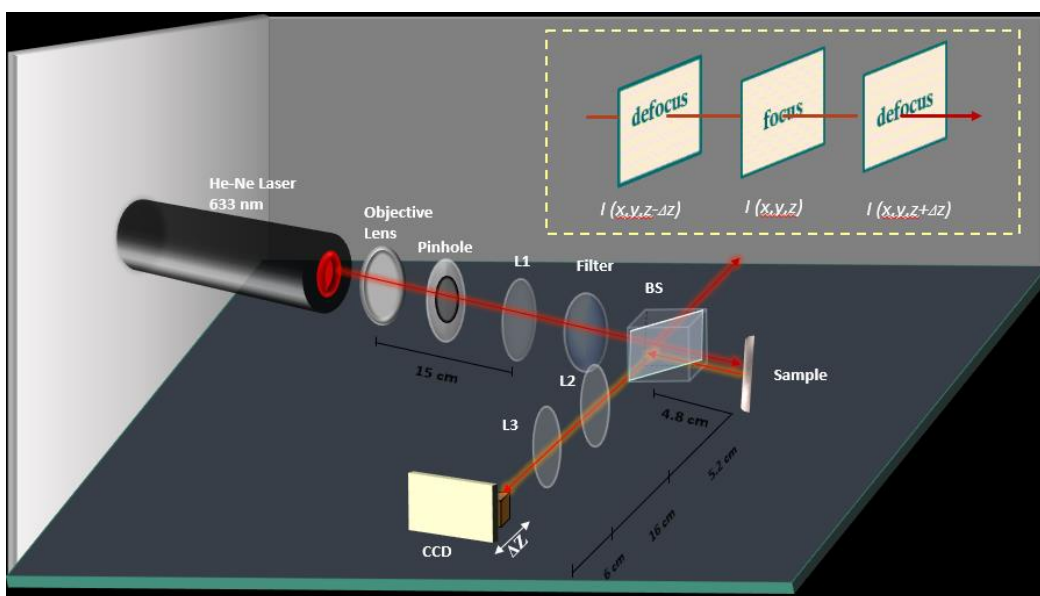


รูปที่ 4.9 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่เตรียมจากเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาไรเซชัน

4.2.2 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304

จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้จากเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาไรเซชันมาศึกษาลักษณะการกัดกร่อน โดยสำหรับการทดลองนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ขนาดลำแสง 0.88 มิลลิเมตร เนื่องจากแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดนั้นมีขนาดเล็กมากจึงวาง objective lens ไว้หน้าแหล่งกำเนิดแสง เมื่อแสงเลเซอร์ผ่าน objective lens ทำให้ขนาดของลำแสงใหญ่ขึ้น จากนั้นวาง pinhole ซึ่งทำหน้าที่บีบลำแสงเพื่อจะใช้ลำแสงเฉพาะส่วนที่มีความเข้มและกำหนดขนาดลำแสงให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่นำมาศึกษา จากนั้นทำให้ลำแสงขนานโดยใช้เลนส์นูน L1 ที่มีความยาวโฟกัสเท่ากับ 150 มิลลิเมตร โดยวางห่างจาก objective lens เป็นระยะเท่ากับ 15 เซนติเมตร เมื่อลำแสงขนานตลอดระยะนาบแล้วจึงวาง filter เพื่อลดความ

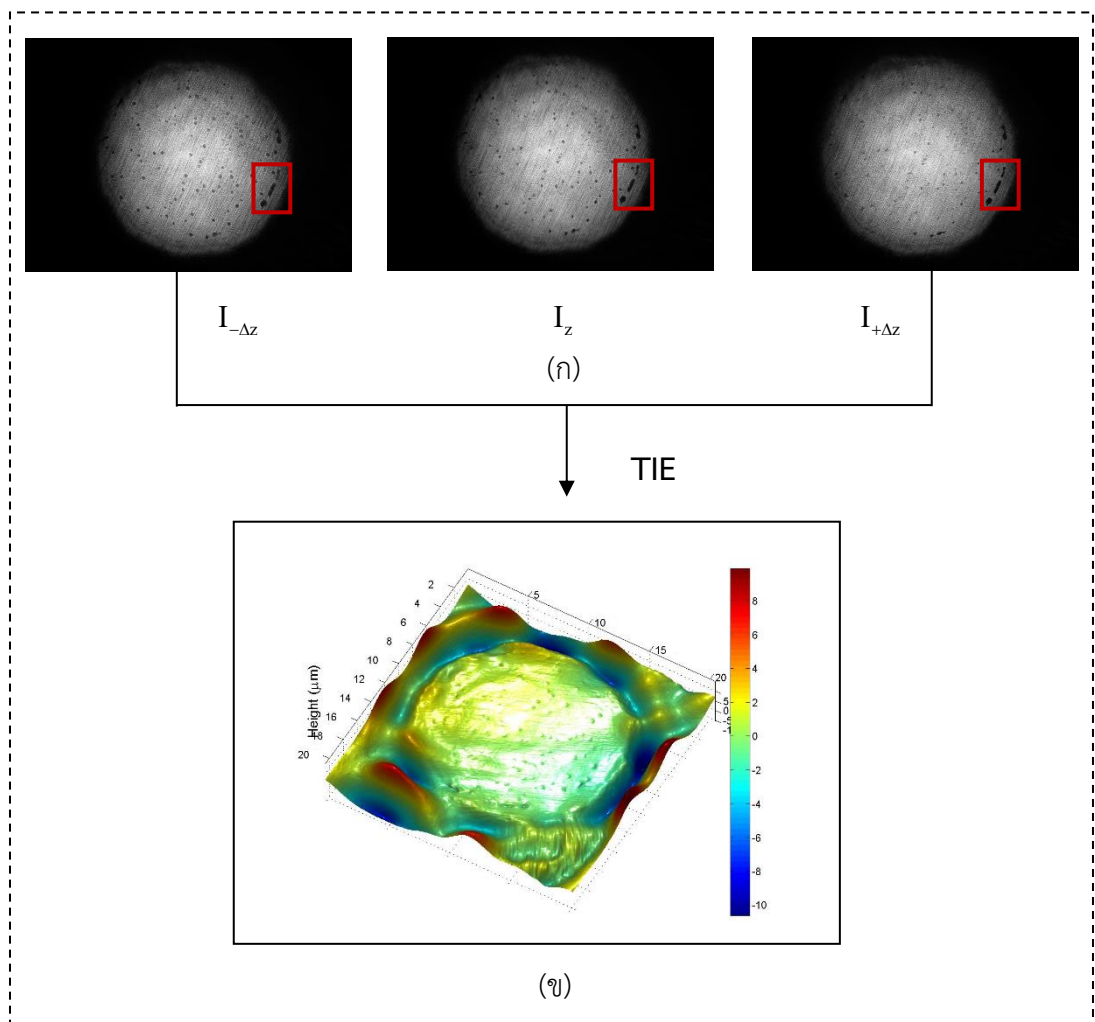
เข้มของแสงลงเนื่องจากถ้าใช้แสงที่มีความจ้ามากเกินไปนั้นจะทำให้ถ่ายภาพไม่ชัดเจน เมื่อได้ขนาดและความเข้มของลำแสงตามที่ต้องการแล้วจึงวาง beam splitter เมื่อแสงขนานผ่าน beam splitter จะถูกแยกเป็นสองทางที่ beam splitter คือ 50% สะท้อนขึ้นไปด้านบน และอีก 50% ทะลุผ่านไปทางด้านขวาไปยังชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 โดยการทดลองนี้จะใช้เฉพาะลำแสงขนานที่สะท้อนไปทางด้านขวาเท่านั้น จากนั้นชิ้นงานตัวอย่างจะสะท้อนลำแสงกลับไปแนวเดิมไปยัง beam splitter อีกครั้ง แล้วใช้เลนส์นูน L2 ที่มีความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร รวมแสงที่ด้านล่าง โดยระยะจากชิ้นงานตัวอย่างถึงเลนส์นูน L2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร จากนั้นวางเลนส์นูน L3 ที่มีความยาวโฟกัส 60 มิลลิเมตร โดยวางเลนส์นูน L3 ไว้ที่ระยะห่างจากเลนส์นูน L2 เป็นระยะเท่ากับ 16 เซนติเมตร เพื่อให้ลำแสงขนานและมีขนาดเท่าเดิมมาตกที่กล้อง CCD โดยวาง CCD ไว้ห่างจากเลนส์นูน L2 เป็นระยะ 6 เซนติเมตร จากนั้นบันทึกภาพที่ความเข้มแสงเท่ากับ $I(x,y,z)$ และเลื่อนกล้อง CCD ที่ตำแหน่ง defocus ในแกน z ก่อนและหลังระนาบ แล้วบันทึกภาพ ทำให้ได้ภาพที่มีความเข้มเท่ากับ $I(x,y,z-\Delta z)$ และ $I(x,y,z+\Delta z)$ ที่ระยะต่างๆดังตารางที่ 4.1 ซึ่งระยะ defocus จะอยู่ในช่วง Rayleigh range (Z_R) คือ 0.31 เมตร โดยการออกแบบการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304

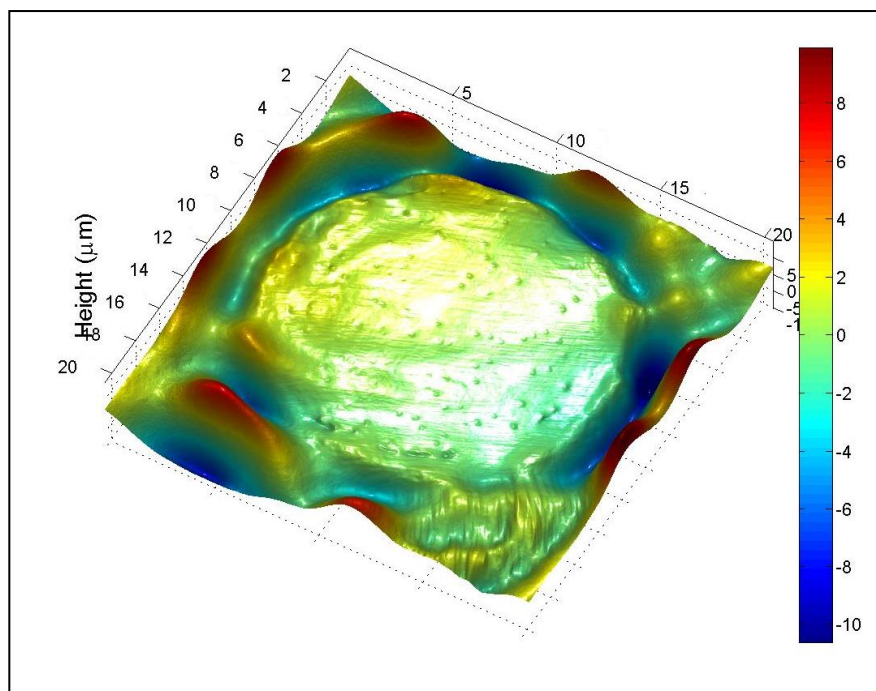
โดยจากการทดลองนั้นได้เก็บผลการทดลองเป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 จะถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 50 60 70 100 150 180 190 200 300 400 500 1000 1500 2000 และ 2500 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.5 พบว่าที่ตำแหน่ง 2500 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง focus ต่อมาจึงเริ่มทำการทดลองครั้งที่ 2 โดยถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 100 500 1000 1500 2000 2100 2200 2300 2400 และ 2500 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.6 พบว่าที่ตำแหน่ง 2500 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง และครั้งที่ 3 ถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ

defocus ที่ระยะ 2300 2350 2400 2450 และ 2500 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.7 พบว่าที่ตำแหน่ง 2500 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง focus จึงได้เลือกภาพจากการทดลองที่ 3 ที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 2500 ไมโครเมตร จากภาพที่ถ่ายได้มีเฉพาะความเข้ม(แอมพลิจูด) นั้นสามารถบอกลักษณะและรูปแบบของการกัดกร่อนได้โดยจากภาพนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) ตลอดพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งขนาดและลักษณะของหลุมการกัดกร่อนนั้นมีขนาดใกล้เคียงกัน และบริเวณขอบจะเกิดการกัดกร่อนแบบการกัดกร่อนในที่อับ (บริเวณกรอบสีแดง) จากนั้นศึกษาความลึกของหลุมการกัดกร่อนและลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นโดยเปลี่ยนความเข้มของภาพที่ระยะ focus และ defocus ที่ระยะ 2500 ไมโครเมตร ที่มีเฉพาะแอมพลิจูดดังรูปที่ 4.11(ก) ให้เป็นเฟสโดยใช้โปรแกรมในการคำนวณทำให้ได้ภาพพื้นผิวในลักษณะ 3 มิติ ดังรูปที่ 4.11(ข) ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก Prof. Anand Krishna Asundi มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ประเทศสิงคโปร์

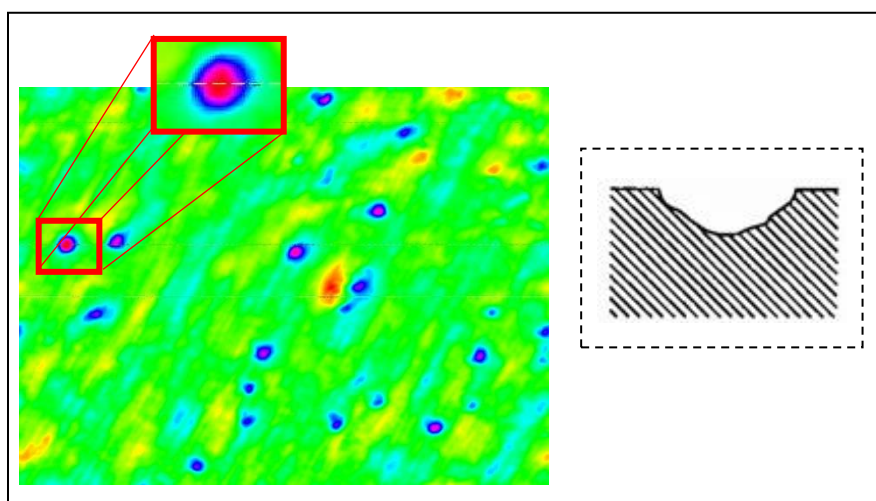


รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนความเข้มของภาพที่ระยะต่างๆเป็นเฟสโดยที่ (ก) แสดงภาพที่ความเข้มที่ระยะ focus และ defocus ที่ระยะ 2500 ไมโครเมตร (ข) แสดงภาพเฟสที่คำนวณได้จากความเข้มด้วยเทคนิค TIE

จากรูปที่ 4.12 พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 นั้นอ่านค่าได้ประมาณ 11.5 มิลลิเมตร โดยความลึกของหลุมการกัดกร่อนแบบ pitting corrosion นั้นหลุมมีความลึกประมาณ 2 ไมโครเมตร และจากรูปพบว่าการกัดกร่อนแบบ crevice corrosion มีหลุมการกัดกร่อนที่ตื้นกว่า ซึ่งรูปที่ 4.13 เมื่อขยายภาพให้ใกล้ขึ้นจะให้ข้อมูลของลักษณะการเจริญเติบโตของหลุมการกัดกร่อนเมื่อขยายภาพจะพบว่าการกัดกร่อนแบบ pitting corrosion บริเวณพื้นผิวด้านบนจะมีขนาดหลุมกว้างและแคบลงเรื่อยๆเมื่อการกัดกร่อนลึกขึ้น

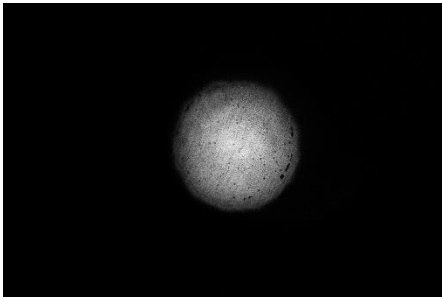
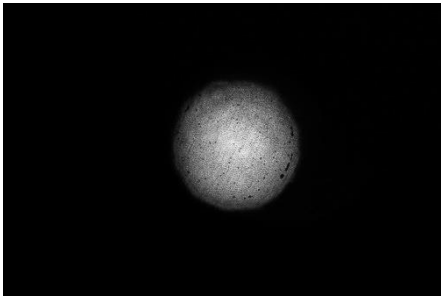
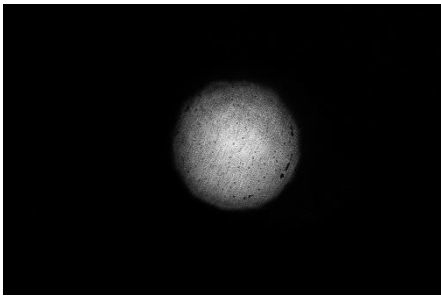

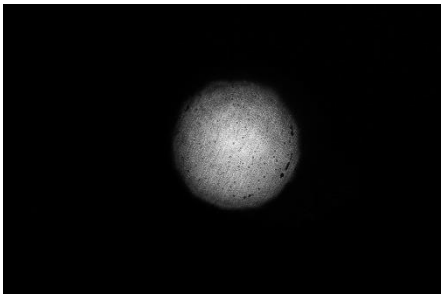
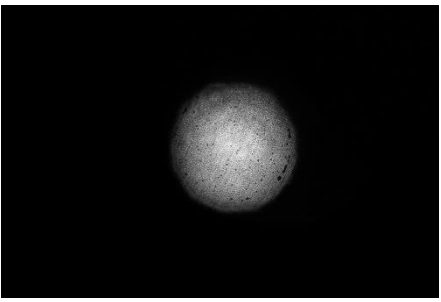
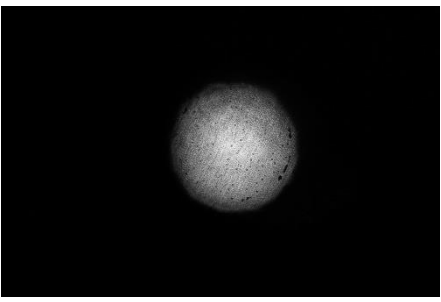


รูปที่ 4.12 แสดงภาพเฟสที่คำนวณได้จากสมการการส่งผ่านความเข้มแสง(TIE)



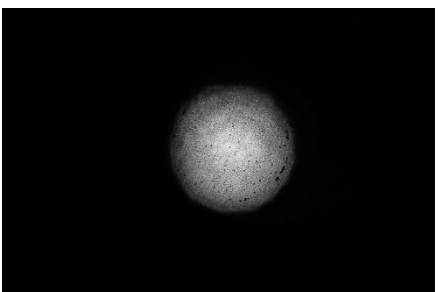
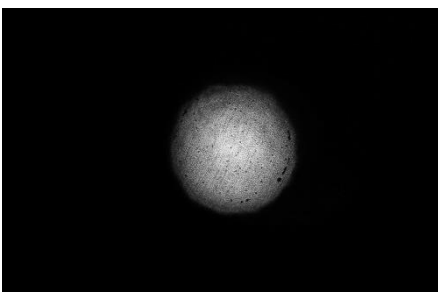


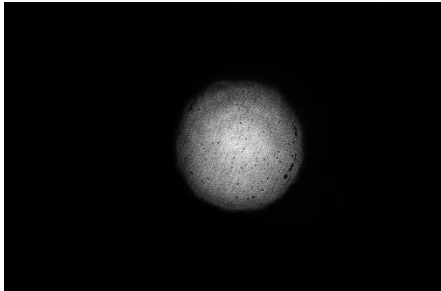
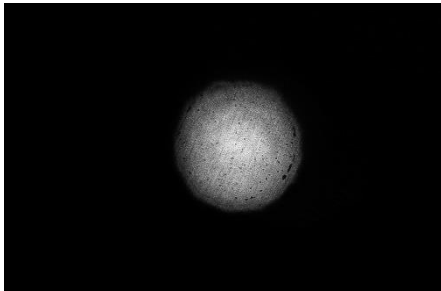


รูปที่ 4.13 แสดงภาพเฟสที่ถูกขยายที่คำนวณได้จากสมการการส่งผ่านความเข้มแสง(TIE) ใช้ในการศึกษาการเจริญเติบโตภายในหลุมการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น





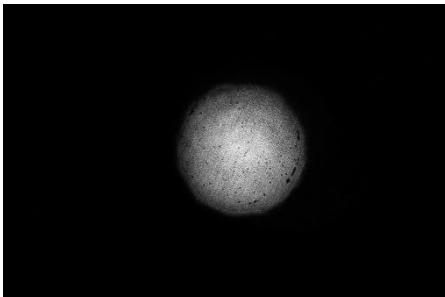

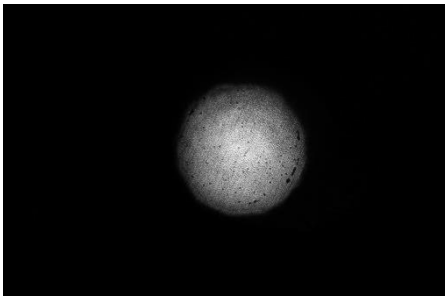
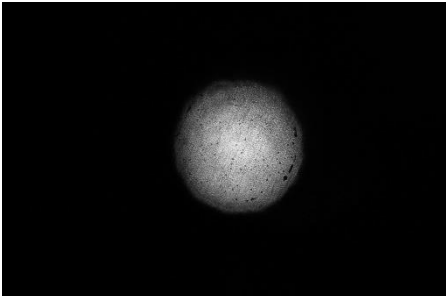
ตารางที่ 4.5 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1)

focus		
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
50		
60		
70		

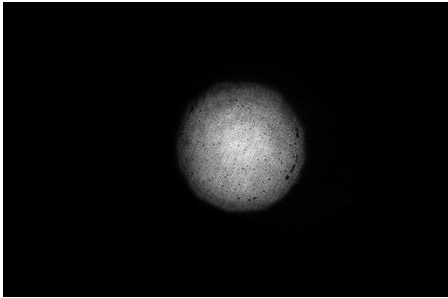
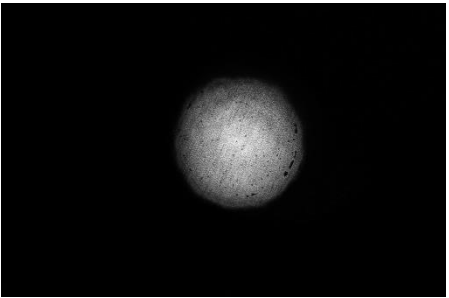




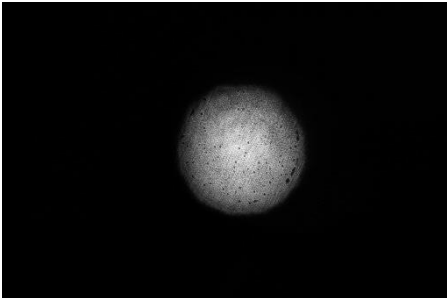
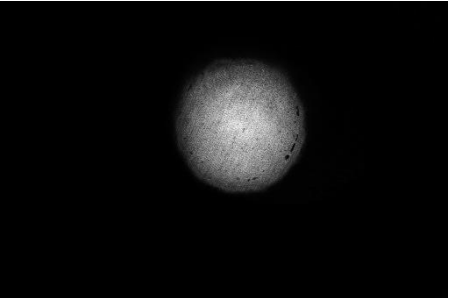
ตารางที่ 4.5 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
100		
150		
180		
190		

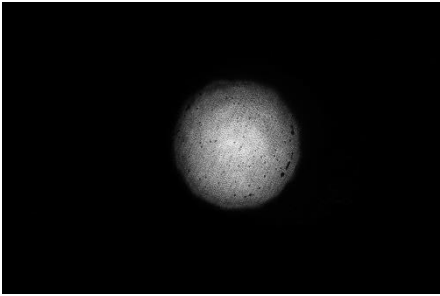

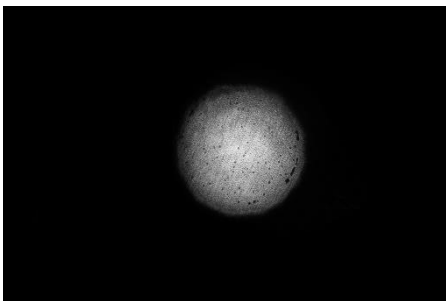
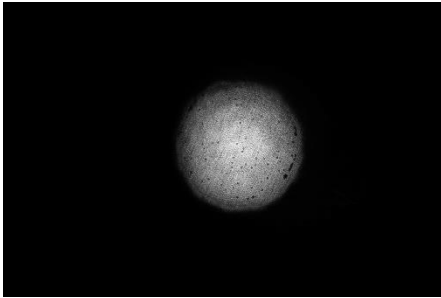


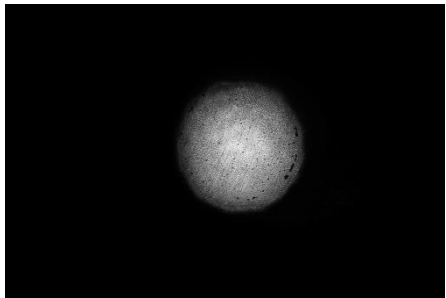
ตารางที่ 4.5 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
200		
300		
400		
500		


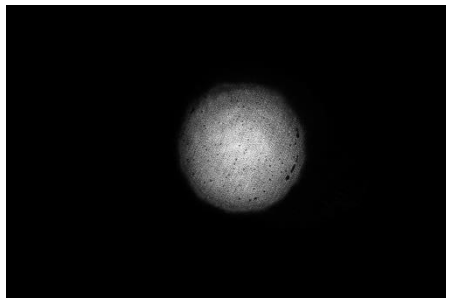




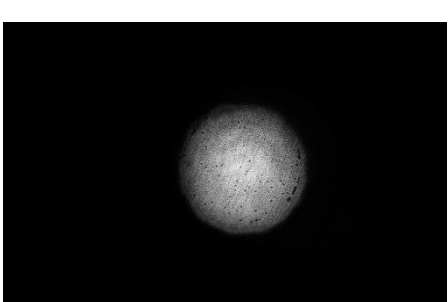
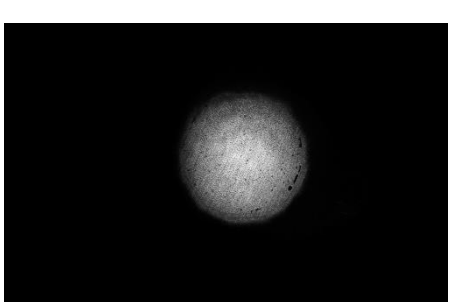
ตารางที่ 4.5 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
1000		
1500		
2000		
2500		

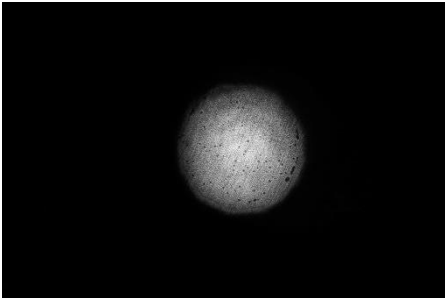
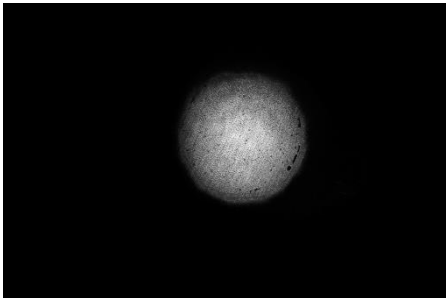
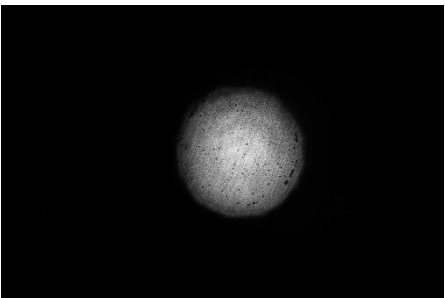
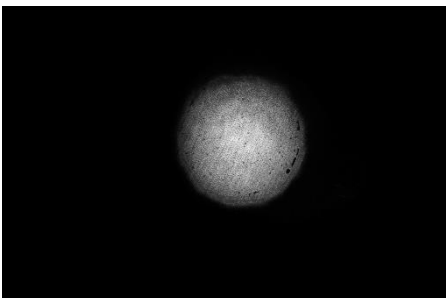
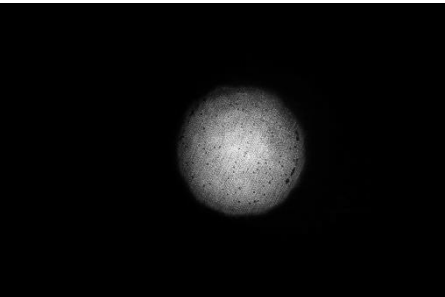
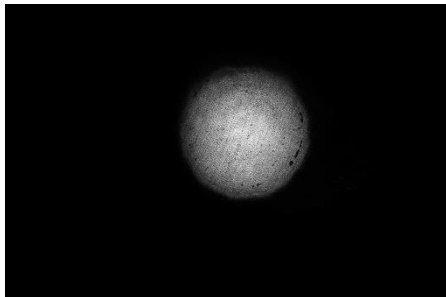
ตารางที่ 4.6 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2)

focus		
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
100		
500		
1000		

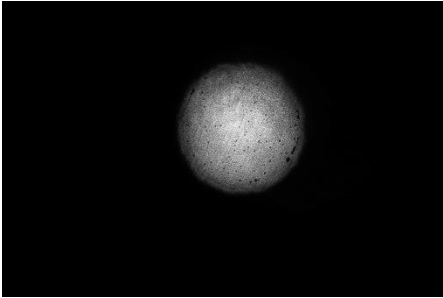
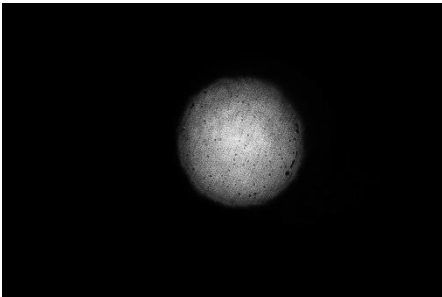





ตารางที่ 4.6 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
1500		
2000		
2100		
2200		

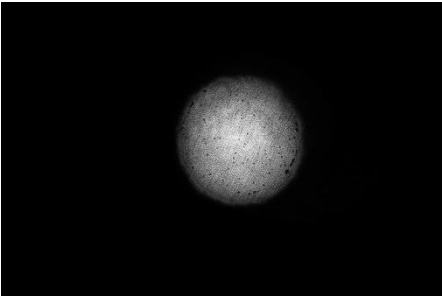
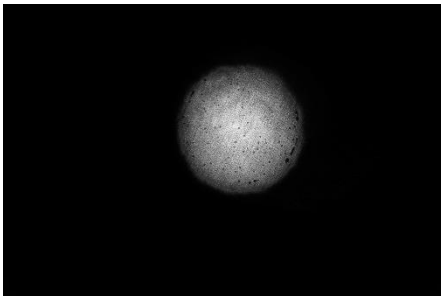


ตารางที่ 4.6 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
2300		
2400		
2500		

ตารางที่ 4.7 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 3)

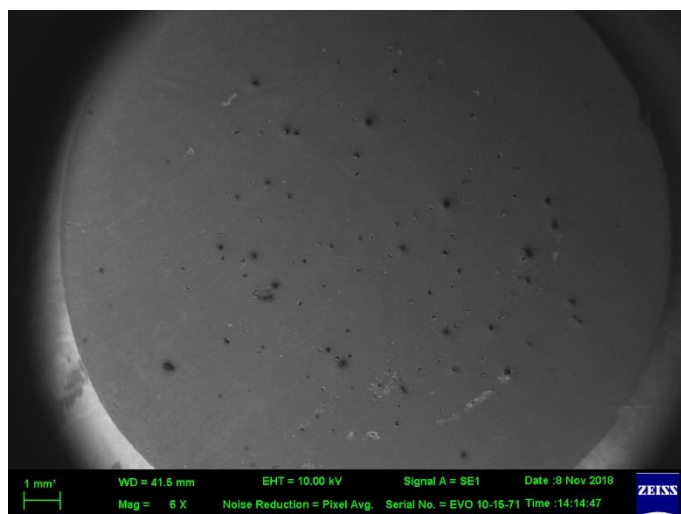
focus		
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
2300		
2350		
2400		

ตารางที่ 4.7 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 3) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
2450		
2500		

4.2.3 การวิเคราะห์ด้วยการกัดกร่อนบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มทั่วผิวหน้า ดังรูปที่ 4.14 แต่ไม่สามารถประเมินความเสียหายจากความลึกของหลุมการกัดกร่อนได้



รูปที่ 4.14 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.3 ผลจากการศึกษาการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe

4.3.1 การเตรียมโลหะผสม Co-Fe ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน

จากการทดสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสมโคบอลต์-เหล็ก ซึ่งเตรียมได้จากเทคนิคการเคลือบผิวด้วยสารละลาย $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 80:20 และ 40:60 แล้วนำไปทดสอบการกัดกร่อนทางเคมีด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท จะได้ชิ้นงานตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.15 โลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 80:20 ซึ่งเตรียมจากเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน

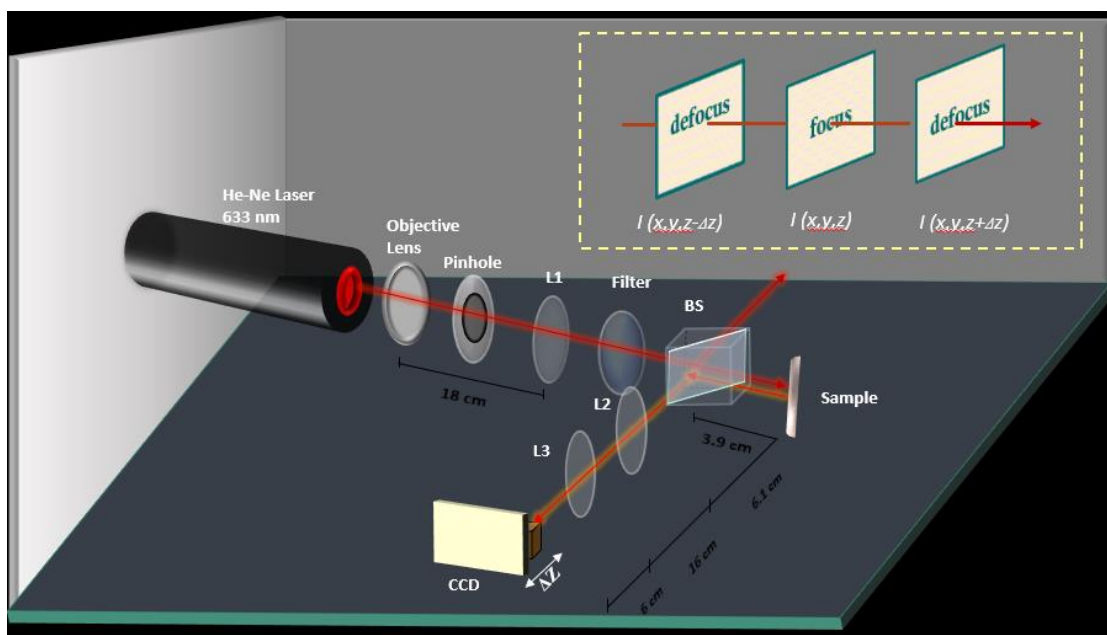


รูปที่ 4.16 โลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 40:60 ซึ่งเตรียมจากเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน

4.3.2 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20

จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้จากเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันมาศึกษาลักษณะการกัดกร่อน โดยสำหรับการทดลองนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ขนาดลำแสง 0.88 มิลลิเมตร เนื่องจากแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดนั้นมีขนาดเล็กมากจึงวาง objective lens ไว้หน้าแหล่งกำเนิดแสง เมื่อแสงเลเซอร์ผ่าน objective lens ทำให้ขนาดของลำแสงใหญ่ขึ้น จากนั้นวาง pinhole ซึ่งทำหน้าที่บีบลำแสงเพื่อจะใช้ลำแสงเฉพาะส่วนที่มีความเข้มและกำหนดขนาดลำแสงให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่นำมาศึกษา จากนั้นทำให้ลำแสงขนานโดยใช้เลนส์นูน L1 ที่มีความยาวโฟกัสเท่ากับ 180 มิลลิเมตร โดยวางห่างจาก objective lens เป็นระยะเท่ากับ 18 เซนติเมตร เมื่อลำแสงขนานตลอดระยะแล้วจึงวาง filter เพื่อลดความเข้มของแสงลงเนื่องจากถ้าใช้แสงที่มีความจ้ามากเกินไปนั้นจะทำให้ถ่ายภาพไม่ชัดเจน เมื่อได้ขนาด

และความเข้มของลำแสงตามที่ต้องการแล้วจึงวาง beam splitter เมื่อแสงขนานผ่าน beam splitter จะถูกแยกเป็นสองทางที่ beam splitter คือ 50% สะท้อนขึ้นไปด้านบน และอีก 50% ทะลุผ่านไปทางด้านขวาไปยังชิ้นงานตัวอย่างโลหะผสม Co-Fe โดยการทดลองนี้จะใช้เฉพาะลำแสงขนานที่สะท้อนไปทางด้านขวาเท่านั้น จากนั้นชิ้นงานตัวอย่างจะสะท้อนลำแสงกลับไปในแนวเดิมไปยัง beam splitter อีกครั้ง แล้วใช้เลนส์นูน L2 ที่มีความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร รวมแสงที่ด้านล่าง โดยระยะจากชิ้นงานตัวอย่างถึงเลนส์นูน L2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร จากนั้นวางเลนส์นูน L3 ที่มีความยาวโฟกัส 60 มิลลิเมตร โดยวางเลนส์นูน L3 ไว้ที่ระยะห่างจากเลนส์นูน L2 เป็นระยะเท่ากับ 16 เซนติเมตร เพื่อให้ลำแสงขนานและมีขนาดเท่าเดิมมาตกที่กล้อง CCD โดยวาง CCD ไว้ห่างจากเลนส์นูน L2 เป็นระยะ 6 เซนติเมตร จากนั้นบันทึกภาพที่ความเข้มแสงเท่ากับ $I(x,y,z)$ และเลื่อนกล้อง CCD ที่ตำแหน่ง defocus ในแกน z ก่อนและหลังระนาบ แล้วบันทึกภาพ ทำให้ได้ภาพที่มีความเข้มเท่ากับ $I(x,y,z-\Delta z)$ และ $I(x,y,z+\Delta z)$ ที่ระยะต่างๆดังตารางที่ 4.1 ซึ่งระยะ defocus จะอยู่ในช่วง Rayleigh range (Z_R) คือ 0.31 เมตร โดยการออกแบบการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.17




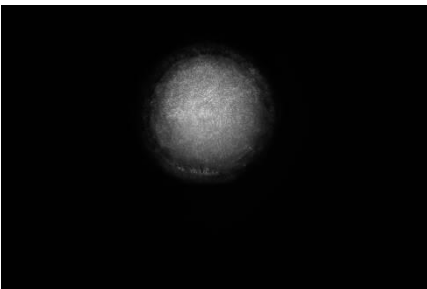
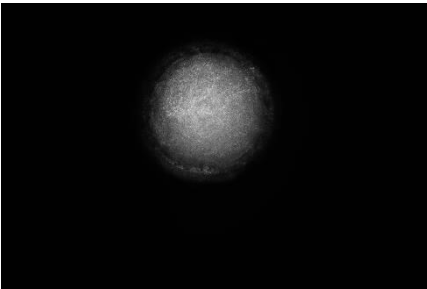
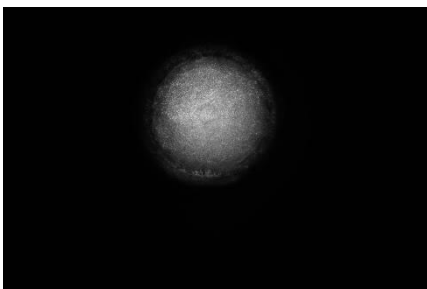
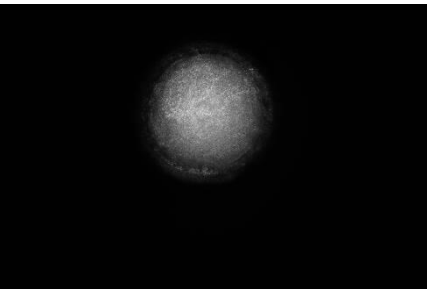
รูปที่ 4.17 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20

โดยจากการทดลองนั้นได้เก็บผลการทดลองเป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 จะถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 200 300 400 และ 500 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.7 พบว่าที่ตำแหน่ง 500 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง focus ต่อมาจึงเริ่มทำการทดลองครั้งที่ 2 โดยถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 50 60 70 80 90 100 200 300 400 และ 500 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.8 พบว่าที่ตำแหน่ง 500 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง และครั้งที่ 3 ถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 300 350 400 450 และ 500 ไมโครเมตร

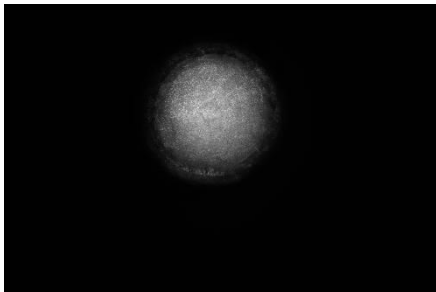
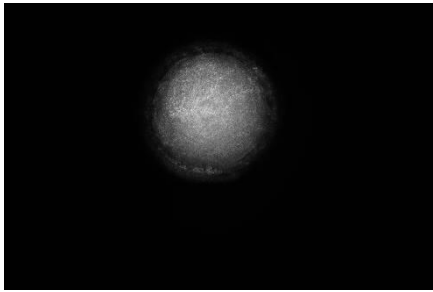
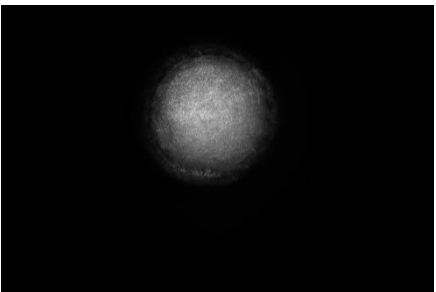
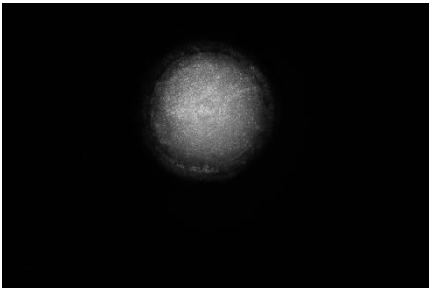
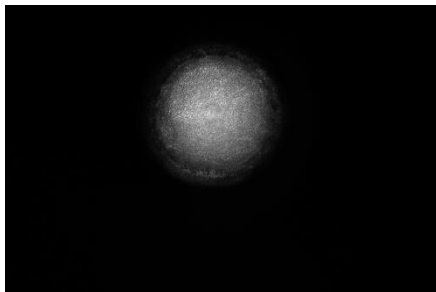
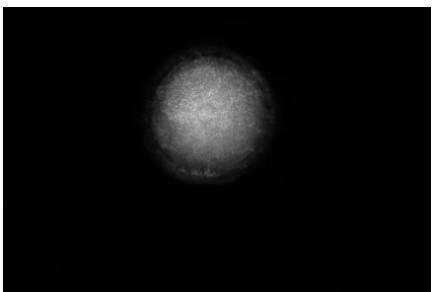
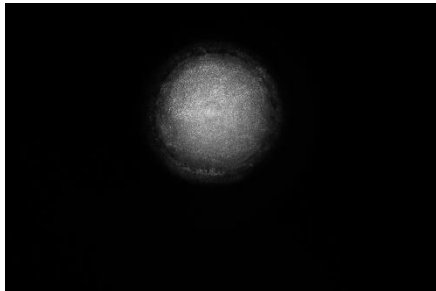
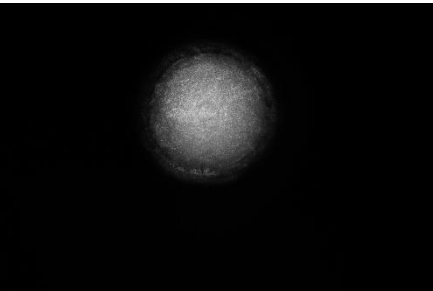
ดังตารางที่ 4.9 พบว่าที่ตำแหน่ง 500 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง focus จึงได้เลือกภาพจากการทดลองที่ 3 ที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 500 ไมโครเมตร จากภาพที่ถ่ายได้ซึ่งมีเฉพาะความเข้ม(แอมพลิจูด) พบว่าเกิดการกักกร่อนแบบเลือกธาตุ ซึ่งเป็นการกักกร่อนที่ธาตุโลหะหนึ่งเสถียรกว่าธาตุหนึ่งเมื่อสัมผัสสภาพแวดล้อม โดยการทดลองนี้ โลหะผสม Co-Fe จะสูญเสียเหล็ก(deironification) ในปริมาณที่น้อยมากๆ ทำให้ผิวหน้าโลหะผสม Co-Fe ไม่เปลี่ยนแปลง

โดยจากการทดลองนั้นพบว่าการศึกษาโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 พบว่าพื้นผิวของการกักกร่อนในลักษณะที่เกิดการกักกร่อนแบบเลือกธาตุที่มีเหล็กหลุดออกไปน้อยมากๆ เนื่องจากภาพที่ถ่ายได้(แอมพลิจูด)พื้นผิวมีลักษณะเหมือนเดิม ดังตารางที่ 4.7

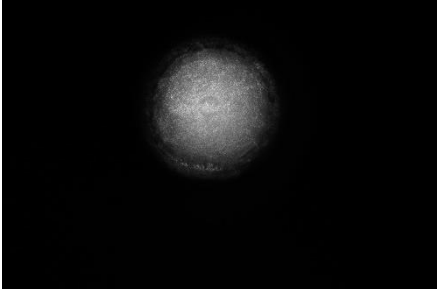
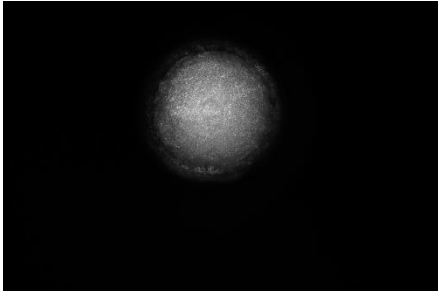
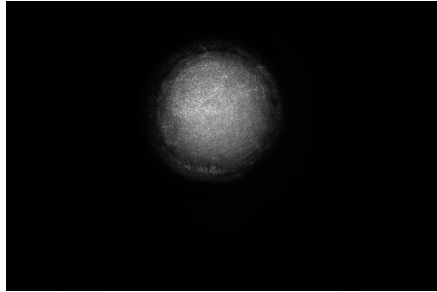
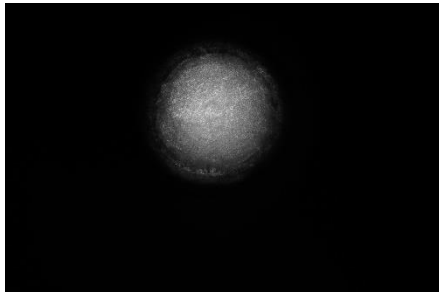
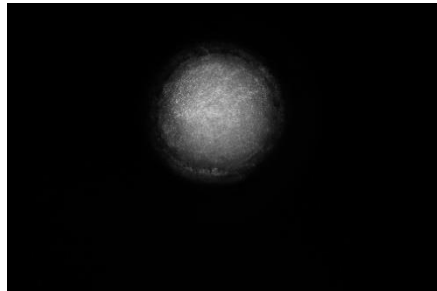
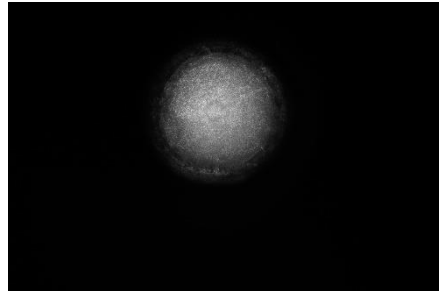
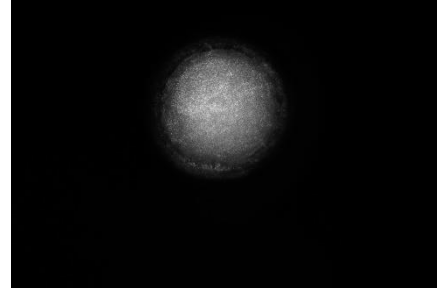
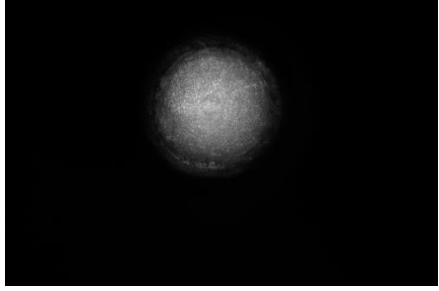
ตารางที่ 4.8 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1)

focus		
Δz	$-\Delta z$ (μm)	$+\Delta z$ (μm)
10		
20		

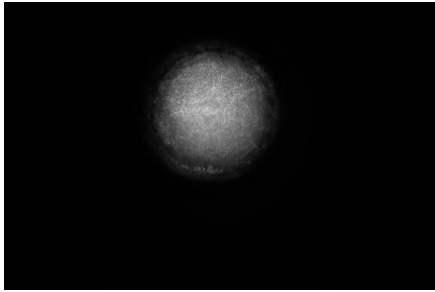
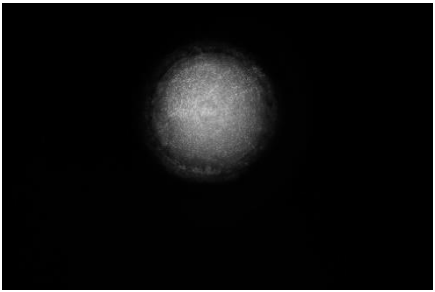
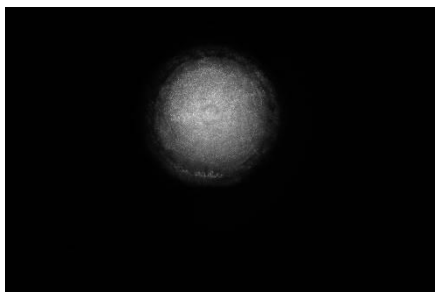
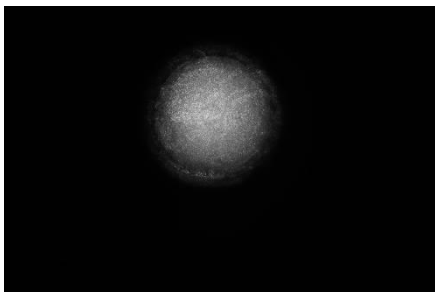
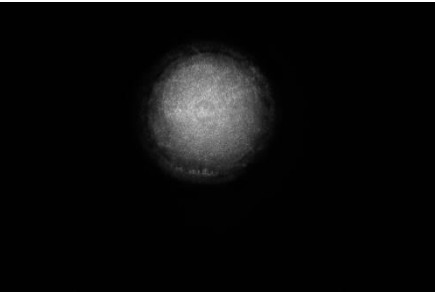
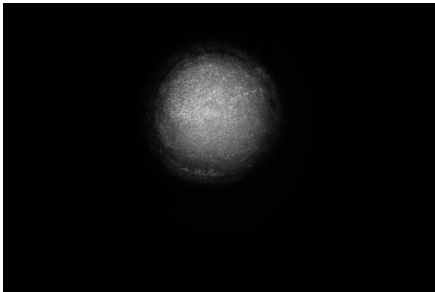
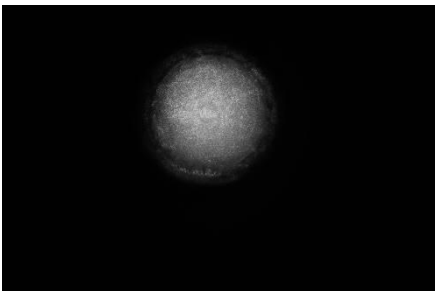
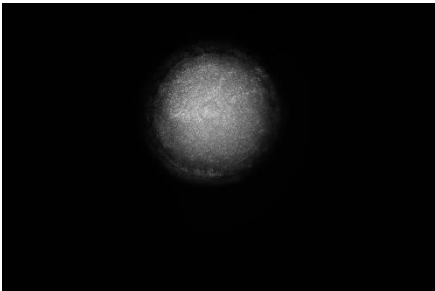
ตารางที่ 4.8 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
30		
40		
50		
60		


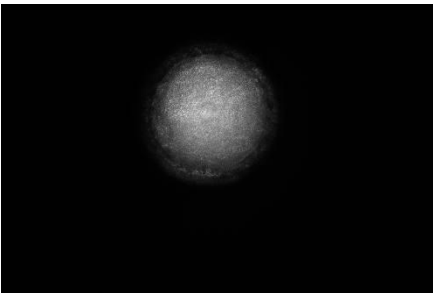
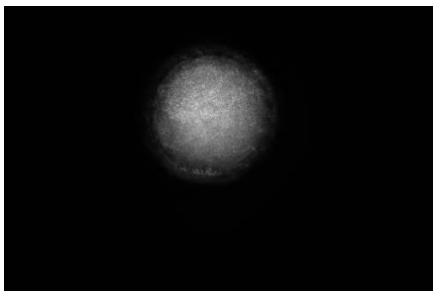
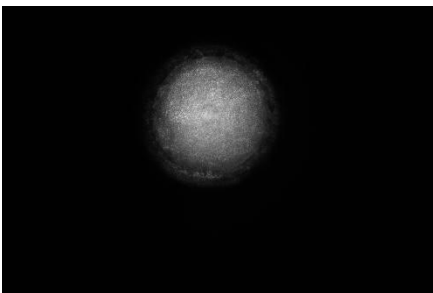
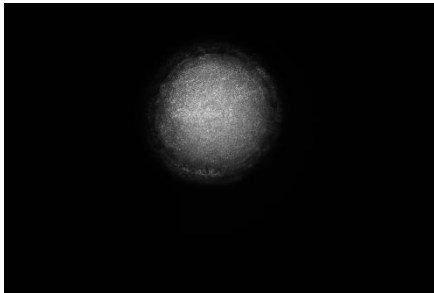
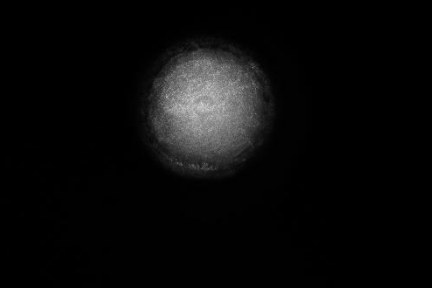
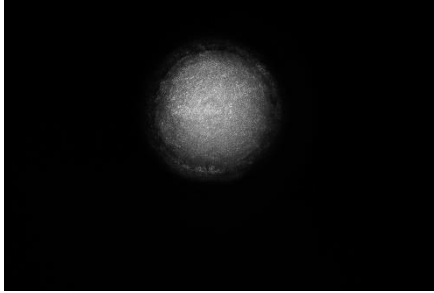
ตารางที่ 4.8 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
70		
80		
90		
100		

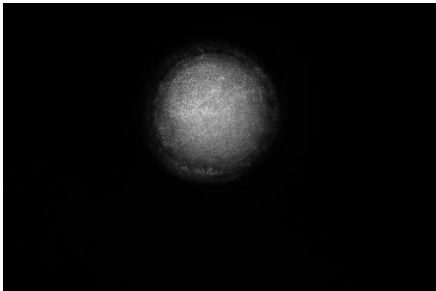
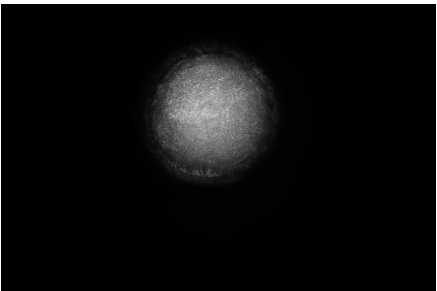

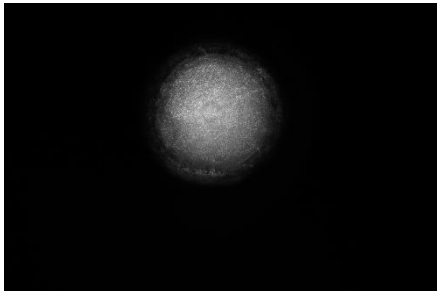
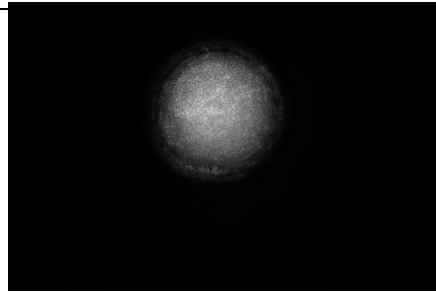
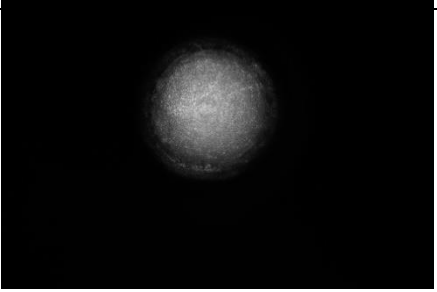
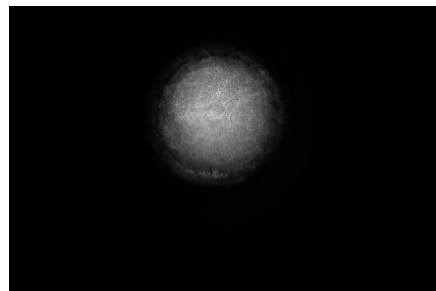
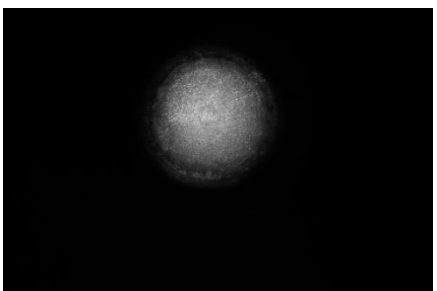
ตารางที่ 4.8 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
200		
300		
400		
500		

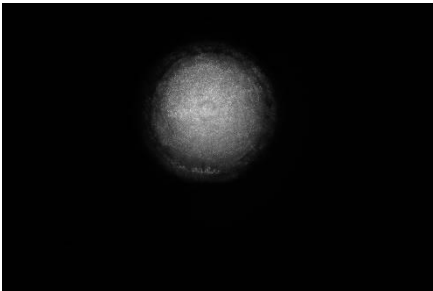
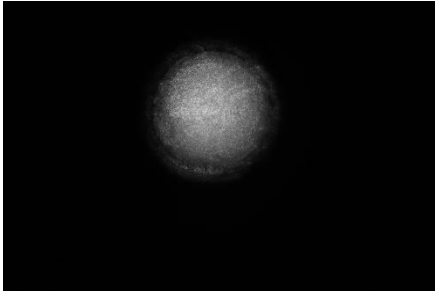
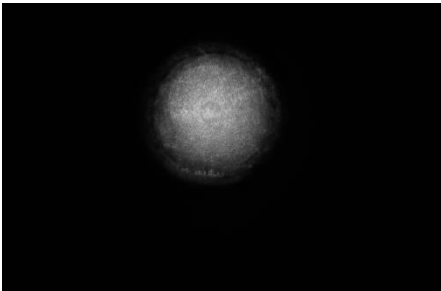
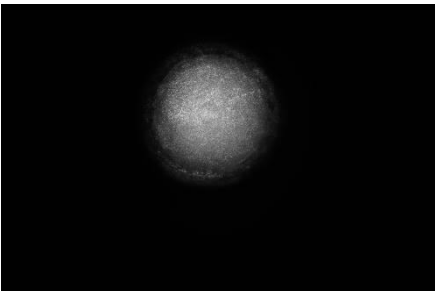
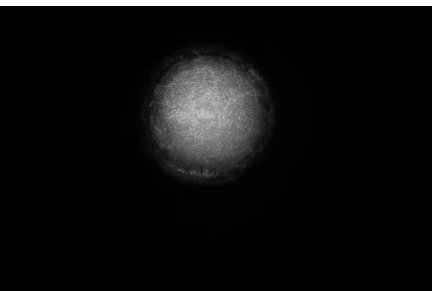
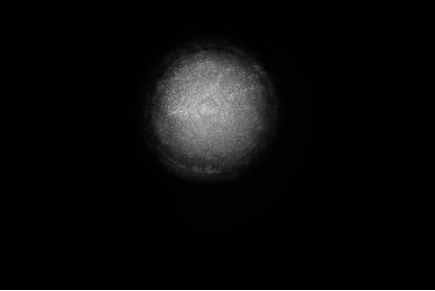
ตารางที่ 4.9 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2)

focus		
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
50		
60		
70		


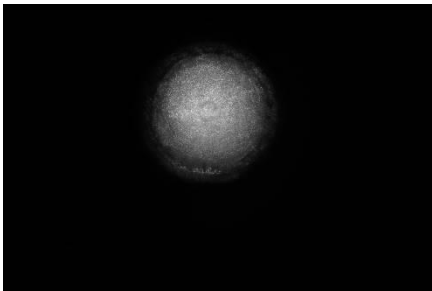
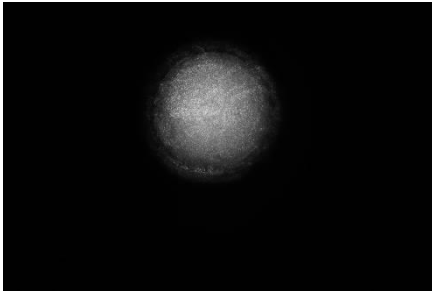
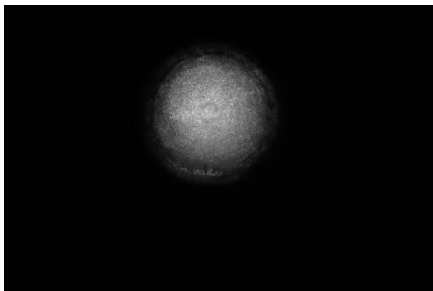
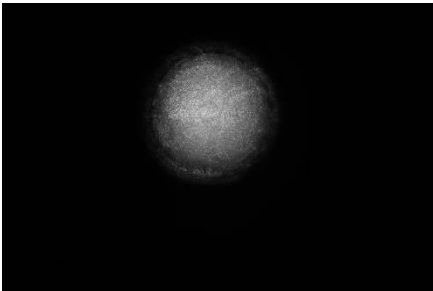
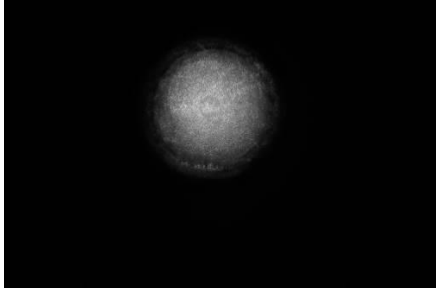
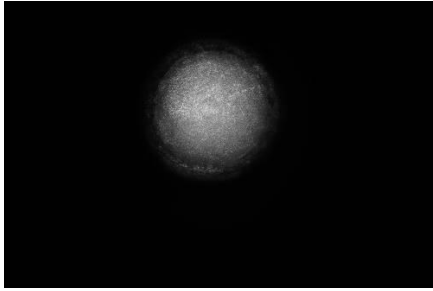
ตารางที่ 4.9 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
80		
90		
100		
200		

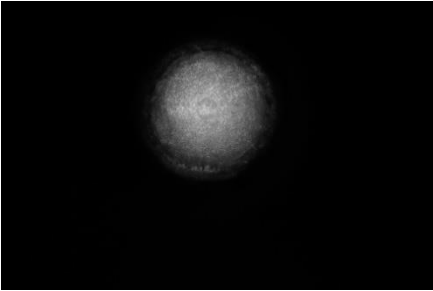
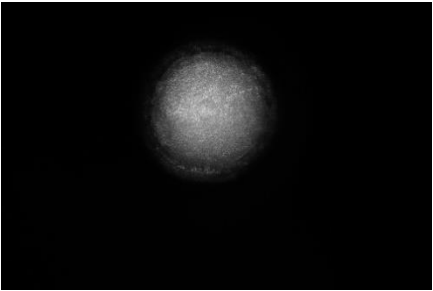
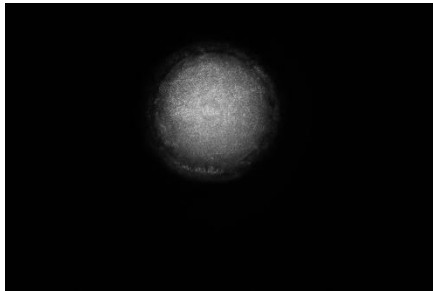
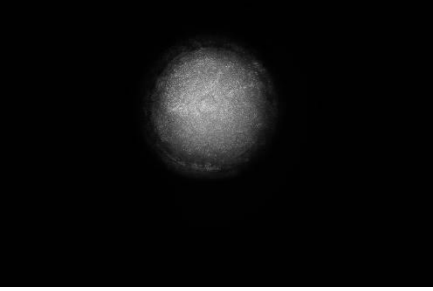
ตารางที่ 4.9 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
300		
400		
500		

ตารางที่ 4.10 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 3)

focus		
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
300		
350		
400		

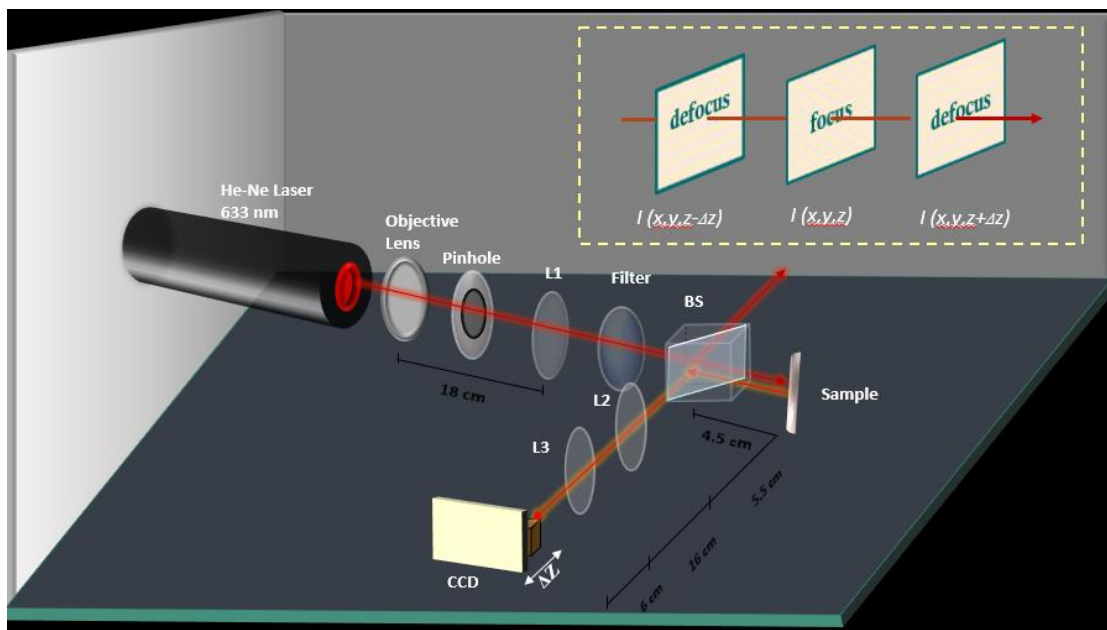
ตารางที่ 4.10 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 3) (ต่อ)

Δz	$- \Delta z$ (μm)	$+ \Delta z$ (μm)
450		
500		

4.3.3 ผลการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงของโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60

จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้จากเทคนิคโพเทนซิโอดอนามิกโพลาริเซชันมาศึกษาลักษณะการกัดกร่อน โดยสำหรับการทดลองนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ขนาดลำแสง 0.88 มิลลิเมตร เนื่องจากแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดนั้นมีขนาดเล็กมากจึงวาง objective lens ไว้หน้าแหล่งกำเนิดแสง เมื่อแสงเลเซอร์ผ่าน objective lens ทำให้ขนาดของลำแสงใหญ่ขึ้น จากนั้นวาง pinhole ซึ่งทำหน้าที่บีบลำแสงเพื่อจะใช้ลำแสงเฉพาะส่วนที่มีความเข้มและกำหนดขนาดลำแสงให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่นำมาศึกษา จากนั้นทำให้ลำแสงขนานโดยใช้เลนส์นูน L1 ที่มีความยาวโฟกัสเท่ากับ 180 มิลลิเมตร โดยวางห่างจาก objective lens เป็นระยะเท่ากับ 18 เซนติเมตร เมื่อลำแสงขนานตลอดระนาบแล้วจึงวาง filter เพื่อลดความเข้มของแสงลงเนื่องจากถ้าใช้แสงที่มีความจ้ามากเกินไปนั้นจะทำให้ถ่ายภาพไม่ชัดเจน เมื่อได้ขนาดและความเข้มของลำแสงตามที่ต้องการแล้วจึงวาง beam splitter เมื่อแสงขนานผ่าน beam splitter จะถูกแยกเป็นสองทางที่ beam splitter คือ 50% สะท้อนขึ้นไปด้านบน และอีก 50% ทะลุผ่านไปทางด้านขวาไปยังชิ้นงานตัวอย่างโลหะผสม Co-Fe โดยการทดลองนี้จะใช้เฉพาะลำแสงขนานที่สะท้อนไปทางด้านขวาเท่านั้น จากนั้นชิ้นงานตัวอย่างจะสะท้อนลำแสงกลับไปในแนวเดิมไปยัง beam splitter อีกครั้ง แล้วใช้เลนส์นูน L2 ที่มีความยาวโฟกัส 100 มิลลิเมตร รวมแสงที่ด้านล่างโดยระยะจากชิ้นงานตัวอย่างถึงเลนส์นูน L2 เท่ากับ 10 เซนติเมตร จากนั้นวางเลนส์นูน L3 ที่มีความ

ยาวโฟกัส 60 มิลลิเมตร โดยวางเลนส์ L3 ไว้ที่ระยะห่างจากเลนส์ L2 เป็นระยะเท่ากับ 16 เซนติเมตร เพื่อให้ลำแสงขนานและมีขนาดเท่าเดิมมาตกที่กล้อง CCD โดยวาง CCD ไว้ห่างจากเลนส์ L2 เป็นระยะ 6 เซนติเมตร จากนั้นบันทึกภาพที่ความเข้มแสงเท่ากับ $I(x,y,z)$ และเลื่อนกล้อง CCD ที่ตำแหน่ง defocus ในแกน z ก่อนและหลังระนาบ แล้วบันทึกภาพ ทำให้ได้ภาพที่มีความเข้มเท่ากับ $I(x,y,z-\Delta z)$ และ $I(x,y,z+\Delta z)$ ที่ระยะต่างๆ ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งระยะ defocus จะอยู่ในช่วง Rayleigh range (Z_R) คือ 0.31 เมตร โดยการออกแบบการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.18

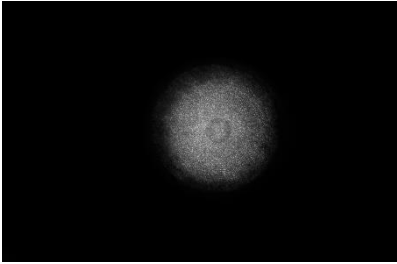
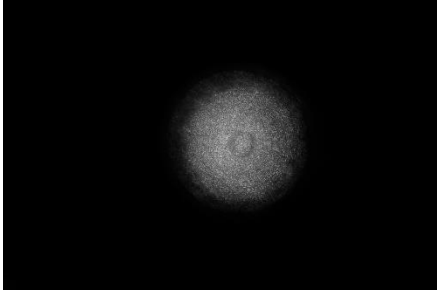
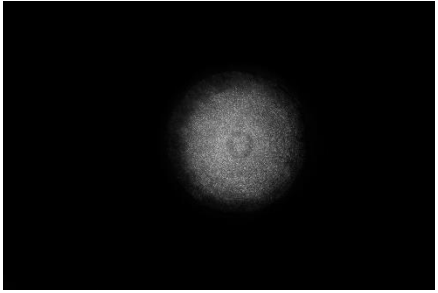
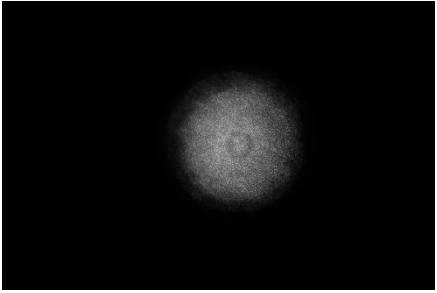
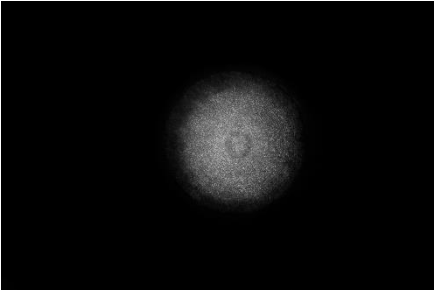


รูปที่ 4.18 การทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสำหรับตรวจสอบการกักร้อนบนพื้นผิวโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60

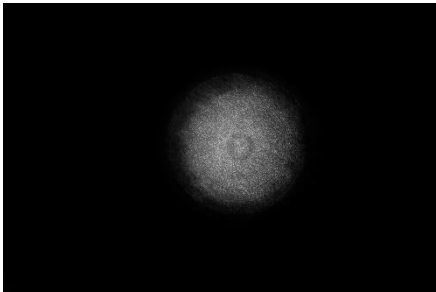
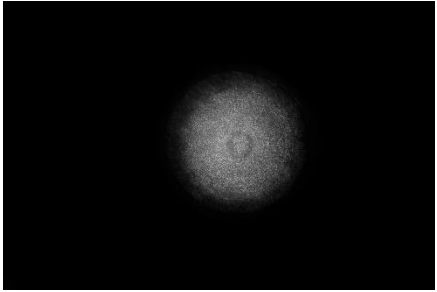
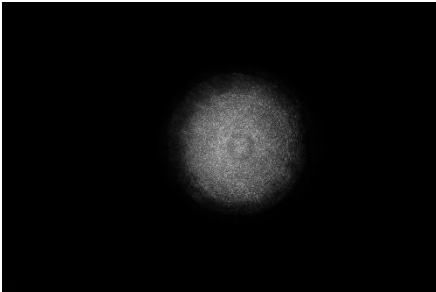
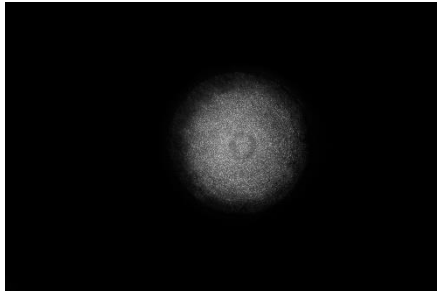
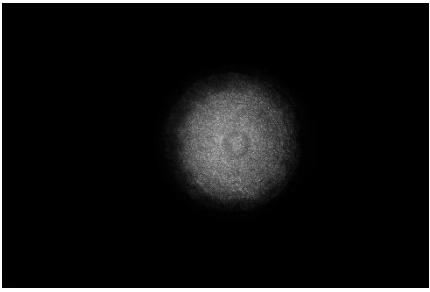
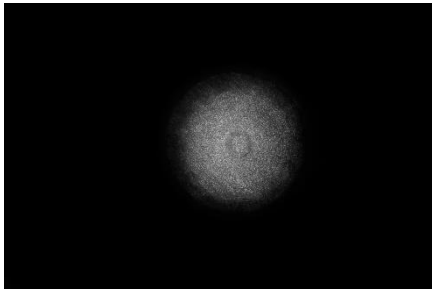
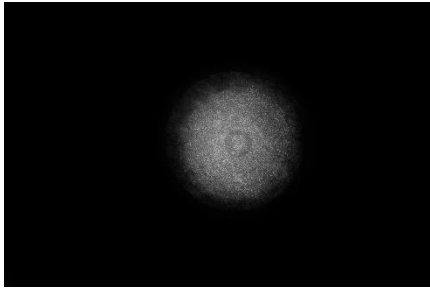
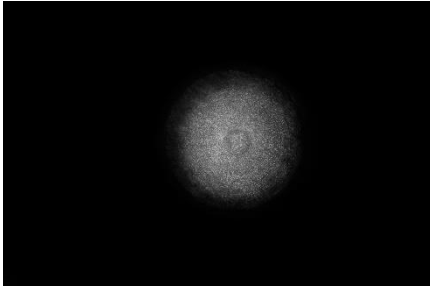
โดยจากการทดลองนั้นได้เก็บผลการทดลองเป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 จะถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 200 และ 300 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.10 พบว่าที่ตำแหน่ง 300 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง focus ต่อมาจึงเริ่มทำการทดลองครั้งที่ 2 โดยถ่ายภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 50 60 70 80 90 100 150 200 250 และ 300 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.11 พบว่าที่ตำแหน่ง 250 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 100 150 200 และ 250 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4.12 พบว่าที่ตำแหน่ง 250 ไมโครเมตร ภาพที่ได้ในตำแหน่งนี้เริ่มมีความแตกต่างจากภาพที่ตำแหน่ง focus จึงได้เลือกภาพจากการทดลองที่ 3 ที่ตำแหน่ง focus และ defocus ที่ระยะ 250 ไมโครเมตร จากภาพที่ถ่ายได้ซึ่งมีเฉพาะความเข้ม (แอมพลิจูด) พบว่าเกิดการกักร้อนแบบเลือกธาตุ (deironification) ซึ่งเป็นการกักร้อนที่ธาตุโลหะหนึ่งเสถียรกว่าธาตุหนึ่งเมื่อสัมผัสสภาพแวดล้อม โดยการทดลองนี้โลหะผสม Co-Fe จะสูญเสียเหล็กในปริมาณมากจนเห็นคอปเปอร์ โดยโลหะผสม

Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 จะเกิดการกักร้อนมากกว่าโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 เนื่องจากมีสัดส่วนเชิงมวลของเหล็กมากกว่า

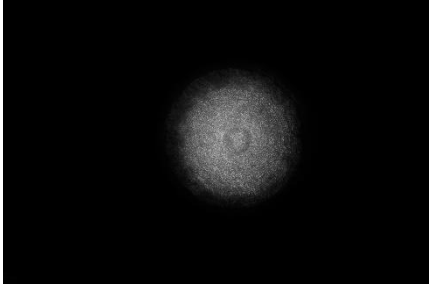
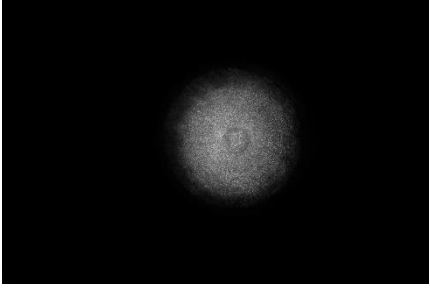
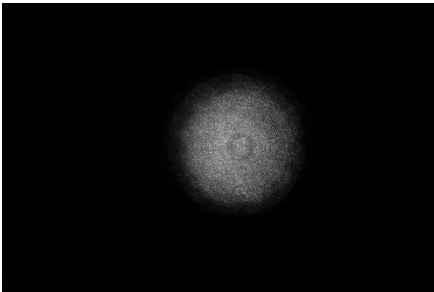
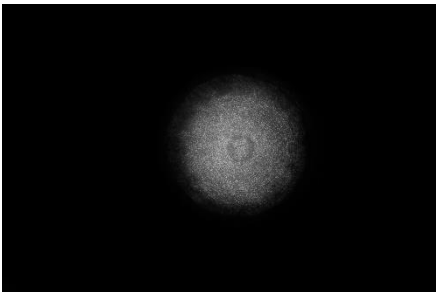
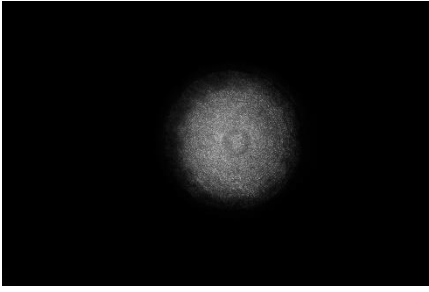
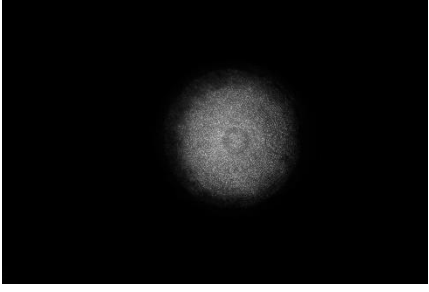
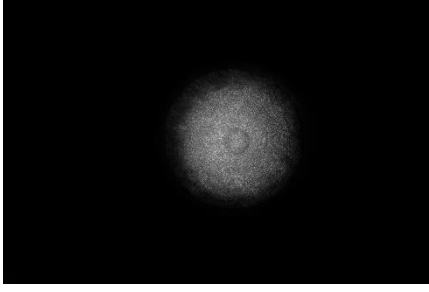
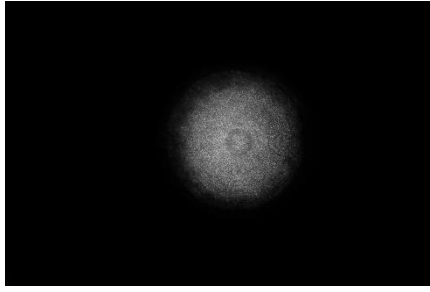
ตารางที่ 4.11 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1)

focus		
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
10		
20		

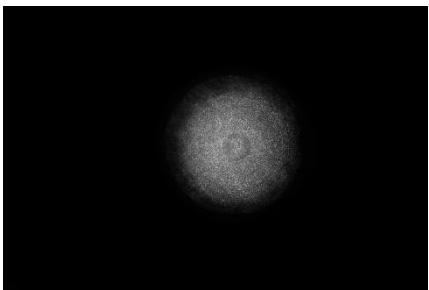
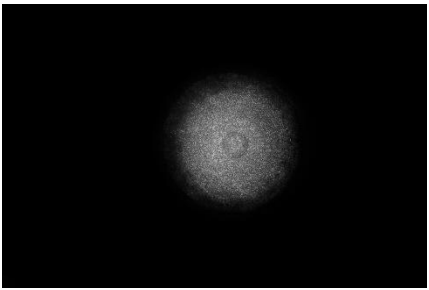
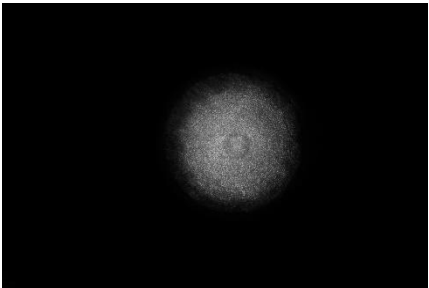
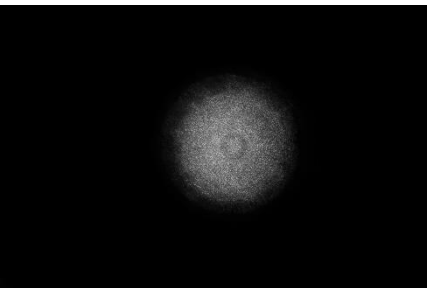
ตารางที่ 4.11 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
30		
40		
50		
60		

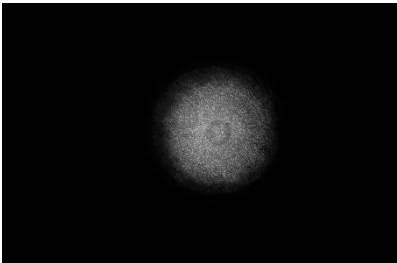
ตารางที่ 4.11 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
70		
80		
90		
100		

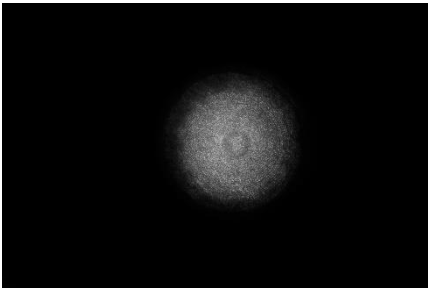
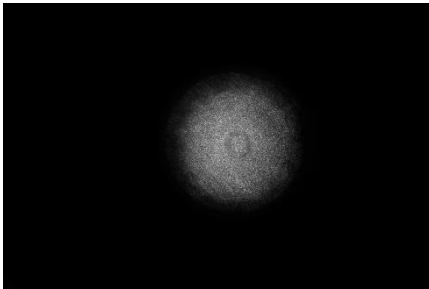
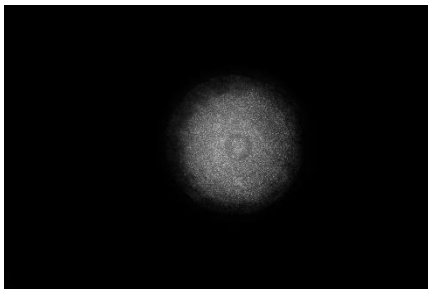
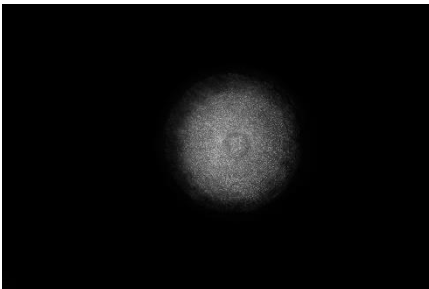
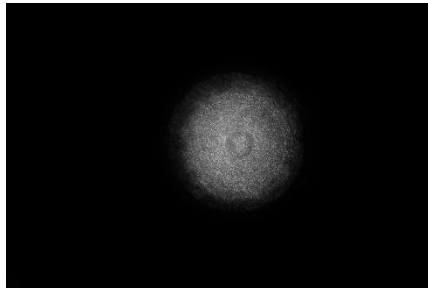
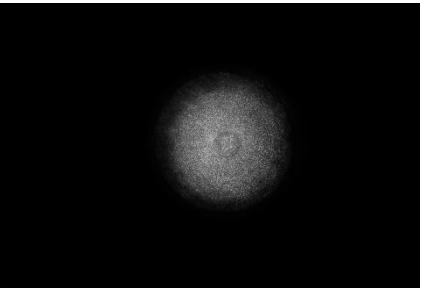
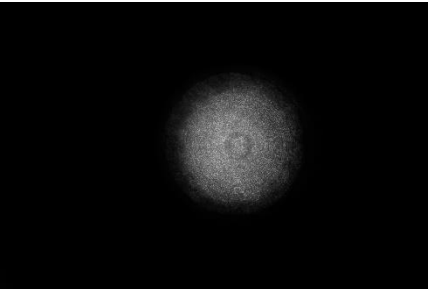
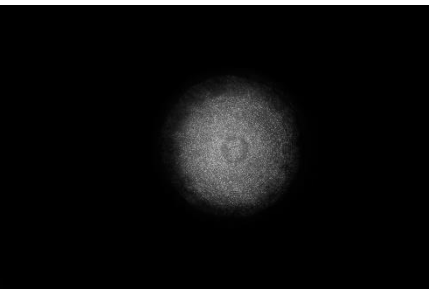
ตารางที่ 4.11 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 1) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
200		
300		

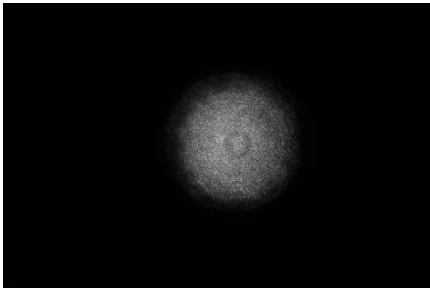
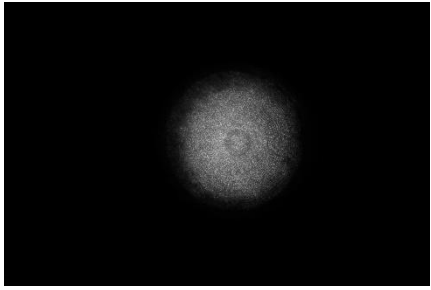
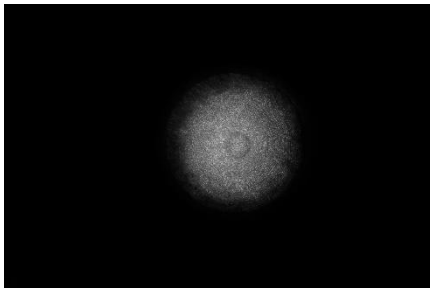
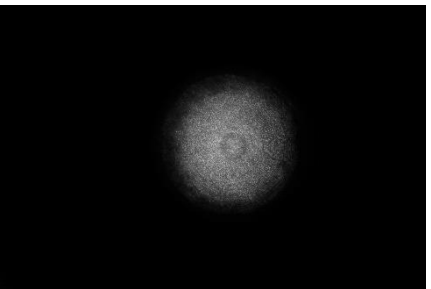
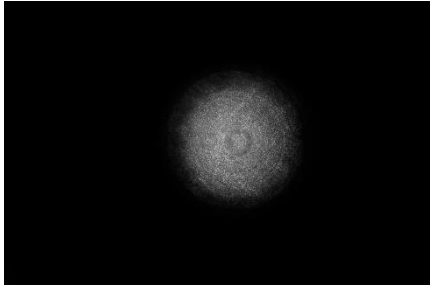
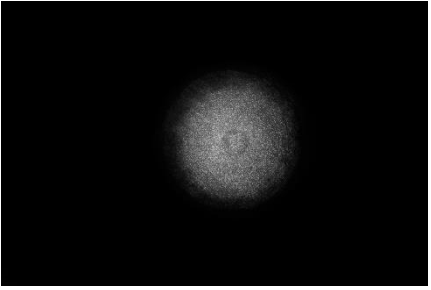
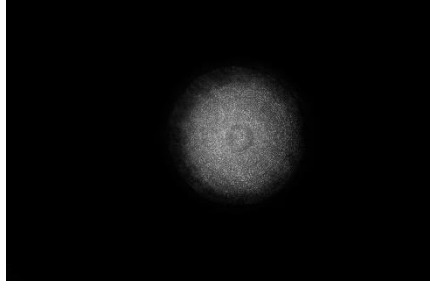
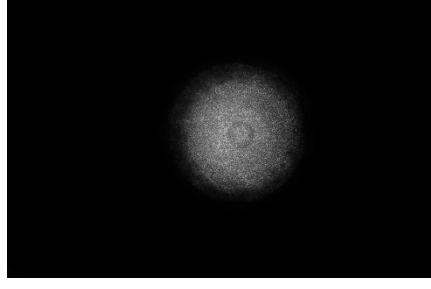
ตารางที่ 4.12 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2)

focus	
-------	--

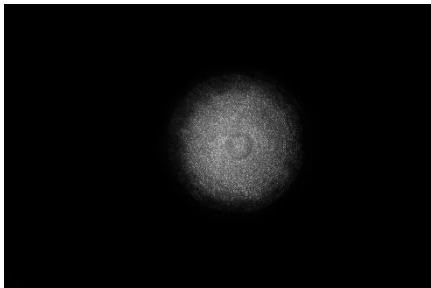
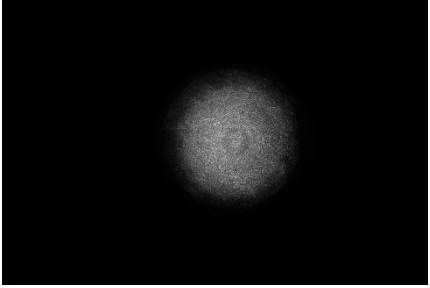
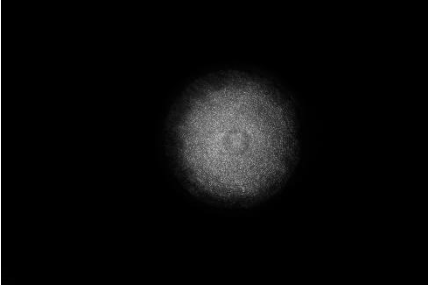
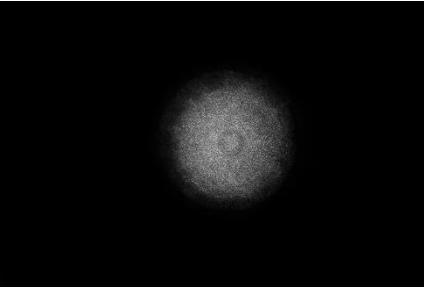
ตารางที่ 4.12 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
50		
60		
70		
80		

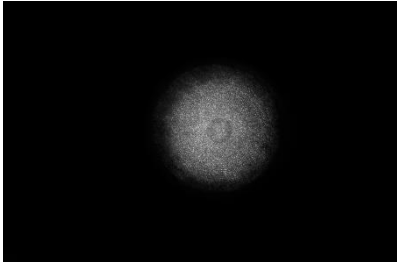
ตารางที่ 4.12 แสดงภาพที่บันทึกในระยยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
90		
100		
150		
200		

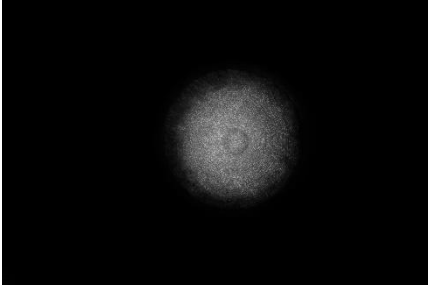
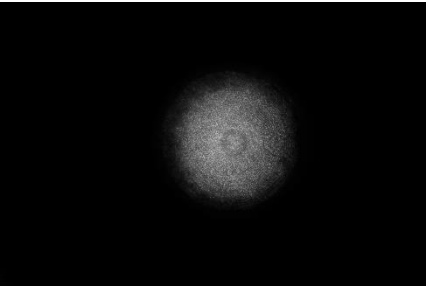
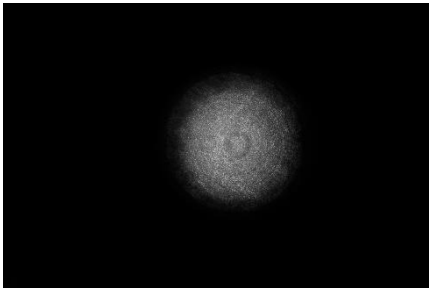
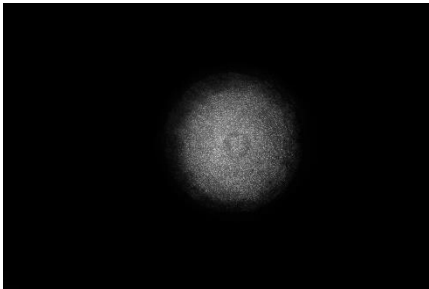
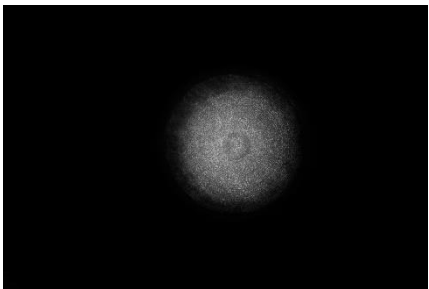
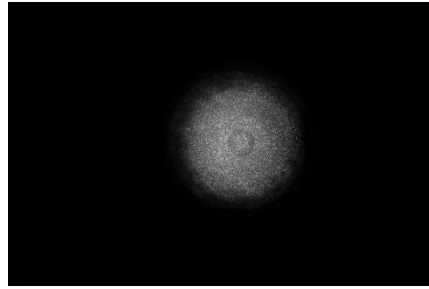
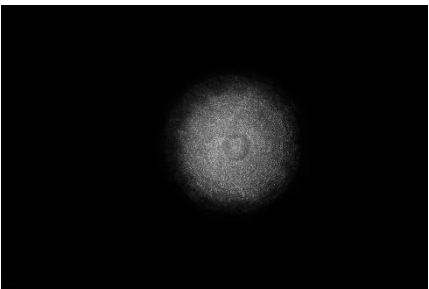
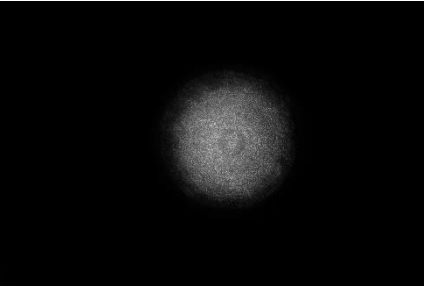
ตารางที่ 4.12 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 2) (ต่อ)

Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
250		
300		

ตารางที่ 4.13 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 3)

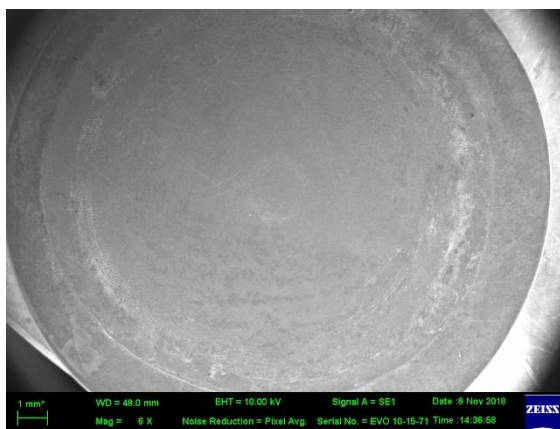
focus	
-------	--

ตารางที่ 4.13 แสดงภาพที่บันทึกในระยะ focus และ defocus ของโลหะผสม Co-Fe สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน (การทดลองครั้งที่ 3) (ต่อ)

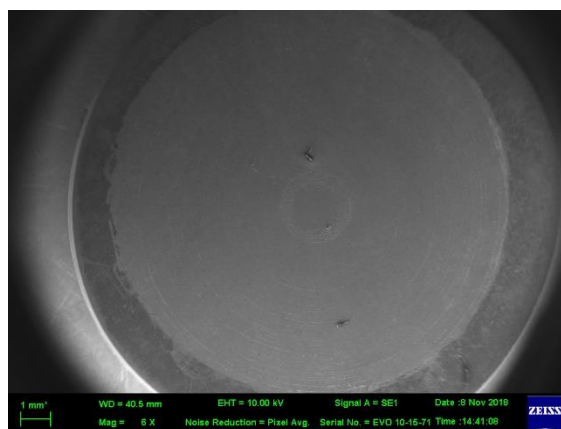
Δz	- Δz (μm)	+ Δz (μm)
100		
150		
200		
250		

4.3.4 การวิเคราะห์การกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะผสม Co-Fe ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อนำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 80:20 และ 40:60 เกิดการกัดกร่อนแบบเลือกธาตุ โดยที่โลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวล Co:Fe เป็น 40:60 จะเกิดการกัดกร่อนมากกว่าจนเห็นคอปเปอร์ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 โลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 80:20 จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 4.20 โลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลของ Co ต่อ Fe เป็น 40:60 จากเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ภาพที่ได้จากการจัดแสงด้วยเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงสามารถใช้ศึกษารูปแบบของการกัดกร่อนบนพื้นผิวของวัสดุได้ และภาพเฟสที่คำนวณได้จากสมการการส่งผ่านความเข้มแสงนั้นสามารถศึกษาความลึกและการเจริญเติบโตของหลุมการกัดกร่อนบนพื้นผิวเพื่อประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุได้ และเมื่อเปรียบเทียบเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกับเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงนั้นผลจากการศึกษามีความสอดคล้องกันแต่เทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงให้ข้อมูลที่ละเอียดกว่า ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของเทคนิค TIE สามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นเครื่องมือขนาดเล็กในการตรวจสอบการกัดกร่อนตามท่อในโรงงานอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

5.1.1 ผลการศึกษาโลหะผสม Co-Fe ด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสงโดยนำภาพที่ระยะโฟกัส(แอมพลิฟูด) มาวิเคราะห์พบว่าโลหะผสมฟิล์มบาง Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลเป็น 80:20 พื้นผิวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก อันเนื่องมาจากมีปริมาณ Fe ต่ำ จึงเกิดการกัดกร่อนน้อย โดยโลหะผสมเกิดการกัดกร่อนแบบเลือกธาตุ หรือการสูญเสียส่วนผสมบางตัว (selective leaching) คือโลหะผสมเกิดการสูญเสียเหล็ก (deironification) เพราะเหล็กเสียน้อย (มีค่าไฟฟ้าต่ำ) กว่าโคบอลต์ ทำให้เหล็กละลายอยู่ในรูปไอออน (อะตอมของเหล็กสูญเสียอิเล็กตรอน) ในสารละลาย แต่สูญเสียในปริมาณที่น้อยมากๆจึงไม่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงจากการถ่ายภาพพื้นผิว และเมื่อนำโลหะผสม Co-Fe ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าพื้นผิวของโลหะผสมไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากนักเช่นเดียวกัน แต่เมื่อนำโลหะผสม Co-Fe ที่สัดส่วนเชิงมวลเป็น 40:60 มาทดสอบด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสงโดยนำภาพที่ระยะโฟกัส (แอมพลิฟูด) มาวิเคราะห์พบว่าเกิดการกัดกร่อนแบบเลือกธาตุโดยที่เหล็กละลายออกไปในปริมาณมากทำให้ชั้นฟิล์มที่เคลือบอยู่บางลงจนเห็นพื้นผิวของคอปเปอร์ และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะได้ผลที่สอดคล้องกัน

5.1.2 ผลการศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสงโดยนำภาพที่ระยะโฟกัส(แอมพลิฟูด) มาวิเคราะห์พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) กระจายไปทั่วชิ้นงานโดยหลุมการกัดกร่อนมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งหลุมการกัดกร่อนเกิดจากการที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์แตกออกเฉพาะที่ก่อนที่ฟิล์มจะก่อตัวขึ้นมาใหม่อีกครั้ง จึงทำให้สารละลายน้ำปราศจากไอออนที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกในการทดลอง สามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดหลุม และบริเวณขอบของชิ้นงานตัวอย่างเกิดการกัดกร่อนแบบในซอก (crevice corrosion) อันเนื่องมาจากในขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อนด้วย

เทคนิคโพเทนซีโอไดนามิกโพลาริเซชัน ที่เหล็กกล้าไร้สนิมถูกจำกัดพื้นที่ผิวที่เปิดออกสู่สารละลายให้มีลักษณะเป็นวงกลม ซึ่งทำโดยการใส่แหวนรองวงกลมชนิดเพปลอนที่ผิวหน้านั้นอาจไม่สนิทจึงทำให้สารละลายรั่วซึมแล้วไปขังบริเวณรอยทับ และเมื่อนำภาพ (แอมพลิจูด) ที่ตำแหน่ง focus และตำแหน่ง defocus ที่ระยะ 2500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นระยะที่อยู่ในช่วงของ Rayleigh ไปคำนวณหาเฟสของวัตถุด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้สมการ TIE เพื่อศึกษาความลึกของหลุมการกัดกร่อนนั้น พบว่าหลุมการกัดกร่อนแบบรูเข็มมีความลึกประมาณ 2 ไมโครเมตร และเมื่อขยายภาพเฟสสามารถทำให้ทราบลักษณะการเจริญเติบโตภายในของหลุมการกัดกร่อนโดยพบว่าบริเวณหลุมด้านบนมีความกว้างและจะแคบลงเรื่อยๆเมื่อถูกกัดกร่อนลึกลงไป ซึ่งทิศทางของการเจริญเติบโตของหลุมการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับลักษณะการวางชิ้นงานตัวอย่างในขณะที่ทำการทดสอบการกัดกร่อน แต่เมื่อนำตัวอย่างไปทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มและแบบในซอก แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ความลึกของหลุมการกัดกร่อนและการเติบโตของหลุมการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้

5.1.3 ผลการศึกษาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการทดลองด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสงโดยนำภาพที่ระยะโฟกัส(แอมพลิจูด) มาวิเคราะห์พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl ใน produced water เป็น 0.095% เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) กระจายไปทั่วชิ้นงานโดยหลุมการกัดกร่อนมีขนาดแตกต่างกัน ซึ่งหลุมการกัดกร่อนเกิดจากการที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์แตกออกเฉพาะที่ก่อนที่ฟิล์มจะก่อตัวขึ้นมาใหม่อีกครั้งจึงทำให้ไอออนในน้ำ produced water จำลอง สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็กได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดหลุม เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าได้ผลที่สอดคล้องกัน แต่เมื่อนำเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 420 ที่ความเข้มข้นของ NaCl ใน produced water เป็น 3.5% มาทดสอบด้วยเทคนิคการส่งผ่านทางแสงโดยนำภาพที่ระยะโฟกัส(แอมพลิจูด) มาวิเคราะห์พบว่าเทคนิคนี้ไม่สามารถตรวจสอบพื้นผิวการกัดกร่อนได้ เนื่องจากพื้นผิวเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงจนผิวหน้าเสียหาย จึงทำให้แสงที่ไปตกกระทบพื้นผิวกระเจิงไปทุกทิศทาง ทำให้ภาพที่ถ่ายได้มืด และเมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าพื้นผิวเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงจนผิวหน้าเสียหาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ระยะ defocus ในการเคลื่อนกล้อง CCD ซึ่งเป็นระยะที่ภาพเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่ง focus เพื่อนำภาพที่ตำแหน่ง defocus ไปคำนวณในสมการการส่งผ่านความเข้มแสง(TIE) สำหรับศึกษาความลึกของหลุมการกัดกร่อน โดยได้เลือกระยะ defocus ด้วยการสังเกตจากตาของผู้วิจัยผ่านจอแสดงภาพของกล้อง CCD ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้ ดังนั้นเพื่อให้ผลการทดลองมีประสิทธิภาพและเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจึงควรมีเครื่องมือที่มีความแม่นยำมาช่วยตรวจสอบระยะ defocus ในขั้นตอนนี้

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ที่มีขนาดของหลุมการกัดกร่อนที่แตกต่างกันโดยจะมีการถ่ายภาพที่ระยะ focus และ defocus จากนั้นนำภาพที่มีความเข้มแสงแตกต่างกันไปคำนวณหาเฟสเพื่อศึกษาความลึกและการเติบโตภายในหลุมการกัดกร่อน แต่ผลการทดลองของ

งานวิจัยนี้จะแสดงแค่ผลการทดลองที่ได้คำนวณเป็นเฟสเฉพาะผลการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 เนื่องจากผู้ทดลองสนใจศึกษาเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงในการประยุกต์ใช้สำหรับตรวจสอบการกัดกร่อนเท่านั้น และผลการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 ก็สามารถอ้างอิงถึงผลการทดลองของตัวอย่างอื่นได้แล้วว่าเทคนิคการส่งผ่านความเข้มแสงนั้นสามารถตรวจสอบความลึกของหลุมการกัดกร่อนและการเติบโตภายในหลุมได้ เนื่องจากหลุมการกัดกร่อนที่เกิดบนผิวหน้าของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด AISI 304 นั้นเป็นหลุมที่เล็กมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

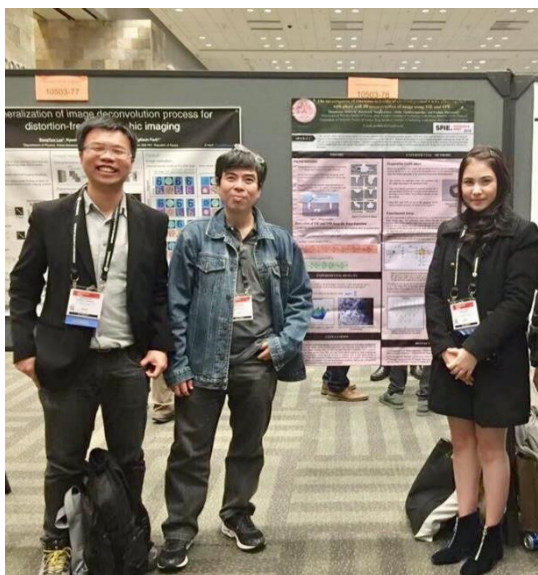
- [1] G.H. Koch, M.P.H. Brongers, N.G. Thompson, Y.P. Virmani, and J.H. Payer. 2002. "Corrosion costs and preventive strategies in the United States." U.S. Federal Highway Administration Report FHWA- RD-01-156.
- [2] สุธา สุทธิเรืองวงศ์. 2559. "อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิล-เหล็กจากการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าในน้ำปราศจากไอออนและสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีการเติมอากาศ." วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 21(2) : 176-187.
- [3] อติตยา จันเสนา. 2558. "พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมฟิล์มบาง Co-Fe จากวิธีการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าในกระบวนการผลิตหัวอ่าน-หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] T. Tobsin, P. Bangchit, V. Sirikullertrat, and S. Sutthiruangwong. 2010. "Influence of sodium dodecyl sulfate on corrosion behavior of 304 stainless steel." Thammasat Int. J. Sc. Tech. 15(3) : 40-46.
- [5] ณปภัช พิมพ์ดี. 2560. การกัดกร่อนและการป้องกัน. [Online]. Available : <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7182-2017-06-05-14-44-28>.
- [6] คณะเจ้าหน้าที่บริษัท อสมท จำกัด (มหาชน). 2550. ความรู้เรื่องฮาร์ดดิสก์ Hard Disk. [Online]. Available : http://dtv.mcot.net/data/up_show.php?id=1183351361&web=epost.
- [7] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. 2560. สารแม่เหล็ก. [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/PDF-learning/6/physics2/14Magnet.pdf>.
- [8] M. Basunia. 2016. "A recursive phase retrieval technique using transport of Intensity: reconstruction of imaged phase and 3D surfaces." Thesis of University of Dayton.
- [9] H. Sun. 1998. "Thin lens equation for a real laser beam with weak lens aperture truncation." Opt. Eng. 37(11) : 2906–2913.
- [10] A. E. Siegman. 1986. LASERS. United States of America : University Science Books.
- [11] E. Bostan, E. Froustey, B. Rappaz, E. Shaffer, D. Sage, and M. Unser 2014. "Phase retrieval by using transport-of-intensity equation and differential interference contrast microscopy." IEEE Trans. Image Process. 3939-3943.
- [12] K. Koshi and N. Takanori. 2017. "Object plane detection and phase-amplitude imaging based on transport of intensity equation." Opt. Rev. 24(5) : 626-633.
- [13] อาริยา เอี่ยมบุ๋. 2554. "การประเมินชั้นเคลือบแคลเซียม-ฟอสฟอรัสบนไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้าเพื่อใช้เป็นวัสดุชีวภาพ." รายงานฉบับสมบูรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

- [14] สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2560. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>.
- [15] ดร.ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2560. คอปเปอร์. [Online]. Available : <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Cu.html>.
- [16] ดร.ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2560. เหล็ก. [Online]. Available : <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Fe.html>.
- [17] ดร.ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2560. โคบอลต์. [Online]. Available : <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet5/topic2/Co.html>.
- [18] ชีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล. 2554. “เหล็กกล้า (ไร้สนิม) สำหรับงานทนความร้อน.” เทคโนโลยีวัสดุ. 1(62) : 70-73.
- [19] Toril I. Røe Utvik. 1999. “Chemical characteristics of produced water from four offshore oil production platforms in the North Sea.” *Chemosphere*. 39(15) : 2593-2606.
- [20] A. Chansena and S. Sutthiruangwong. 2017. “Corrosion behavior of electrodeposited Co-Fe alloys in aerated solutions.” *J. Magn. Mater.* 429(2017) : 251-256.
- [21] B. Emrah, F. Emmanuel, N. Masih Nilchian, S. Daniel, and U. Michael. 2016. “Variational phase imaging using the transport-of-Intensity equation.” *IEEE Trans. Image Process.* 25(2) : 807-817.
- [22] A. Asundi, C. Zuo, and Q. Chen. 2013. *Comparison of Digital Holography and Transport of Intensity for Quantitative Phase Contrast Imaging.* Springer.
- [23] T. Pojtanabuntoeng, C. Saiwan, S. Sutthiruangwong, and D. L. Gallup. 2011. “Effect of mercury on corrosion in production wells in the gulf of Thailand fields.” *Corros. Sci.* 46(4) : 547-553.
- [24] P. P. Crooker, J. Blau, and W. B. Colson. 2005. “Stability of a short Rayleigh length laser resonator.” *Phys. Rev. ST Accel. Beams.* 8(4) : 040703-1-040703-6.
- [25] C. Zuo, Q. Chen, W. Qu, and A. Asundi. 2013. “Noninterferometric single-shot quantitative phase microscopy.” *Optics Letters.* 38(18) : 3538-3541.
- [26] A. Kohn, A. Habibi, and M. Mayo. 2015. “Experimental evaluation of the transport of intensity equation for magnetic phase reconstruction in Lorentz transmission electron microscopy.” *Ultramicroscopy.* 110(5) : 375-382.
- [27] C. Zuo, Q. Chen, Y. Yu, and A. Asundi. 2013. “Transport of intensity phase imaging using Savitzky Golay differentiation filter theory and applications.” *Optics Express.* 21(5) : 5346-5362.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

แสดงผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ SPIE Photonics - West 2018 ณ เมืองซานฟรานซิสโก รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา ระหว่างวันที่ 27 มกราคม ถึง 1 กุมภาพันธ์ 2561



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวธรรณธัช ศรีสุวรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	27 สิงหาคม 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	4/6 หมู่ 11 ตำบลปากน้ำ อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา
ประวัติการศึกษา	(2556) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยรังสิต (2552) โรงเรียนดัดดรุณี ฉะเชิงเทรา
ผลงานทางวิชาการ	The investigation of corrosion behavior of electrodeposited Co-Fe alloys surface with phase and 3D reconstruction of image using TIE and TPE ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ SPIE Photonics West 2018 ณ เมืองซานฟรานซิสโก รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา