

อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการมาร์กด้วยเลเซอร์ต่อสมบัติ
พื้นผิวและการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L
INFLUENCE OF LASER MARKING PROCESS PARAMETERS
ON SURFACE PROPERTIES AND CORROSION OF
STAINLESS STEEL 316L



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF LASER MARKING PROCESS PARAMETERS
ON SURFACE PROPERTIES AND CORROSION
OF STAINLESS STEEL 316L



MR. THANAKORN MANAJUNYAPONK
MS. RASITA LUEWONGWATTANA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN
PRODUCTION DESIGN AND MATERIALS ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการมาร์กด้วยเลเซอร์ต่อสมบัติพื้นผิว
และการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

INFLUENCE OF LASER MARKING PROCESS PARAMETERS ON
SURFACE PROPERTIES AND CORROSION OF STAINLESS STEEL
316L

นักศึกษา

นายธนากร มานะจรรยาพงศ์ รหัสประจำตัว 62010386

นางสาวรสิตา ลีวงศ์วัฒนา รหัสประจำตัว 62010764

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(ผศ.ดร. พชรพล ตันตวิรุฬห์)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการมาร์กด้วยเลเซอร์ต่อสมบัติพื้นผิวและการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L
นักศึกษา	นายธนากร มานะจรรยาพงศ์ นางสาวรสิตา ลีวงศ์วัฒนา
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมออกแบบการผลิตและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.เพชรพล ตันทวิวิรุฬห์

บทคัดย่อ

การทำเครื่องหมายด้วยเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้สร้างลวดลายหรือเครื่องหมายบนผิวของวัสดุต่าง ๆ เช่น เหล็ก พอลิเมอร์ และวัสดุผสม ตัวแปรสำคัญของกระบวนการเครื่องหมายได้แก่ ความเร็ว ความถี่ และค่าพลังงาน ตัวแปรเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพของเครื่องหมายบนผิว ในงานวิจัยนี้จะทำการมาร์กด้วยเลเซอร์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ซึ่งมักใช้เป็นวัสดุฝังในร่างกาย เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็ว (1500 2500 และ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที) พลังงาน (20-90% ของความจุสูงสุด) และความถี่ (50-400 กิโลเฮิร์ตซ์) ต่อค่าสี ความขรุขระ และพฤติกรรมการกัดกร่อน

ผลที่ได้คือ เมื่อเพิ่มความถี่ของเลเซอร์จะลดความคมชัดของเครื่องหมาย(Contrast) ในทางกลับกัน การเพิ่มพลังงานของเลเซอร์จะเพิ่มความคมชัดของเครื่องหมาย(Contrast) สำหรับความขรุขระผิว ความถี่เลเซอร์ที่สูงขึ้นจะทำให้ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เรียบขึ้น นอกจากนี้ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ได้ถูกทดสอบโดยวิธีศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit potential; OCP) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ผ่านการมาร์กด้วยเลเซอร์ ลดลงเมื่อเทียบกับผิวที่ไม่ได้ถูกทำเครื่องหมาย ทั้งนี้อาจเนื่องจากการก่อตัวของออกไซด์ที่ไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้

ดังนั้นผู้วิจัยสรุปได้ว่าตัวแปรของการทำเครื่องหมายด้วยเลเซอร์จะมีผลต่อคุณภาพของการทำเครื่องหมายลงบนเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

Thesis Title	Influence of Laser Marking Process Parameters on Surface Properties and Corrosion of Stainless Steel 316L
Student	Mr. Thanakorn Manajunyaponk Ms. Rasita Luewongwattana
Degree	Bachelor of Engineering in Production Design and Materials Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Phacharaphon Tunthawiroon

ABSTRACT

Laser marking is a technology that can be used to create signatures or marks on the surface of various materials, for example, steels, polymers and composites.

The crucial parameters of the marking process include traveling speed, frequency, and power energy. These variables would significantly affect the quality of the marking on the surface. In this study, laser marking is performed on the surface of stainless steel 316L, which is normally employed as implant materials, such as bone plates.

The experiments investigated the effects of speed (1500 2500 and 3500 mm/s), power (20-90% of maximum capacity), and frequency (50-400 kHz) on the color, roughness, and corrosion behavior.

Results showed that an increase in the laser frequency reduced the contrast of the marks. In contrast, the power of the laser increased the contrast of the marks. For surface roughness, a higher frequency of laser made the surface of stainless steel smoother. In addition, the effect of process parameters on the corrosion behavior of stainless steel 316L was evaluated vis the open circuit potential (OCP) test. The results showed that the corrosion behavior of 316L was lowered compared to a non-marked surface. This is due to the formation of oxides which could not resist to corrosion.

The authors thus concluded that the parameters of laser marking affect the quality of marking.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่องอิทธิพลของตัวแปรที่สำคัญของการมาร์กด้วยเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด316L ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่กรุณาให้ความช่วยเหลือให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาจนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พชรพล ตันตวิรุฬห์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และยังคงคอยช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะดำเนินงาน ตลอดจนให้ความรู้ให้คำปรึกษา และความเอาใจใส่ในทุก ๆ ด้านแก่ผู้จัดทำปริญญาานิพนธ์ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้จัดทำทั้งสถานที่ ห้องปฏิบัติการรวมถึงค่าใช้จ่ายในงานวิจัยจนสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมไปถึงผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน จนทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย ผู้จัดทำวิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการศึกษเกี่ยวกับวัสดุอุตสาหกรรมการแพทย์ และผู้ที่มีความสนใจ

นายธนกร มานะจรรยาพงศ์
นางสาวรสิตา ลือวงศ์วัฒนา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ณ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเลเซอร์.....	6
2.1.1 คุณสมบัติของเลเซอร์.....	7
2.1.2 การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated emission).....	8
2.1.3 การขยายสัญญาณแสง (Light amplification).....	8
2.1.4 การเพิ่มจำนวนโฟตอน (Photon amplification).....	9
2.1.5 คุณสมบัติโคฮีเร้นท์ของแสงเลเซอร์.....	9
2.1.6 ชนิดของเลเซอร์.....	11

สารบัญ

หน้า

2.1.7 เครื่องเลเซอร์มาร์ก (Laser marking theory).....	14
2.1.8 เครื่องเลเซอร์มาร์ก ยี่ห้อ Keyence รุ่น MD-X Series ประเภท 3-Axis hybrid laser marker	15
2.2 วัสดุปลูกฝังทางการแพทย์	16
2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม	17
2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในทางการแพทย์.....	17
2.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L	18
2.2.4 เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ถูกใช้ในการปลูกฝังลงในร่างกายมนุษย์	19
2.3 กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล (Laser scanning microscope).....	20
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสีและมาตรฐานการวัดค่าสี	20
2.4.1 ระบบสี RGB	21
2.4.2 ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ (Contrast)	22
2.4.3 โปรแกรมการวิเคราะห์ค่าสี ImageJ	22
2.5 การวัดค่าความขรุขระบนพื้นผิว.....	23
2.5.1 ความหยาบผิว (Roughness).....	23
2.5.2 เครื่องมือวัดความหยาบผิว (Roughness tester)	24
2.5.3 หน่วยการวัดความหยาบผิว.....	24
2.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความหยาบผิว.....	24
2.6 ออกไซด์บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L.....	26
2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะ.....	27
2.7.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD).....	27
2.7.2 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	28

สารบัญ

หน้า

2.7.3 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (Grazing-incidence x-ray diffraction; GIXRD)	29
2.7.4 ความแตกต่างระหว่างเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD)	29
2.7.5 โปรแกรมวิเคราะห์ผลของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	30
2.8 การทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน (Corrosion testing)	32
2.8.1 วิธีการทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion test)	32
2.8.2 การทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open circuit potential; OCP)	33
2.8.3 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/AgCl	34
2.8.4 มาตรฐานการทดสอบวัสดุทางการแพทย์	35

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์	37
3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง	38
3.2.1 ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	38
3.2.2 วางแผนออกแบบตัวแปรของการมาร์กด้วยเลเซอร์	39
3.2.3 ขั้นตอนการตรวจสอบค่าสี	40
3.2.4 ขั้นตอนการตรวจสอบความขรุขระ	43
3.2.5 ขั้นตอนการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์	45
3.2.6 ขั้นตอนการตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน	48
3.3 สถานที่ทำการทดลอง	49
3.4 ระยะเวลาการทำวิจัย	49

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการศึกษาค่า.....	50
4.1.1 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง.....	57
4.2 ผลการศึกษาความขรุขระ.....	58
4.2.1 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง.....	60
4.3 ผลการศึกษาความขรุขระ.....	60
4.3.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นออกไซด์ฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	60
4.3.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นออกไซด์ฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD).....	64
4.4 ผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน.....	66
4.4.1 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง.....	68
4.5 การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์.....	68
4.5.1 ผลกระทบจากค่าพลังงาน.....	68
4.5.2 ผลกระทบจากค่าความถี่.....	69
4.5.3 ผลกระทบจากค่าความเร็ว.....	70
4.5.4 สรุปผลกระทบจากตัวแปรที่มีผลต่อการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์.....	71

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73

เอกสารอ้างอิง.....	74
---------------------------	-----------

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	วัสดุปลูกถ่ายสามารถจำแนกได้ตามประเภทของวัสดุที่ใช้และการตอบสนองทางชีววิทยาที่พวกมันกระตุ้นเมื่อทำการปลูกฝัง.....	2
ตารางที่ 1.2	แผนการดำเนินงานของโครงการวิจัย.....	5
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีหลักของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L	18
ตารางที่ 3.1	ตารางแสดงค่าตัวแปรของการมาร์กด้วยเลเซอร์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L.....	39
ตารางที่ 4.1	แสดงค่าเฉลี่ยความเข้มสีในความเร็วที่ 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	51
ตารางที่ 4.2	แสดงค่าเฉลี่ยความเข้มสีในความเร็วที่ 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	52
ตารางที่ 4.3	แสดงค่าเฉลี่ยความเข้มสีในความเร็วที่ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	53
ตารางที่ 4.4	แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ ในความเร็วที่ 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที	54
ตารางที่ 4.5	แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ ในความเร็วที่ 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที	55
ตารางที่ 4.6	แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ ในความเร็วที่ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	56
ตารางที่ 4.7	แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิวในความเร็วที่ 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	58
ตารางที่ 4.8	แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิวในความเร็วที่ 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	59
ตารางที่ 4.9	แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิวในความเร็วที่ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	59

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การเปล่งแสงแบบถูกเร้า	8
รูปที่ 2.2 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์ของแข็ง (Solid-state laser).....	11
รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์แก๊ส (Gas laser).....	12
รูปที่ 2.4 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์ของเหลว (Liquid laser).....	13
รูปที่ 2.5 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์ไดโอด (Diod laser).....	14
รูปที่ 2.6 เครื่องเลเซอร์มาร์กกี้อี่ห้อ Keyence รุ่น MD-X Series ประเภท 3-Axis hybrid laser.....	15
รูปที่ 2.7 แสดงวัสดุปลูกฝังทางการแพทย์ที่ใช้ในการปลูกฝังในข้อต่อขาและแขน	16
รูปที่ 2.8 ระบบสี RGB	21
รูปที่ 2.9 วิธีการใช้โปรแกรม ImageJ	23
รูปที่ 2.10 กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอลยี่ห้อ Olympus รุ่น 3D Measuring laser microscope OLS 5000.....	25
รูปที่ 2.11 แสดงภาพสามมิติแสดงสภาพพื้นผิวของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L.....	25
รูปที่ 2.12 แสดงภาพกำลังขยาย 20 เท่าของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L.....	26
รูปที่ 2.13 แสดงการวิเคราะห์ค่าความขรุขระที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L.....	26
รูปที่ 2.14 แสดงพื้นผิวออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L.....	27
รูปที่ 2.15 แสดงหลักการกระจายรังสีออกมาจากอะตอมของวัสดุไปยังเครื่องรับภาพของรังสี	28
รูปที่ 2.16 แสดงหลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	28
รูปที่ 2.17 แสดงหลักการทำงานของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ	29
รูปที่ 2.18 โปรแกรม Jade5 ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน	32
รูปที่ 2.19 แสดงแท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/AgCl.....	34
รูปที่ 2.20 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.9% $\frac{w}{w}$ NaCl ใน DIH ₂ O	35
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพขั้นตอนการทดลองตลอดโครงการ	38
รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบรอยมาร์กของการมาร์กด้วยเลเซอร์	39
รูปที่ 3.3 ขอบเขตของการมาร์กด้วยเลเซอร์ในแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L.....	40
รูปที่ 3.4 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	40
รูปที่ 3.5 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	40
รูปที่ 3.6 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	41
รูปที่ 3.7 รอยมาร์กจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและถืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 3.8 รอยมาร์กจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า.....	41
รูปที่ 3.9 รอยมาร์กจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า.....	42
รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการปรับภาพเป็นขาวดำ.....	42
รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการ Analyze ค่าความเข้มข้นของสี	43
รูปที่ 3.12 แสดงขั้นตอนการเปิดหน้าต่างแสดงกราฟฮิสโตแกรมของค่าความเข้มข้นของสี.....	43
รูปที่ 3.13 รอยมาร์กที่กำลังขยาย 20 เท่า ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที	44
รูปที่ 3.14 รอยมาร์กที่กำลังขยาย 20 เท่า ที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที	44
รูปที่ 3.15 รอยมาร์กที่กำลังขยาย 20 เท่า ที่ความเร็ว 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที	44
รูปที่ 3.16 ตรวจสอบความเรียบผิวจากโปรแกรม Olympus OLS5100 analysis application.....	45
รูปที่ 3.17 ขอบเขตของการมาร์กด้วยเลเซอร์ในแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L	45
รูปที่ 3.18 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	46
รูปที่ 3.19 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	46
รูปที่ 3.20 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	46
รูปที่ 3.21 รูปชิ้นงานหลังจากทำการตัดด้วยเครื่องตัดไฮดรอลิค ที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	47
รูปที่ 3.22 ชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของชั้นฟิล์มออกไซด์.....	47
รูปที่ 3.23 ขั้นตอนตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	48
รูปที่ 3.24 แสดงการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานโดยวิธีศึกษาการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น.....	49
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุและความถี่	57
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิว (Ra) และความถี่ ในความเร็วที่.....	60
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L.....	61
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์	61
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์	62
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์	62
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้น.....	63
รูปที่ 4.8 โครงสร้างผลึกจากการวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้น.....	64
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผล GIXRD แกน $\theta/2\theta$ ความเร็ว 10 องศาต่อนาทีของชิ้นงานตัวอย่างพลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผล GIXRD แกน 2 θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 10 องศาต่อนาทีของชิ้นงานตัวอย่าง พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	65
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผล GIXRD แกน 2 θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 3 องศาต่อนาทีของชิ้นงานตัวอย่าง พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที.....	66
รูปที่ 4.12 กราฟศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (OCP) รวมของชิ้นงานที่รอยมาร์ก พลังงาน 80% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 2500 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที และ ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการมาร์กด้วยเลเซอร์	67
รูปที่ 4.13 กราฟแท่งแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่สถานะคงที่ในเวลา 100 วินาทีสุดท้ายของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการมาร์ก และชิ้นงานที่ความเร็ว 1500 2500 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ.....	67
รูปที่ 4.14 รูปจากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล ที่กำลังขยาย 20 เท่า ของชิ้นงานที่ไม่ผ่าน การมาร์ก และชิ้นงานที่ความเร็ว 1500 3500 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ	68
รูปที่ 4.15 แสดงผลกระทบของพลังงานกับขนาดของพื้นที่วงกลมบนรอยมาร์ค ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ และ ค่าพลังงานที่ 20% 50% 80% ตามลำดับ	69
รูปที่ 4.16 แสดงผลกระทบของความถี่กับขนาดของการซ้อนทับกันของวงกลมบนรอยมาร์ค ที่พลังงาน 50% และ 60% (แนวนอน) ความถี่ 50 100 250 กิโลเฮิร์ตซ์ (แนวตั้ง) ตามลำดับ	70
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดบ่อหลอม ระหว่างความถี่และความเร็ว	70
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์การเกิดการทับซ้อนกันของรอยมาร์ค ระหว่างความถี่และความเร็ว.....	70

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตการศึกษาของปริญญาโท เรื่องอิทธิพลของตัวแปรที่สำคัญของการมาร์กด้วยเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

- 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา
- 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา
- 1.3 ขอบเขตปริญญาโท
- 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
- 1.5 แผนการดำเนินงาน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การมาร์กด้วยเลเซอร์เป็นเทคนิคการฉายรังสีพื้นผิวที่ใช้ปฏิกิริยาโฟโวลูมิสเพื่อทำให้เมทริกซ์ของโลหะทำปฏิกิริยากับก๊าซโดยรอบที่อุณหภูมิสูงและผลิตโลหะออกไซด์ออกมาที่พื้นผิวของโลหะ [1] ซึ่งการใช้เลเซอร์ในการทำมาร์คของผลิตภัณฑ์นั้นถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เพื่อที่จะสอกลับถึงแหล่งผลิตและแหล่งที่มาของผลิตภัณฑ์ได้ โดยจุดประสงค์ของการมาร์กด้วยเลเซอร์คือการทำรอยที่เกิดขึ้นอย่างถาวรบนพื้นผิวของโลหะ เมื่อมีการผลิตสินค้าในการผลิตเป็นจำนวนมาก เพื่อปรับปรุงความปลอดภัยและประสิทธิภาพการผลิต การต่อต้านการปลอมแปลง การระบุตัวตนผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงมูลค่าทางการค้าที่เป็นไปได้ของเทคโนโลยีการทำสีพื้นผิวโลหะ [1,2] ซึ่งการศึกษาผลกระทบของการมาร์กด้วยเลเซอร์นั้นปัจจุบันหาได้ยากและมีการศึกษาเป็นจำนวนน้อย ตัวอย่างการศึกษาการกัดกร่อน เช่น ในสภาวะการเสื่อมสภาพและการกัดกร่อนของผิวการมาร์กด้วยเฟมโตเซคินเลเซอร์ (Femtosecond) ของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L การแช่ในระยะเวลา 1 สัปดาห์ ซึ่งยังไม่พบการกัดกร่อนของพื้นผิว [3]

วัสดุปลูกฝังในร่างกายแบ่งออกเป็นวัสดุทางวิศวกรรมทั้ง 3 อย่างคือ พอลิเมอร์ เซรามิกซ์ และโลหะ ซึ่งวัสดุปลูกฝังสามารถจำแนกได้ตามประเภทของวัสดุที่ใช้และการตอบสนองทางชีววิทยาที่พวกมันกระตุ้นเมื่อทำการปลูกฝัง ดังตารางที่ 1.1

โดยมีการกล่าวถึงรากฟันเทียมโลหะของทองคำ ตะกั่ว อิริเดียม แทนทาลัม เหล็กกล้าไร้สนิม และโลหะผสมโคบอลต์ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 ระหว่างสองช่วงเวลานี้ โพลีเมอร์หลายชนิด รวมถึงโพลีเอทิลีน น้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ โพลีเอไมด์ โพลีเมทิลเมทาคริเลตเรซิน โพลีเอทรีนฟลูออโรเอทิลีน และโพลีเอทิลีน ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปลูกฝัง ในยุคปัจจุบัน เนื่องจากการวิจัยอย่างกว้างขวางและความก้าวหน้าในด้านวัสดุชีวภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ¹ห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีอยู่สำหรับวัสดุปลูกฝัง วัสดุที่ใหม่กว่าจึงเกิดขึ้น เช่น เซอร์โคเนีย ร็อกโซลิด รากฟันเทียมไทเทเนียม ดัดแปลงพื้นผิว วัสดุเหล่านี้ไม่เพียงแต่ตอบสนองความต้องการในการใช้งานเท่านั้น แต่ยังสวยงามอีกด้วย [6] โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่วัสดุปลูกฝังประเภทโลหะ

ตารางที่ 1.1 วัสดุปลูกถ่ายสามารถจำแนกได้ตามประเภทของวัสดุที่ใช้และการตอบสนองทางชีววิทยาที่พวกมันกระตุ้นเมื่อทำการปลูกฝัง

การตอบสนองทางชีววิทยา	องค์ประกอบทางเคมี		
	โลหะ	เซรามิกซ์	โพลีเมอร์
ทนทานทางชีวภาพ	Gold Co-Cr alloys Stainless steel Niobium Tantalum		Polyethylene Polyamide Polymethylmethacrylate Polytetrafluoroethylene Polyurethane
ความเฉื่อยทางชีวภาพ	Commercially pure titanium Titanium alloy (Ti-6AL-4U)	Al oxide Zirconium oxide	
ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ		Hydroxyapatite Tricalcium phosphate Bio glass Carbon-silicon	

วัสดุปลูกฝังในงานวิจัยนี้เราจะมุ่งเน้นไปที่วัสดุปลูกฝังโลหะ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เป็นอสเทนไนต์โครเมียม-นิกเกิลชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ เช่น การผลิตเคมี การผลิตเรือกลไฟ สลักเกลียวอุณหภูมิสูง และนิวเคลียร์ เครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากความต้านทานที่ดีเยี่ยมต่อการกัดกร่อนทั่วไป การกัดกร่อนของน้ำทะเล และการกัดกร่อนตามขอบเกรน คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงเพียงพอความสามารถเส้นใยที่ดีและความสามารถในการเชื่อม [7,8]

นอกจากนี้ทีมวิจัยได้ศึกษาต่อว่า เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SAE 316L ซึ่งบางครั้งเรียกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม A4 หรือเหล็กกล้าไร้สนิมเกรดมาริน เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนไนติกที่พบมากที่สุดเป็นอันดับสองรองจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 หรือ A2 องค์ประกอบการผสมหลักหลังเหล็ก ได้แก่ โครเมียม (ระหว่าง 16–18%) นิกเกิล (10–12%) และโมลิบดีนัม (2–3%) โดยมีปริมาณซิลิคอน ฟอสฟอรัส และกำมะถันเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 1%) การเติมโมลิบดีนัมให้ความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ในแง่ของการกัดกร่อนเฉพาะที่โดยคลอไรด์ และการกัดกร่อนทั่วไปโดยการลดกรด เช่น กรดซัลฟิวริก [9] เกรด 316L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 รุ่นคาร์บอนต่ำ เมื่อทำงานเย็น เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 สามารถผลิตผลผลิตและความต้านทานแรงดึงสูงได้ใกล้เคียงกับเกรดสแตนเลสดูเพล็กซ์

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการนำวัสดุปลูกฝังประเภทโลหะ เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L มาใช้ทำการมาร์คด้วยเลเซอร์ลงบนพื้นผิวซึ่งจะทำให้เกิดออกไซด์ชนิดต่าง ๆ บนพื้นผิว จึงอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายของผู้ป่วยได้ โดยผลของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เพื่อให้ผู้ที่ได้ทำการปลูกฝังวัสดุปลูกฝังในร่างกายนั้น ได้มีความมั่นใจอีกทั้งยังตระหนักถึงความอันตราย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาผลกระทบและความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการมาร์คด้วยเลเซอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดและเหมาะสมกับสภาวะภายในร่างกายมนุษย์ ให้เกิดความปลอดภัยและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยไม่ก่อให้เกิดพิษต่อร่างกายผู้ใช้งาน

2. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรของกระบวนการทำการมาร์คด้วยเลเซอร์ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าการแสดงผลของสี ความขรุขระ ออกไซด์ และพฤติกรรมการกัดกร่อน ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

3. ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ดีที่สุดของกระบวนการทำการมาร์คด้วยเลเซอร์ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของการใช้โลหะปลูกฝังในร่างกายของผู้ป่วย

1.3 ขอบเขตของปริญญาพันธ

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

2. ตัวแปรที่ควบคุมในกระบวนการทำการมาร์คด้วยเลเซอร์ คือ ความเร็ว ค่าพลังงาน และค่าความถี่

3. การทดสอบค่าสีบนพื้นผิว ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ (Image processing) ในการตรวจสอบ และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวัดค่าสีคือโปรแกรม Image J โดยเราจะศึกษาที่ระบบสี CIE [4]
4. การทดสอบความขรุขระบนพื้นผิว ใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล
5. การทดสอบองค์ประกอบของออกไซด์ใช้เทคนิคเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
6. การทดสอบการหลุดของไอออน ใช้เทคนิคการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (OCP)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบผลกระทบและความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการมาร์คด้วยเลเซอร์ เพื่อวิเคราะห์ความอันตรายที่เกิดขึ้น
2. สามารถนำไปใช้ในการแนะนำค่าตัวแปรที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อผู้ป่วยที่ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ในการปลูกฝังในร่างกาย
3. ทำให้อายุการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิม 316L มีอายุการใช้งานมากขึ้น

1.5 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินโครงการวิจัยนี้มีระยะเวลาในการดำเนินงาน โดยเริ่มจากเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2565 และจะสิ้นสุดในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2566 ซึ่งมีรายละเอียด และขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังแผนการดำเนินงานจะเรียงตามลำดับขั้นตอนที่แสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานของโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานของ โครงการ	พ.ศ. 2565					พ.ศ. 2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาและระบุหัวข้องานวิจัย ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต และ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ										
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
3. ออกแบบการทดลองใน การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ สำคัญของการมาร์กด้วยเลเซอร์ ลงบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L										
4. เตรียมชิ้นงานสำหรับการ ทดลอง										
5. นำชิ้นงานที่ไปทำการทดสอบ ค่าสี และค่าความขรุขระของ พื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L										
6. วิเคราะห์ผลของค่าสีและค่า ความขรุขระ										
7. ทดสอบชนิดของออกไซด์ที่ เกิดขึ้นบนพื้นผิวและทดสอบการ กัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L พร้อมสรุปผล										
8. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ทำใน รูปแบบเชิงสถิติและจัดทำเล่ม ปริญญาานิพนธ์										

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการมาร์กด้วยเลเซอร์ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L โดยการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาจากรายละเอียดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการทำงานของเครื่องมาร์กด้วยเลเซอร์ ยี่ห้อ Keyence รุ่น MD-X series ประเภท 3-Axis hybrid laser marker คุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L และเทคนิคที่ใช้ช่วยในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้น ได้แก่ ค่าสี ค่าความขรุขระที่ผิว องค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์ที่เกิดขึ้น และพฤติกรรมการกัดกร่อน หลังจากถูกทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ โดยมีหัวข้อและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเลเซอร์
- 2.2 วัสดุปลูกฝังทางการแพทย์
- 2.3 กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล (Laser scanning microscope)
- 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสีและมาตรฐานการวัดค่าสี
- 2.5 การวัดค่าความขรุขระบนพื้นผิว
- 2.6 ออกไซด์บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม
- 2.7 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
- 2.8 การทดสอบการกัดกร่อน

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเลเซอร์

เลเซอร์ (Light amplification by stimulated emission of radiation) [10] ในทางฟิสิกส์ คือ อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดลำแสง ที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่รวมกันระหว่างกลศาสตร์ควอนตัมกับอุณหพลศาสตร์ ซึ่งพลังงานแสงเลเซอร์ สามารถมีคุณสมบัติได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ เลเซอร์ส่วนมากจะเป็นลำแสงที่มีขนาดเล็ก มีการเบี่ยงเบนน้อย (Low-divergence beam) และสามารถระบุความยาวคลื่นได้ง่าย โดยดูจากสีของเลเซอร์ ถ้าอยู่ในสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible spectrum) ซึ่งเลเซอร์นี้อาจกล่าวได้ว่า เป็นการรวมพลังงานแสงที่ส่งออกมาจากหลายความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน เลเซอร์ จะหมายรวมไปถึงการให้พลังงานผ่านทางสื่อนำแสง ซึ่งสื่อนำแสงอาจเป็นได้ทั้งของแข็งของเหลว ก๊าซ หรืออิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติสามารถนำแสงได้ ในรูปแบบที่ง่ายที่สุด ออปติคัลคาวิตี (Optical cavity) จะประกอบไปด้วยกระจก 2 ชิ้น ที่จะจัดเรียงแสงเข้าด้วยกันครั้งแล้วครั้งเล่า โดยที่แต่ละครั้งจะผ่านสื่อนำแสง โดนหนึ่งในกระจกนั้น (Output coupler) จะส่งลำแสงออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำแสงเลเซอร์ ที่ผ่านทางสื่อนำแสงจะมีความยาวคลื่นเฉพาะ และมีพลังงานเพิ่ม ซึ่งกระจกนี้จะพยายามทำให้แสงส่วนมาก สามารถผ่านทางสื่อนำแสงให้ได้ และออกมาเป็นลำแสงเลเซอร์ กระบวนการเหนี่ยวนำลำแสงเพื่อเพิ่มพลังงานนี้ จะใช้พลังงานไฟฟ้าหรือแสงในหลายความยาวคลื่น ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้ง ความยาวคลื่นของแสงในแต่ละความยาวคลื่น จะส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติ รูปร่าง และความยาวคลื่นของลำแสงเลเซอร์ที่สร้างออกมา

การค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเลเซอร์ เกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อเดือนพฤษภาคม ปี 1960 โดย ทีโอดอร์ ไมแมน (Theodore maiman) ที่สถาบันวิจัย ฮิวจ์ (Hughes research laboratories) ทุกวันนี้เลเซอร์กลายเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้หลายพันล้านดอลลาร์ ผลผลิตจากงานวิจัยเลเซอร์ และกลายเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย มีให้เห็นอย่างเช่น แผ่นดีวีดี แผ่นซีดี เครื่องเล่นดีวีดี เครื่องอ่านบาร์โค้ด อุปกรณ์ตัดโลหะด้วยเลเซอร์ ฯลฯ จะเห็นได้ว่าเลเซอร์มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นด้านวิทยาศาสตร์ ด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ หรือแม้กระทั่งด้านการทหาร เพราะว่าเลเซอร์สามารถควบคุมความยาวคลื่นตามที่ต้องการได้

2.1.1 คุณสมบัติของเลเซอร์

1. มีทิศทางเดียวที่แน่นอน (Directionality) ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกล ๆ ไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกล ๆ

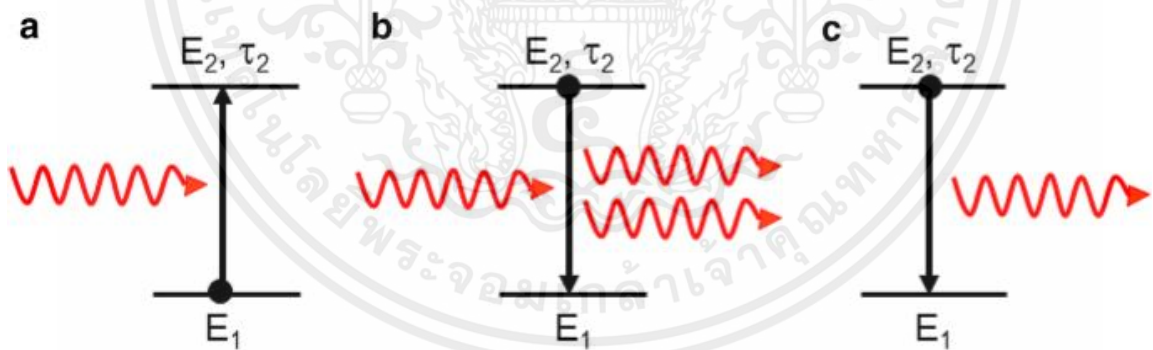
2. เป็นแสงเอกรงค์ (Monochromaticity) แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว แหล่งกำเนิดแสงที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้า และ ดวงอาทิตย์จะเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึม จะเห็นแถบสีต่าง ๆ เรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่า แถบสเปกตรัมของแสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เมื่อให้แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านปริซึม จะไม่มีการแยกเป็นหลายเส้นแต่ยังคงมีเพียง 1 เส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

3. มีความเจิดจ้า (Brightness) แสงเลเซอร์มีลักษณะโดดเด่นไม่ซ้ำแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นในเชิงความเข้มสูง และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุ ก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น(Laser speckle) โดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความหยาบหรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่อย่าง random ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาค หรือผิวของวัตถุ และเกิดการแทรกสอดของลำแสง ทำให้เกิดความระยิบระยับขึ้นจึงเป็นมิติของการมองเห็นโดยใช้ Laser displays แสงเลเซอร์กำลังต่ำ ๆ เช่น เลเซอร์ ฮีเลียม-นีออน ขนาด 1 มิลลิวัตต์ ก็มีความเข้มสูงกว่าแสงพระอาทิตย์ ฉะนั้นถ้าฉายเข้าตามนุษย์โดยตรงแล้ว จะเป็นอันตรายต่อนัยน์ตาถึงตาบอดได้

4. มีความเป็นอาพันธ์ (Coherence) หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟส และความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน หรือเป็น random แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนต์ (Incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียวทุก ๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ (Coherence light) [10]

2.1.2 การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated emission)

ระบบอะตอม หรือโมเลกุล ที่ใช้ทำเลเซอร์จะมีชั้นพลังงานต่าง ๆ อยู่โดยที่ชั้นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแสงเลเซอร์อยู่ 2 ชั้นพลังงาน โดยปกติอะตอม หรือโมเลกุลจะอยู่ที่ชั้นพลังงานต่ำ (E_1) เสมอ เพราะมีเสถียรภาพกว่า เมื่อมีการป้อนพลังงานให้แก่ระบบอะตอม หรือโมเลกุล เช่น การฉายแสงที่มีพลังงาน ที่พอดีกับผลต่างระหว่างชั้นพลังงานทั้งสอง ($E_2 - E_1$) อะตอม และโมเลกุล จะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่ชั้นพลังงานที่สูงกว่า (E_2) ปรากฏการณ์เช่นนี้คือ การดูดกลืนแสง (Absorption) เมื่ออะตอม หรือโมเลกุลมีพลังงานสูงขึ้น เนื่องจากการดูดกลืนแสงแล้ว จะคงสภาพเช่นนั้นได้ด้วยระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น เพราะสถานะที่พลังงานสูง (E_2) นี้ไม่เสถียร เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง อะตอม และโมเลกุลเหล่านั้น ก็จะตกกลับมาอยู่ที่ชั้นพลังงานต่ำ (E_1) ตามเดิม โดยคายพลังงานออกมาเท่ากับผลต่างระหว่างชั้นพลังงานทั้งสอง ($E_2 - E_1$) หรือเปล่งแสงกลับออกมานั่นเอง การเปล่งแสงเช่นนี้เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติของอะตอม และโมเลกุลนั้น ๆ จึงเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า การเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous emission) แต่การเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated emission) ซึ่งเป็นกลไกหลักของเลเซอร์นั้น เริ่มต้นจากการดูดกลืนแสง เพื่อให้อะตอม หรือโมเลกุล ขึ้นไปอยู่ที่ชั้นพลังงานสูงเช่นกัน แทนที่จะให้อะตอมหรือโมเลกุลตกลงมาเอง เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการฉายแสงเข้าไปในระบบอะตอม หรือโมเลกุล ที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของชั้นพลังงานทั้งสอง ($E_2 - E_1$) แต่แสงที่ฉายเข้าไปนี้ไม่ถูกดูดกลืนโดยระบบฯ แสงนี้เร้าให้อะตอมหรือโมเลกุลคายพลังงานก่อนเวลา แสงที่เปล่งออกมากับแสงที่เร้าจึงออกมาจากระบบพร้อมกันมีพลังงานเท่ากัน และมีความพร้อมเพรียงกันทั้งทิศทางการเคลื่อนที่และเฟสของคลื่นแสง [11]



รูปที่ 2.1 การเปล่งแสงแบบถูกเร้า

2.1.3 การขยายสัญญาณแสง (Light amplification)

การขยายสัญญาณแสง คือการทำให้สัญญาณแสงขยายขึ้นหรือเพิ่มปริมาณของแสง ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เลนส์ขยาย หรือเครื่องขยายสัญญาณแสง ซึ่งจะมีการใช้งานในหลายๆ อุปกรณ์ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป โฟกัส หรืออุปกรณ์แสงสว่าง เพื่อเพิ่มปริมาณของแสงที่จะถูกโฟกัสหรือแสดงออกมา โดยการขยายสัญญาณแสงนั้นมีประโยชน์ต่อการถ่ายรูปที่มีแสงน้อย หรือการใช้แสงในงานโปรเจกเทคนิค เป็นต้น

2.1.4 การเพิ่มจำนวนโฟตอน (Photon amplification)

คือการเพิ่มปริมาณของโฟตอน (Photon) ซึ่งเป็นสัญญาณแสงขนาดเล็กที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งโฟตอนนั้นสามารถเพิ่มปริมาณได้ด้วยการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องขยายโฟตอน (Photon amplifier) หรือเครื่องขยายสัญญาณโฟตอน (Photon detector) ซึ่งมักจะใช้ในการวัดค่าพลังงานของโฟตอน หรือในการใช้งานในงานวิทยาศาสตร์ทางอุดมคติ เช่น ในการวิจัยเกี่ยวกับของแข็งซับซ้อน หรือในการวิจัยเกี่ยวกับการเข้าถึงข้อมูลด้วยโฟตอน เลเซอร์ (Laser) คืออุปกรณ์ที่ใช้สร้างสัญญาณแสงขนาดเล็ก ซึ่งมีความแน่นสัมพันธ์ระหว่างกันและมีความแข็งแรงมาก [12] ซึ่งจะมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. อาร์กอน (Argon) หรืออนุภาคอื่น ๆ ช่วยสร้างความร้อนในเลเซอร์เพื่อทำให้เกิดการกระจายสัญญาณแสง
2. โมดูเลเตอร์ (Modulator) ช่วยเพิ่มหรือลดความแรงของสัญญาณแสง
3. กระจกส่งสัญญาณ (Output coupler) ช่วยส่งสัญญาณแสงออกมา
4. เลนส์ขยาย (Amplifying lens) ช่วยขยายสัญญาณแสง

2.1.5 คุณสมบัติโคฮีเร้นท์ของแสงเลเซอร์

โคฮีเร้นท์คือคุณสมบัติของแสงที่สามารถเปลี่ยนทิศทางของความเข้มของสีของแสงได้ ซึ่งนิยมใช้ในการสร้างกล้องถ่ายภาพอัจฉริยะ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการควบคุมความเข้มของแสง

การทำงานของโคฮีเร้นท์นั้นจะเริ่มต้นจากการส่งแสงผ่านกระจกที่มีขนาดต่าง ๆ มายังชุดกระจกตัดแสงที่เรียกว่าชุดโคฮีเร้นท์ ซึ่งชุดกระจกนี้ประกอบด้วยกระจกสองชั้น กระจกแบบแผ่นแบบรองรับกระจกแบบตัดแสง กระจกแบบแผ่นแบบหลังคา ซึ่งกระจกแบบหลังคาจะอยู่ข้างหลังชุดกระจกตัดแสง และมีหน้าที่เป็นกระจกที่สามารถเปลี่ยนความหนาของกระจกได้ จากนั้นจะมีกระจกตัดแสงอีกชั้นหนึ่งที่เป็นกระจกซ้อนกันอยู่บนกระจกแบบรองรับกระจกแบบตัดแสง ซึ่งกระจกนี้จะมีหน้าที่เป็นกระจกที่สามารถเปลี่ยนทิศทางของแสงได้ จากนั้นแสงจะถูกส่งผ่านกระจกแบบรองรับกระจกแบบตัดแสงและกระจกแบบหลังคา และจะถูกส่งผ่านจากนั้นไปยังอุปกรณ์ต่อพอร์ท ซึ่งจะมีการปรับ วัดความเข้มของแสงที่ได้รับ ซึ่งจะมีการใช้วงจรรอเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์อื่น ๆ เพื่อควบคุมการเปลี่ยนความหนาของกระจกแบบหลังคา ซึ่งการปรับกระจกนี้จะทำให้สามารถเปลี่ยนทิศทางของแสงได้ จากนั้นแสงจะถูกส่งผ่านอีกครั้งผ่านกระจกแบบรองรับกระจกแบบตัดแสงและกระจกแบบหลังคา และจะถูกส่งผ่านออกจากชุดโคฮีเร้นท์ ซึ่งจะมีการเปลี่ยนทิศทางของแสงตามที่ต้องการ [13]

มีการใช้โคฮีเร้นท์ในหลากหลายงาน เช่น การสร้างกล้องถ่ายภาพอัจฉริยะ การสร้างอุปกรณ์ที่มีการควบคุมความเข้มของแสงเช่น โคมไฟ หรืออุปกรณ์ที่ต้องการใช้การเปลี่ยนทิศทางของแสงเช่น การสร้างโปรเจคเตอร์ การสร้างสติกเกอร์อัจฉริยะ หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการใช้การเปลี่ยนทิศทางของแสง

โคฮีเร้นท์นั้นยังมีการใช้ในการวิจัยเช่น การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสง การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยน แปลงของความยาวคลื่นของแสง หรือการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของความสูงของความหนาของกระจก ซึ่งนอกจากนี้โคฮีเร้นท์ยังมีการใช้ในการวิจัยอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงในขณะที่มีการเคลื่อนไหว หรือการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ฯลฯ

นอกจากนี้โคฮีเร้นท์ยังเป็นอุปกรณ์ที่มีปริมาณการใช้งานสูงในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการผลิตสื่อสาร อุตสาหกรรมการผลิตสินค้าของแบรนด์ หรือ อุตสาหกรรมการผลิตสินค้าอื่น ๆ ที่ต้องการใช้การเปลี่ยนทิศทางของแสงในการผลิตสินค้า เช่น การผลิตสินค้าที่มีการพิมพ์ด้วยแสง หรือการผลิตสินค้าที่มีการเปลี่ยนสีด้วยแสง ฯลฯ

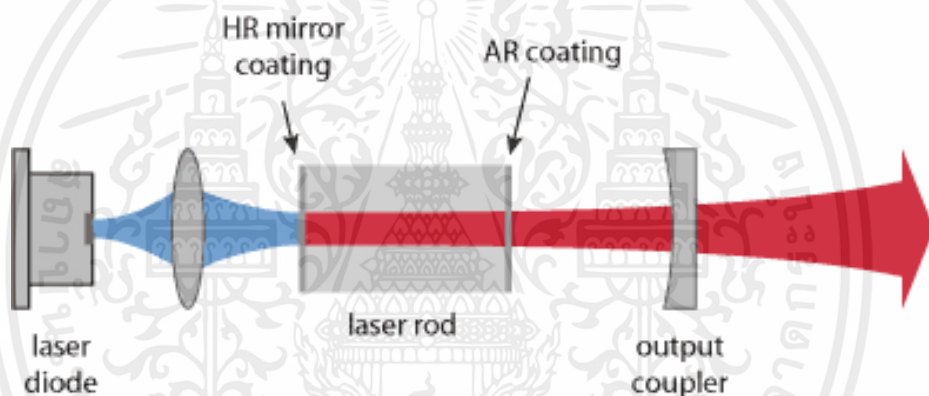
อย่างไรก็ตาม โคฮีเร้นท์มีการใช้งานในหลากหลายงาน และมีปริมาณการใช้งานสูง ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมอย่างมาก เพราะมีการใช้แสงแบบมาตรฐานในการผลิตสินค้า ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมอย่างมาก เพราะการใช้แสงในการผลิตสินค้านั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสง ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ดังนั้น การใช้โคฮีเร้นท์ควรมีการควบคุมอย่างเข้มงวดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมอย่างมากขึ้น และการใช้โคฮีเร้นท์ควรมีการวางแผนอย่างละเอียด เพื่อให้สามารถปรับปรุงการใช้งานของโคฮีเร้นท์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้อย่างประหยัดพลังงาน เพื่อลดการก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม โคฮีเร้นท์มีประโยชน์มากมาย ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และช่วยลดการใช้พลังงานในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ และก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมในระดับต่าง ๆ อย่างมาก ดังนั้น การใช้โคฮีเร้นท์ควรมีการวางแผนอย่างละเอียด และมีการควบคุมอย่างเข้มงวด เพื่อให้สามารถปรับปรุงการใช้งานของโคฮีเร้นท์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้อย่างประหยัดพลังงาน เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการใช้โคฮีเร้นท์ นอกจากนี้ โคฮีเร้นท์ยังสามารถใช้ในการวิจัยอื่น ๆ เช่น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงในขณะที่มีการเคลื่อนไหว หรือการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ฯลฯ ดังนั้น การใช้โคฮีเร้นท์ในการวิจัยนั้นยังมีประโยชน์มากมาย ซึ่งสามารถช่วยให้เราได้รับข้อมูลและความรู้เพิ่มขึ้น เพื่อช่วยให้เราสามารถปรับปรุงการใช้งานโคฮีเร้นท์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และช่วยลดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้โคฮีเร้นท์อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม หรือการใช้พลังงานเกินกำหนด ฯลฯ ดังนั้น การใช้โคฮีเร้นท์ในการวิจัยนั้นยังมีประโยชน์มากมาย และสามารถช่วยให้เราได้รับข้อมูลและความรู้เพิ่มขึ้น เพื่อช่วยให้เราสามารถปรับปรุงการใช้งานโคฮีเร้นท์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และช่วยลดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้โคฮีเร้นท์ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม หรือการใช้พลังงานเกินกำหนด ฯลฯ นอกจากนี้ โคฮีเร้นท์ยังสามารถใช้ในการวิจัยอื่น ๆ เช่น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงในขณะที่มีการเคลื่อนไหว หรือการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ฯลฯ ดังนั้น การใช้โคฮีเร้นท์ในการวิจัยนั้นยังมีประโยชน์มากมาย และสามารถช่วยให้เราได้รับข้อมูลและความรู้เพิ่มขึ้น เพื่อช่วยให้เราสามารถปรับปรุงการใช้งานโคฮีเร้นท์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และช่วยลดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้โคฮีเร้นท์ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม หรือการใช้พลังงานเกินกำหนด ฯลฯ นอกจากนี้ โคฮีเร้นท์ยังสามารถใช้ในการวิจัยอื่น ๆ เช่น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงในขณะที่มีการเคลื่อนไหว หรือการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของแสงใน

ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ฯลฯ ดังนั้น การใช้โคฮีเร้นท์ในการวิจัยนั้นยังมีประโยชน์มากมาย และสามารถช่วยให้เราได้รับข้อมูลและความรู้เพิ่มขึ้น เพื่อช่วยให้เราสามารถปรับปรุงการใช้งานโคฮีเร้นท์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และช่วยลดปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้โคฮีเร้นท์

2.1.6 ชนิดของเลเซอร์

2.1.6.1 เลเซอร์ของแข็ง (Solid-state laser)

เลเซอร์โซลิตสเตรตคือเลเซอร์ประเภทหนึ่งที่ใช้วัสดุที่เป็นของแข็งเป็นตัวกลางขยายหรือตัวกลางที่ขยายลำแสงเลเซอร์ วัสดุที่เป็นของแข็งอาจเป็นคริสตัล แก้ว หรือสารกึ่งตัวนำ และการขยายของลำแสงเลเซอร์เกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกปั๊มด้วยพลังงาน โดยปกติจะอยู่ในรูปของแสงหรือกระแสไฟฟ้า เลเซอร์โซลิตสเตรตมักถูกนำไปใช้งานที่หลากหลาย รวมถึงกระบวนการแปรรูปวัสดุ การวิจัยทางวิทยาศาสตร์ และกระบวนการทางการแพทย์ พวกเขาเป็นที่รู้จักในด้านประสิทธิภาพสูงและการบำรุงรักษาต่ำ เช่นเดียวกับความสามารถในการทำงานที่ความยาวคลื่นและระยะเวลาพัลส์ที่หลากหลาย



รูปที่ 2.2 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์ของแข็ง (Solid-state laser)

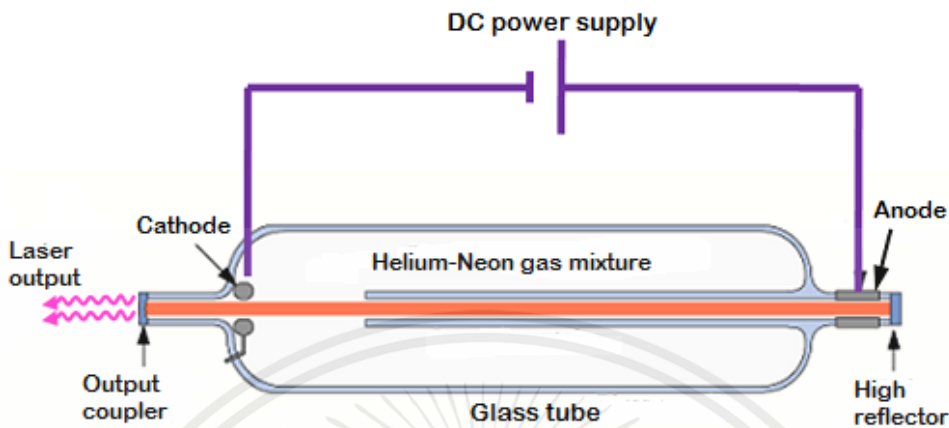
2.1.6.2 เลเซอร์แก๊ส (Gas laser)

เลเซอร์แก๊ส หรือที่เรียกว่าเลเซอร์ปล่อยแก๊ส เป็นเลเซอร์ประเภทหนึ่งที่ใช้แก๊สเป็นตัวกลางที่ทำงานอยู่ แทนที่จะเป็นของแข็งหรือของเหลว แก๊สมักจะเป็นส่วนผสมของแก๊สหลายชนิด เช่น ฮีเลียมนีออน หรืออาร์กอน และวัสดุผสมจำพวกอาร์กอนเล็กน้อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์หรือ CO_2

การทำงานพื้นฐานของเลเซอร์แก๊สนั้นคล้ายกับการทำงานของหลอดปล่อยแก๊ส เช่น ป้ายไฟนีออน การปลดปล่อยไฟฟ้าแรงสูงจะถูกส่งผ่านแก๊ส ซึ่งกระตุ้นอะตอมของวัสดุที่ติดกาวและทำให้เปล่งแสงออกมา อย่างไรก็ตาม ไม่เหมือนกับหลอดปล่อยแก๊สตรงที่แสงที่ปล่อยออกมาจากเลเซอร์แก๊สจะมีลักษณะใกล้เคียงกันสูงหรือโฟกัสไปที่ลำแสง ซึ่งทำให้มีประโยชน์สำหรับการใช้งานที่หลากหลาย

เลเซอร์แก๊สใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม การวิจัย และการแพทย์ การใช้งานทั่วไปบางส่วน ได้แก่ การตัดและเชื่อมโลหะ การวัดระยะ และการผ่าตัด พวกเขายังใช้ในการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ เช่น สเปกโทรสโกปีและการทำความเย็นด้วยเลเซอร์

เลเซอร์ก๊าซมีหลายประเภท ได้แก่ เลเซอร์ CO₂ เลเซอร์ Excimer เลเซอร์ฮีเลียมนีออน และเลเซอร์อาร์กอน ซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะของตัวเองและเหมาะสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์แก๊ส (Gas laser)

2.1.6.3 เลเซอร์ของเหลว (Liquid laser)

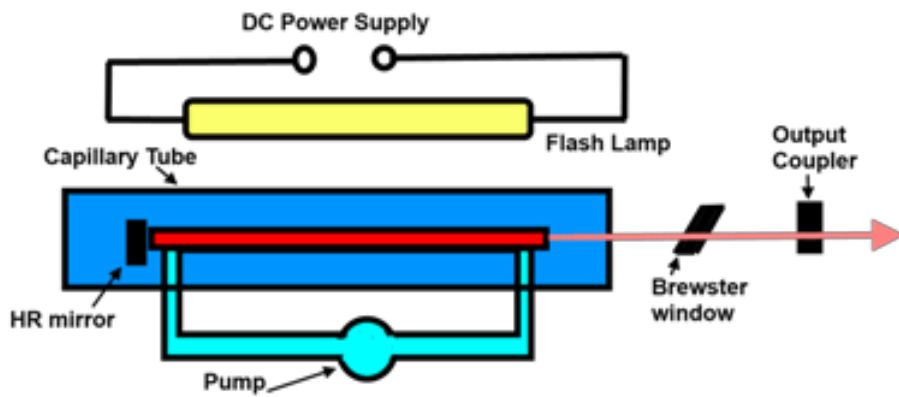
เลเซอร์ของเหลว หรือที่เรียกว่าเลเซอร์สถานะของเหลวเป็นเลเซอร์ประเภทหนึ่งที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลางที่ทำงานอยู่ แทนที่จะเป็นของแข็งหรือก๊าซ โดยทั่วไปแล้วตัวกลางที่เป็นของเหลวจะเป็นสารละลายของสีย้อมในตัวทำละลาย แม้ว่าในบางกรณีก็สามารถใช้ผลึกเหลวได้เช่นกัน

หลักการพื้นฐานของการทำงานของเลเซอร์เหลวนั้นคล้ายกับเลเซอร์ประเภทอื่น ๆ ของเหลวถูกกระตุ้นโดยแหล่งพลังงานภายนอก เช่น แสงแฟลชหรือเลเซอร์อื่น ซึ่งทำให้โมเลกุลของสีย้อมเปล่งแสงออกมาอย่างไรก็ตาม ไม่เหมือนกับเลเซอร์ประเภทอื่นตรงที่ตัวกลางที่เป็นของเหลวของเลเซอร์เหลวมักมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดันมากขึ้น และทำให้ยากต่อการทำให้เอาต์พุตคงที่

เลเซอร์เหลวมียหลายประเภท เช่น เลเซอร์สีย้อม เลเซอร์โททานิยมแซฟไฟร์ ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นการทำงานที่หลากหลายและมีลักษณะเฉพาะและข้อดีของมันเอง ส่วนใหญ่จะใช้ในสเปกโทรสโกปี การพิมพ์ด้วยเลเซอร์ การมาร์กด้วยเลเซอร์ และการวิจัยทางวิทยาศาสตร์

เลเซอร์สีย้อมเป็นเลเซอร์เหลวประเภทที่พบได้บ่อยที่สุด และเป็นที่ยอมรับในด้านความสามารถในการสร้างช่วงความยาวคลื่นที่หลากหลาย ตั้งแต่รังสีอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงอินฟราเรดไกล พวกเขายังเป็นที่รู้จักในด้านประสิทธิภาพสูงและเวลาผ่อนคลายที่รวดเร็ว ซึ่งทำให้มีประโยชน์สำหรับการใช้งานที่หลากหลาย เช่น การปั๊มด้วยเลเซอร์ เลเซอร์สเปกโทรสโกปี และการแสดงด้วยเลเซอร์

เป็นที่น่าสังเกตว่าการพัฒนาเลเซอร์แบบของเหลวนั้นได้รับความนิยมน้อยกว่าเลเซอร์แบบแข็งและแบบแก๊สเนื่องจากความท้าทายในด้านความเสถียร อย่างไรก็ตาม ยังคงมีการใช้งานและการวิจัยในการใช้งานเฉพาะบางอย่างอยู่



รูปที่ 2.4 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์ของเหลว (Liquid laser)

2.1.6.4 เลเซอร์ไดโอด (Diod laser)

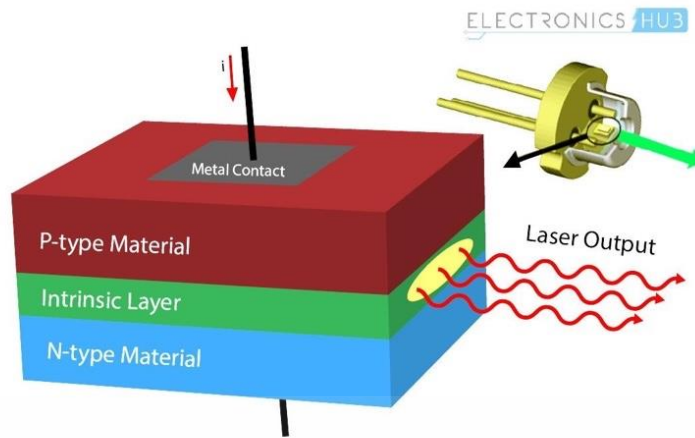
เลเซอร์ไดโอด หรือที่เรียกว่าเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ เป็นเลเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวกลางที่ทำงานอยู่ เป็นเลเซอร์ที่ตัวกลางที่ทำงานอยู่คือจุดแยก p-n ซึ่งเป็นขอบเขตระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด p และชนิด n ที่ช่วยให้ฉีดพาหะประจุเข้าไปในจุดแยก p-n และทำให้ประชากรเกิดการผกผันได้

หลักการพื้นฐานของการทำงานของไดโอดเลเซอร์นั้นคล้ายคลึงกับหลักการของไดโอดเปล่งแสง (LED) กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันอีกครั้ง ปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน อย่างไรก็ตาม โฟตอนที่ปล่อยออกมาจากเลเซอร์ไดโอดนั้นแตกต่างจาก LED ตรงที่มีความยาวคลื่นหรือสีเท่ากันทั้งหมด และอยู่ในเฟสซึ่งกันและกัน ส่งผลให้ลำแสงของแสงมีความใกล้เคียงกันหรือโฟกัสสูง

เลเซอร์ไดโอดถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการใช้งานที่หลากหลาย รวมถึงโทรคมนาคม การจัดเก็บข้อมูล และการพิมพ์ นอกจากนี้ยังใช้ในการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ การแพทย์ และการผลิตอีกด้วย เลเซอร์ไดโอดบางประเภทที่พบมากที่สุด ได้แก่ เลเซอร์เปล่งขอบ เลเซอร์ Fabry-perot และเลเซอร์เปล่งพื้นผิวในโพรงแนวตั้ง (VCSEL)

ข้อได้เปรียบหลักประการหนึ่งของเลเซอร์ไดโอดคือความกะทัดรัดและประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้มีราคาไม่แพงนักในการผลิตและประกอบเข้ากับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ง่าย นอกจากนี้ยังต้องการพลังงานน้อยกว่าเลเซอร์ประเภทอื่น ๆ และไวต่อความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อยกว่า

เป็นที่น่าสังเกตว่าเลเซอร์ไดโอดมีบทบาทสำคัญในการใช้งานจริงหลายอย่าง เช่น เครื่องเล่นดีวีดี ตัวชี้เลเซอร์และแสงเลเซอร์ การรักษาพยาบาล และกระบวนการทางอุตสาหกรรม



LASER DIODE CONSTRUCTION

รูปที่ 2.5 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์ไดโอด (Diod laser)

2.1.7 เครื่องเลเซอร์มาร์ก (Laser marking theory)

ทฤษฎีเครื่องเลเซอร์มาร์ก (Laser marking theory) เป็นทฤษฎีที่อธิบายการทำงานของเครื่องเลเซอร์มาร์ก (Laser marking) ซึ่งเป็นกระบวนการละเอียดอ่อนในการสร้างเครื่องหมายบนวัสดุต่าง ๆ โดยใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวช่วย

ในกระบวนการมาร์กด้วยเลเซอร์ แสงเลเซอร์จะถูกส่งออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง (Laser source) และผ่านผ่านเลนส์เพื่อเพิ่มความชัดเจนและความเข้มของแสง จากนั้นแสงจะถูกนำไปกระทำต่อวัสดุเป้าหมาย โดยเล็งให้ชี้ไปที่จุดที่ต้องการจะทำเครื่องหมาย การกระทำนี้จะส่งผลให้มีการตัดของวัสดุ หรือการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุ เพื่อสร้างเครื่องหมายที่ต้องการ

ทฤษฎีเครื่องเลเซอร์มาร์ก มีหลักการที่มีความเกี่ยวข้องกับการส่งการของแสงเลเซอร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นไฟฟ้าและมีความยาวคลื่นสั้น ๆ จากนั้นแสงจะมีความสามารถในการส่งผ่านและเกิดปฏิกิริยากับวัสดุเป้าหมายตามคุณสมบัติของวัสดุ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการเจือจางและการเผาผลาญภายในวัสดุ ซึ่งส่งผลให้เกิดเครื่องหมายบนวัสดุที่เคยอยู่ในอดีต การทำเครื่องหมายบนวัสดุสามารถทำได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การแกะสลักด้วยมือหรือการพิมพ์ด้วยหมึก แต่วิธีเหล่านี้มักจะไม่สามารถสร้างเครื่องหมายที่แม่นยำและสวยงามได้เท่ากับการใช้เครื่องเลเซอร์มาร์ก

เครื่องเลเซอร์มาร์กมีความแม่นยำสูงและสามารถสร้างเครื่องหมายที่คงทนและไม่หลุดหายได้ นอกจากนี้ ยังสามารถสร้างเครื่องหมายได้ที่มีความละเอียดสูงและเข้มข้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการสร้างเครื่องหมายที่มีขนาดเล็กและความละเอียดสูง เช่น ในการทำบาร์โค้ดในชิ้นส่วนของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หรือในการติดตั้งป้ายชื่อและสัญลักษณ์บนอุปกรณ์และอุปกรณ์ทางการแพทย์

นอกจากนี้ เครื่องเลเซอร์มาร์กยังสามารถทำงานได้รวดเร็ว ทำให้เป็นเครื่องมือที่สมบูรณ์แบบสำหรับการผลิตขนาดใหญ่และใช้ในการผลิตที่อยู่ในมหาวิทยาลัย โรงงาน หรือโรงพยาบาล ทำให้การผลิตมีความเร็ว

และประหยัดเวลามากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องมือที่มีความปลอดภัยสูง ไม่มีการใช้สารเคมีในการทำเครื่องหมาย และสามารถใช้กับวัสดุที่แตกต่างกันได้ เช่น โลหะ พลาสติก ไม้ หิน และแก้ว โดยไม่เสียหายต่อวัสดุ เพราะเครื่องเลเซอร์มาร์กใช้แสงเลเซอร์เพื่อทำเครื่องหมายโดยไม่ต้องสัมผัสกับวัสดุโดยตรง

อีกความสามารถหนึ่งของเครื่องเลเซอร์มาร์กคือสามารถสร้างเครื่องหมายที่มีการเขียนแบบเวกเตอร์ (Vector) ได้ ซึ่งสามารถอ่านได้ด้วยเครื่องอ่านบาร์โค้ด ทำให้เป็นเครื่องมือสำคัญในการติดตามสินค้าและการจัดการสต็อกสินค้าในธุรกิจหลายประเภท

สรุปคือ เครื่องเลเซอร์มาร์กเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สูงสำหรับการผลิตและธุรกิจต่าง ๆ โดยเฉพาะในการสร้างเครื่องหมายและป้ายชื่อสินค้า สินค้าแบรนด์ และสินค้าโปรโมชั่น เป็นต้น ทั้งนี้เครื่องเลเซอร์มาร์กยังสามารถใช้สร้างภาพสวยงามบนวัสดุเพื่อใช้ในงานศิลปะและงานด้านกราฟิกด้วยก็ได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อสร้างแบบจำลอง และตัดเนื้อหาวัดุดออกด้วยระบบ CNC ได้อีกด้วย

2.1.8 เครื่องเลเซอร์มาร์ก

เครื่องเลเซอร์มาร์กยี่ห้อ Keyence รุ่น MD-X Series ประเภท 3-Axis Hybrid Laser Marker เป็นเครื่องเลเซอร์มาร์กที่มีการออกแบบมาเพื่อใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำและความเร็วในการติดตั้งและการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อลงโค้ดหรือเลขระบบต่าง ๆ บนวัตถุ เครื่องเลเซอร์มาร์กรุ่นนี้มีการใช้เทคโนโลยี Hybrid ซึ่งเป็นการผสมผสานเทคโนโลยีการตัดและการมาร์กด้วยเลเซอร์ในเครื่องเดียวกัน มีสามแกนเพื่อให้สามารถทำงานได้ในทุกมิติ และมีฟังก์ชันการปรับแต่งให้เหมาะสมกับงานต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันการตรวจสอบและปรับปรุงตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุอัตโนมัติด้วย ทำให้การทำงานด้วยเครื่องเลเซอร์มาร์กรุ่นนี้มีความเร็วและความแม่นยำสูง และเหมาะสำหรับการใช้งานในสายอุตสาหกรรมต่าง ๆ



รูปที่ 2.6 เครื่องเลเซอร์มาร์กยี่ห้อ Keyence รุ่น MD-X Series ประเภท 3-Axis Hybrid Laser

2.2 วัสดุปลูกฝังทางการแพทย์

วัสดุทางการแพทย์เป็นวัสดุที่ใช้ในด้านการแพทย์ เช่น ในการผลิตเครื่องมือแพทย์ รากฟันเทียม และวัสดุปิดแผล รวมถึงในการก่อสร้างสถานพยาบาล วัสดุเหล่านี้ต้องเป็นไปตามเกณฑ์บางอย่าง เช่น เข้ากันได้ทางชีวภาพ ฆ่าเชื้อได้ และไม่เป็นพิษ [14] วัสดุทางการแพทย์บางประเภททั่วไป ได้แก่

1. โพลีเมอร์ สิ่งเหล่านี้ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่หลากหลาย รวมถึงการปลูกถ่าย อวัยวะเทียม และระบบนำส่งยา พอลิเมอร์สามารถขึ้นรูปเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ และสามารถออกแบบให้มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ แข็งแรง และยืดหยุ่นได้

2. โลหะ เหล็กกล้าไร้สนิม ไททาเนียม และโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมมักใช้ในการปลูกถ่ายทางการแพทย์ เช่น การเปลี่ยนข้อต่อ เช่นเดียวกับในเครื่องมือผ่าตัด วัสดุเหล่านี้มีความแข็งแรง ทนทาน สามารถฆ่าเชื้อได้

3. เซรามิกซ์ วัสดุเซรามิกซ์ เช่น อลูมินาและเซอร์โคเนีย ใช้ในการปลูกถ่ายกระดูกและฟัน รวมถึงในอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น ข้อเทียม เข้ากันได้ทางชีวภาพ แข็ง และทนต่อการสึกหรอ

4. วัสดุชีวภาพ วัสดุชีวภาพเป็นวัสดุที่ได้มาจากแหล่งธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ในทางการแพทย์ได้ ตัวอย่าง ได้แก่ คอลลาเจนและไหม ซึ่งสามารถใช้ทำแผลได้ และโคโตซาน ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุปิดแผลได้

5. ไฮโดรเจล ไฮโดรเจลเป็นโพลีเมอร์ประเภทหนึ่งที่สามารถดูดซับน้ำได้จำนวนมากและสามารถใช้ในการทำแผลและคอนแทคเลนส์ได้ พวกมันเข้ากันได้ทางชีวภาพและสามารถเลียนแบบเมทริกซ์นอกเซลล์ในร่างกายได้ ทำให้เป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการใช้งานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ

6. แก้วและเซรามิกซ์ แก้วยังใช้ในทางการแพทย์บางอย่าง เช่น การบูรณะฟัน โดสมิเตอร์เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

วัสดุทางการแพทย์เฉพาะที่จะใช้ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับการใช้งานที่ตั้งใจไว้และข้อกำหนดด้านการทำงานที่ต้องปฏิบัติตาม ในบางกรณี สามารถใช้วัสดุหลายอย่างร่วมกันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดเช่นกัน



รูปที่ 2.7 แสดงวัสดุปลูกฝังทางการแพทย์ที่ใช้ในการปลูกฝังในข้อต่อขาและแขน

2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นโลหะผสมประเภทหนึ่งที่เกิดจากการผสมเหล็กเข้ากับธาตุอื่น ๆ โดยทั่วไปคือ คาร์บอน นิกเกิล และโครเมียม การรวมกันขององค์ประกอบเหล่านี้ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติเฉพาะ เช่น มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และความสามารถในการคงลักษณะที่ปรากฏแม้เมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรง

เหล็กกล้าไร้สนิมมีหลายประเภท แต่ละประเภทมีคุณสมบัติและการใช้งานที่แตกต่างกันไป บางประเภททั่วไป ได้แก่

1. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซึ่งเป็นชนิดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและรวมถึงเหล็กกล้าไร้สนิม ซีรีส์ 300 เช่น 304 และ 316 เหล็กกล้าเหล่านี้ไม่เป็นแม่เหล็กและมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ทำให้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์แปรรูปอาหาร อุปกรณ์ทางการแพทย์ และงานสถาปัตยกรรม

2. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือมีปริมาณโครเมียมสูงและมักใช้ในยานยนต์และอุตสาหกรรม เหล็กกล้าเหล่านี้เป็นแม่เหล็กและมีความทนทานต่อการแตกร้าวจากการกัดกร่อนจากความเครียดได้ดี

3. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก ซึ่งเป็นเหล็กกล้าชนิดหนึ่งที่สามารถชุบแข็งได้โดยการอบชุบด้วยความร้อน มักใช้ในเครื่องมือตัดและมิด

4. เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ซึ่งเป็นส่วนผสมของเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกและออสเทนนิติก และมีความแข็งแรงและทนทานต่อการกัดกร่อนสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก

นอกจากความแข็งแรงและความทนทานต่อการกัดกร่อนแล้ว เหล็กกล้าไร้สนิมยังเป็นที่รู้จักในด้านความทนทานและง่ายต่อการบำรุงรักษาอีกด้วย สามารถทำความสะอาดได้ง่ายและไม่ต้องการเตรียมพื้นผิวรูปแบบอื่น ซึ่งทำให้เป็นตัวเลือกยอดนิยมสำหรับการใช้งานหลายประเภท การใช้งานทั่วไปของเหล็กกล้าไร้สนิม ได้แก่

1. การก่อสร้างอาคาร สะพาน และโครงสร้างพื้นฐาน
2. อุตสาหกรรมยานยนต์และอวกาศ
3. อุปกรณ์แปรรูปและเตรียมอาหาร
4. เครื่องมือผ่าตัดและทันตกรรม
5. เครื่องใช้ในครัวเรือน เช่น อ่างล้างจานและช้อนส้อม

2.2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ในทางการแพทย์

เครื่องมือแพทย์เหล็กกล้าไร้สนิมหมายถึงเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นหลัก เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นเหล็กกล้าชนิดหนึ่งที่มีโครเมียมอย่างน้อย 10.5% ซึ่งทำให้ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนได้สูง เครื่องมือแพทย์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมมักใช้ในการผ่าตัด ทันตกรรม และหัตถการทางการแพทย์อื่น ๆ เนื่องจากมีความคงทน ทำความสะอาดง่าย และฆ่าเชื้อได้โดยไม่เป็นสนิมหรือสึกกร่อน ตัวอย่างอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ได้แก่ เครื่องมือผ่าตัด รากฟันเทียม และ

อุปกรณ์เกี่ยวกับศัลยกรรมกระดูก [15] นอกจากความทนทานและต้านทานการเกิดสนิมและการกัดกร่อนแล้ว เหล็กกล้าไร้สนิมยังไม่เป็นพิษและเข้ากันได้ทางชีวภาพ ทำให้เป็นวัสดุที่ปลอดภัยและเหมาะสมสำหรับใช้ใน อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ต้องสัมผัสกับร่างกายมนุษย์ นอกจากนี้ อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ทำเหล็กกล้าไร้สนิม ยังมีราคาที่สูงกว่า เนื่องจากวัสดุนี้มีจำหน่ายทั่วไปและสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและขึ้นรูปเป็นรูปทรงและขนาดต่าง ๆ ได้หลากหลาย อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมยังใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา เนื่องจากทนทานต่อการกัดกร่อนและความสามารถในการฆ่าเชื้อ

ข้อได้เปรียบที่สำคัญอีกประการของอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม คือความสามารถในการฆ่าเชื้อด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การนึ่งฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ การฆ่าเชื้อด้วยแก๊ส หรือการฆ่าเชื้อด้วยสารเคมี นี้เป็นคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์เนื่องจากช่วยให้แน่ใจว่าปราศจากจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายใด ๆ ก่อนนำไปใช้กับผู้ป่วย อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและดูแลรักษาง่าย ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านการศึกษาพยาบาลเมื่อเวลาผ่านไป ข้อดีอีกประการของการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมในเครื่องมือแพทย์คือสามารถประดิษฐ์ได้ง่ายและแม่นยำโดยใช้วิธีการผลิตต่าง ๆ เช่น การหล่อ การตี การปั๊ม และการตัดเฉือน สิ่งนี้ทำให้สามารถสร้างรูปทรงและการออกแบบที่ซับซ้อนและแม่นยำ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์หลายชนิด เช่น เครื่องมือผ่าตัดและรากฟันเทียม [16]

นอกจากนี้ เหล็กกล้าไร้สนิมยังเป็นวัสดุที่ต้องบำรุงรักษาต่ำและไม่ต้องการการเคลือบพิเศษหรือการดูแลเพื่อป้องกันการกัดกร่อน พื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมยังสามารถขัดเงาให้มีความเงางามสูง ซึ่งมีประโยชน์ต่ออุปกรณ์ทางการแพทย์บางชนิด เช่น เครื่องมือทันตกรรม และรากเทียมเกี่ยวกับกระดูก

โดยสรุป เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นวัสดุที่ใช้งานได้หลากหลาย ทนทาน และปลอดภัย ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้ในอุปกรณ์ทางการแพทย์หลายประเภท ความต้านทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน ไม่เป็นพิษ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และความสามารถในการฆ่าเชื้อทำให้เป็นตัวเลือกยอดนิยมในหมู่ผู้ผลิตอุปกรณ์การแพทย์ นอกจากนี้ยังง่ายต่อการผลิต บำรุงรักษา และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

2.2.3 เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L (หรือที่เรียกว่า UNS S31603) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม 316 รุ่นที่มีคาร์บอนต่ำ เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ทนทานต่อการกัดกร่อนสูงและมีการใช้งานในอุตสาหกรรมและการแพทย์ที่หลากหลาย ตัว L ใน 316L หมายถึงปริมาณคาร์บอนต่ำ ซึ่งทำให้ไม่เกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนและการแพ้ องค์ประกอบทางเคมีหลักของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีหลักของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

องค์ประกอบทางเคมี	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	C	Cu
สัดส่วน(wt%)	66.52	17.42	12.53	2.36	0.6	0.51	0.06	0.05	0.02	0.02

โดยทั่วไปจะใช้ในอุตสาหกรรมการแพทย์และการแปรรูปอาหาร เช่นเดียวกับในสภาพแวดล้อมทางทะเล การแปรรูปทางเคมี และยา เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดนี้ยังใช้ในการสร้างเครื่องมือผ่าตัด รากฟันเทียม และอุปกรณ์ทางการแพทย์อื่น ๆ คุณสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L คือ

1. ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมในสื่อหลากหลายประเภท รวมถึงสภาพแวดล้อมที่มีคลอไรด์
2. คุณสมบัติการเชื่อมได้ดี
3. คุณสมบัติทนต่อการคืบและการแตกหักสูง
4. ขึ้นรูปได้ดี
5. คุณสมบัติแม่เหล็กต่ำ
6. ความเหนียวในการแข่งขันที่ดี

โดยสรุป เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 รุ่นอเนกประสงค์และคาร์บอนต่ำพร้อมความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น ซึ่งทำให้เป็นตัวเลือกยอดนิยมสำหรับอุตสาหกรรมการแพทย์และการแปรรูปอาหาร เช่นเดียวกับในสภาพแวดล้อมทางทะเล การแปรรูปทางเคมี และยา

2.2.4 เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ถูกใช้ในการปลูกฝังลงในร่างกายมนุษย์

เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เป็นวัสดุที่ใช้กันทั่วไปในการผลิตรากฟันเทียมทางการแพทย์หลายประเภท เนื่องจากมีความทนทานต่อการกัดกร่อน ความแข็งแรง ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และความสามารถในการประดิษฐ์เป็นรูปทรงและขนาดต่าง ๆ ได้ดีเยี่ยม โดยตัวอย่างของการปลูกถ่ายทางการแพทย์ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ได้แก่

1. รากฟันเทียมเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ใช้ทำรากฟันเทียมซึ่งใช้เพื่อรองรับฟันทดแทน ความเข้ากันได้ทางชีวภาพและความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ทำให้เหมาะสำหรับใช้ในช่องปาก
2. ศัลยกรรมกระดูกเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เช่น ข้อสะโพก ข้อเข่า รวมถึงอุปกรณ์เกี่ยวกับกระดูกสันหลัง ความแข็งแรงและทนทานต่อการกัดกร่อนทำให้เหมาะสำหรับใช้ในงานรับน้ำหนัก
3. วัสดุปลูกถ่ายหลอดเลือด เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ยังใช้ในการทำวัสดุปลูกฝังของหลอดเลือด เช่น ขดลวด ซึ่งใช้เพื่อเปิดหลอดเลือดที่อุดตันหรือตีบตัน ความเข้ากันได้ทางชีวภาพและความสามารถในการฆ่าเชื้อทำให้มันเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้ในร่างกาย
4. การปลูกถ่ายหัวใจและหลอดเลือด เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ยังใช้สำหรับการผลิตสิ่งปลูกถ่ายหัวใจและหลอดเลือด เช่น ลิ้นหัวใจและสายนำของเครื่องกระตุ้นหัวใจ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุและความสามารถในการฆ่าเชื้อทำให้เหมาะสำหรับใช้ในร่างกาย
5. ประสาทหูเทียม เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ยังใช้ในการผลิตประสาทหูเทียม ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อช่วยให้ผู้ที่สูญเสียการได้ยินอย่างรุนแรงสามารถได้ยินได้ ใช้เพราะความเข้ากันได้ทางชีวภาพและความต้านทานการกัดกร่อน

โดยสรุป เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ สำหรับการปลูกฝังวัสดุทดแทนอวัยวะทางการแพทย์ประเภทต่าง ๆ เนื่องจากมีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม ความแข็งแรง ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และความสามารถในการประดิษฐ์เป็นรูปร่างและขนาดต่าง ๆ เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับวัสดุทดแทนอวัยวะทางการแพทย์ ศัลยกรรมกระดูก หลอดเลือด หัวใจและหลอดเลือด และประสาทหูเทียม

2.3 กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล (Laser scanning microscope)

กล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลและกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์เป็นเครื่องมือสร้างภาพที่ใช้ในสาขาการวิจัยที่หลากหลาย เช่น ชีววิทยา วัสดุศาสตร์ และวิศวกรรม แม้ว่ากล้องจุลทรรศน์ทั้งสองจะใช้เลเซอร์เพื่อให้แสงสว่างแก่ตัวอย่างและสร้างภาพที่มีความละเอียดสูง แต่ก็มีความแตกต่างกันอยู่บ้างระหว่างทั้งสอง

กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล ใช้รับแสงรูเข็มเพื่อตัดแสงที่ไม่อยู่ในโฟกัสและสร้างส่วนออปติคัลของชิ้นงานที่มีความหนา ซึ่งหมายความว่า จะตรวจพบเฉพาะแสงที่มาจากระนาบโฟกัสเท่านั้น ทำให้ได้ภาพที่คมชัดและมีความละเอียดสูง กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการถ่ายภาพโครงสร้างสามมิติ เช่น เซลล์และเนื้อเยื่อ และสำหรับศึกษากระบวนการไดนามิกเมื่อเวลาผ่านไป

ในทางกลับกันกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล ใช้ลำแสงเลเซอร์ที่โฟกัสเพื่อสแกนตัวอย่างในรูปแบบแรสเตอร์ สร้างภาพแบบพิกเซลต่อพิกเซล เทคนิคนี้ทำให้ได้ภาพที่มีความละเอียดสูงมาก และมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการศึกษาคูณลักษณะขนาดเล็ก เช่น โครงสร้างเซลล์ย่อยหรืออนุภาคนาโน กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนด้วยเลเซอร์ยังมีประโยชน์สำหรับการศึกษากระบวนการทางชีววิทยาที่รวดเร็ว เช่น การเคลื่อนที่ของออร์แกเนลล์ภายในเซลล์

ท้ายที่สุด ทางเลือกระหว่างกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล จะขึ้นอยู่กับคำถามการวิจัยเฉพาะและตัวอย่างที่กำลังศึกษาอยู่ กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอลเหมาะสำหรับการถ่ายภาพตัวอย่างที่มีความหนาและศึกษากระบวนการไดนามิกเมื่อเวลาผ่านไป ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล เหมาะสำหรับการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กและกระบวนการทางชีววิทยาที่รวดเร็ว

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสีและมาตรฐานการวัดค่าสี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสีและมาตรฐานการวัดค่าสีมีหลายทฤษฎี โดยทฤษฎีที่ได้รับความนิยมสำหรับการวัดสีและการตรวจสอบมาตรฐานสีมีดังนี้

1. ทฤษฎีการสับเปลี่ยนสี (Colorimetry theory) ทฤษฎีที่ใช้ในการวัดและอธิบายสีโดยใช้ตัวแปรเชิงเลขเพื่ออธิบายลักษณะของสี เช่น ความสว่าง (Luminance) ความเข้ม (Chroma) และ Hue ซึ่งเป็นค่าเชิงมุมที่อธิบายสีว่าอยู่ในกลุ่มสีไหน

2. ทฤษฎีการเข้าใจสีของผู้ใช้ (User color perception theory) ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบาย ส่วนประกอบของการรับรู้สีโดยมนุษย์ ซึ่งมีตัวแปรสำคัญเช่น การรับรู้สีโดยตรง การรับรู้สีโดยทางตรง และการรับรู้สีโดยความคิดเห็น

3. ทฤษฎีการผสมสี (Color mixing theory) ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายวิธีการผสมสีเพื่อสร้างสีใหม่ ซึ่ง จะใช้ในการอธิบายสีของสารสนเทศดิจิทัล เช่น การสร้างสีในภาพจำลองสี (RGB) และการผสมสีด้วยการพิมพ์ (CMYK)

4. ทฤษฎีระบบสี CIE L*a*b* (CIE standard observer) ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการรับรู้สีของตาม มาตรฐาน CIE (Commission internationale de l'eclairage) เพื่อให้ผลการวัด ซึ่งในงานวิจัยนี้เราได้ศึกษา ทฤษฎีการผสมสี (Color mixing theory)

2.4.1 ระบบสี RGB

RGB ย่อมาจาก สีแดง (Red) สีเขียว (Green) สีน้ำเงิน (Blue) คือ ระบบสีของแสง เกิดจากการหักเห ของแสงกลายเป็นสีรุ้ง ด้วยกัน 7 สี ซึ่งเป็นช่วงแสงที่เราสามารถมองเห็นได้ แสงสีม่วงจะมีความถี่สูงสุดเรียกว่า อัลตราไวโอเล็ต และแสงสีแดงจะมีความถี่ต่ำสุด เรียกว่าอินฟราเรด คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าสีม่วง และต่ำกว่าสีแดงนั้น สายตาของมนุษย์ไม่สามารถรับได้ แสงสีทั้งหมดเกิดจาก แสงสี 3 สี คือ สีแดง (Red) สีน้ำเงิน (Blue) และสีเขียว (Green) ทั้งสามสีถือเป็นแม่สีของแสง [17]

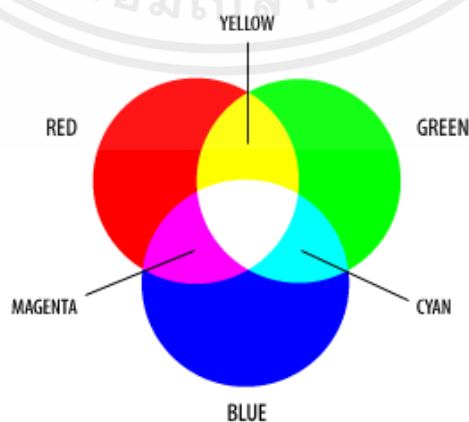
แม่สีของแสงมีด้วยกัน 3 สี คือ สีแดง (R) สีเขียว (G) สีน้ำเงิน (B) ดังรูปที่ 2.8 และแต่ละแม่สีเมื่อ รวมกันก็จะได้สีดังนี้

สีแดง+สีเขียว = สีเหลือง (Yellow)

สีเขียว+น้ำเงิน = สีฟ้า (Cyan)

สีแดง+สีน้ำเงิน = สีแดงอมชมพู (Magenta)

เมื่อนำแม่สีของแสงทั้ง 3 มาผสมกัน ในปริมาณแสงสว่างเท่า ๆ กันก็จะได้เป็นแสงที่สีขาว แต่ถ้าผสม กันระหว่างแสงระดับความสว่างต่างกัน ก็จะได้ผลที่เป็นแสงสีๆ มากมายเป็นล้านสี



รูปที่ 2.8 ระบบสี RGB

ระบบสี RGB จะการแสดงผลออกมา เป็นรูปแบบการรับแสงแสดงผลด้วยแสงที่เป็นแม่สีได้แก่ สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น จอภาพ สแกนเนอร์ กล้องดิจิทัล หรือตัวอย่างการงานที่เหมาะสมกับการใช้ระบบสี RGB เช่น ในการออกแบบเว็บไซต์ จะใช้ระบบสี RGB เพื่อให้ได้ภาพที่แสดงผลบนหน้าจอมีความสวยงามใกล้เคียงกับสีที่ตาเรามองเห็น

ส่วนในงานสิ่งพิมพ์จะนิยมใช้ระบบสี CMYK เพราะเป็นระบบสีที่ใช้กับเครื่องพิมพ์ ดังนั้นเมื่อเราต้องการพิมพ์ภาพ จึงควรตั้งค่าภาพนั้นให้เป็น ระบบสี CMYK เพราะถ้านำภาพที่เป็นระบบสี RGB ไปพิมพ์ปกติ โดยไม่มีการแปลงให้เป็นระบบสี CMYK ก่อนภาพที่ได้จะมีสีที่ผิดเพี้ยนไป [18]

2.4.2 ค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ (Contrast)

ความเปรียบต่างคือความแตกต่างของความสว่างหรือสีที่ทำให้วัตถุ หรือการแสดงผลของวัตถุในภาพหรือการแสดงผลแตกต่างออกไป [19] ในการรับรู้ทางสายตาของโลกแห่งความจริง ความเปรียบต่างถูกกำหนดโดยความแตกต่างในสีและความสว่างของวัตถุและวัตถุอื่น ๆ ในงานวิจัยนี้ เราจะศึกษาค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุออกมาในรูปแบบร้อยละดังสมการที่ 1

$$\% k^* = \frac{J_x - J_f}{J_b - J_f} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ k^* คือ ค่าความแตกต่างของความสว่างของวัตถุ (Contrast)

J_x คือ ค่าความเข้มตัวสีเทาของบริเวณที่ถูกเลเซอร์

J_f คือ ค่าความเข้มตัวสีเทาของบริเวณพื้นหลัง

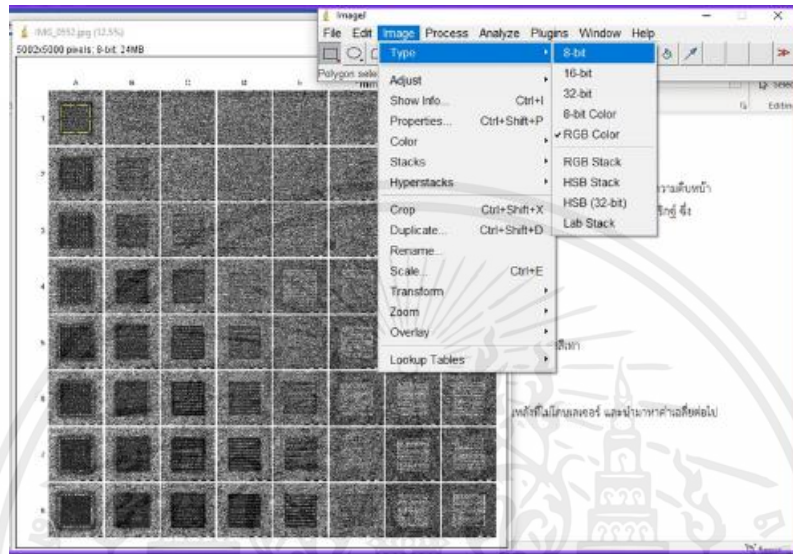
J_b คือ ค่าความเข้มตัวของสีดำ

2.4.3 โปรแกรมการวิเคราะห์ค่าสี ImageJ

โปรแกรม ImageJ เป็นโปรแกรมฟรีและเปิดเผยรหัสที่ใช้สำหรับการประมวลผลภาพและวิเคราะห์ข้อมูลทางการแพทย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำการวิเคราะห์ภาพทางเครื่องมือแพทย์ โดยโปรแกรมนี้เขียนขึ้นบน Java ซึ่งเป็นภาษาโปรแกรมที่สามารถใช้ได้หลายแพลตฟอร์ม โดย ImageJ มีความสามารถในการประมวลผลภาพที่หลากหลาย เช่น การวัดขนาดและเนื้อเยื่อในภาพ การหาความเข้มแสง การจัดการกับภาพดิจิทัลแบบหลายชั้น การทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์บนภาพ และมีการพัฒนาโปรแกรมและปลั๊กอินเพิ่มเติมจากผู้ใช้งานอีกมากมาย

เมื่อเปิดโปรแกรม ImageJ ขึ้นมาแล้ว จะมีหน้าต่างเริ่มต้นเป็นการต้อนรับผู้ใช้งาน โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้งานได้ตามต้องการ เช่น การเปิดไฟล์ภาพ (Open) การทำงานกับรูปภาพ (Edit) การวัดขนาดของภาพ (Analyze) การแสดงผลภาพ (PPlugins) การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น กล้องถ่ายภาพ (File>import) เป็นต้น

นอกจากนี้ ImageJ ยังมีเครื่องมือต่าง ๆ เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถทำงานกับภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การปรับแต่งความสว่างหรือความเข้มของภาพ (Brightness contrast) การลบพื้นหลัง (Background subtraction) การวาดเส้น (Drawing), การหาส่วนประกอบของภาพ (Image composition) การทำซ้ำ (Duplication) การกำหนด Region of Interest (ROI) เพื่อวัดขนาดและพิเศษส่วนที่สนใจ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 วิธีการใช้โปรแกรม ImageJ

2.5 การวัดค่าความขรุขระบนพื้นผิว

ทฤษฎีการวัดความขรุขระบนพื้นผิว (Surface roughness) เป็นการวัดความลาดเอียงของพื้นผิวเมื่อเทียบกับเส้นฐานหรือแนวระดับของพื้นผิวนั้น ๆ ซึ่งจะต้องนำเอาตัวเลขที่แสดงถึงความขรุขระของพื้นผิวมาใช้ในการตัดสินใจเกี่ยวกับการใช้งาน อาทิเช่น ในการคัดเลือกวัสดุสำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความเรียบเนียน หรือในการปรับแต่งการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อให้ได้ความขรุขระที่เหมาะสม [20]

ทฤษฎีการวัดความขรุขระบนพื้นผิวมีหลายวิธีการ ได้แก่ วิธีการวัดโดยใช้เครื่องวัดพื้นผิว (Surface profilometer) ซึ่งจะวัดความลาดเอียงของพื้นผิวได้ด้วยการวัดความสูงและความลึกของเส้นบนพื้นผิว และวิธีการวัดโดยใช้การซ้อนภาพ (Image overlap method) ซึ่งจะวัดความลาดเอียงของพื้นผิวด้วยการซ้อนภาพสองภาพของพื้นผิวเข้ากัน

2.5.1 ความหยาบผิว (Roughness)

ความหยาบผิว (Roughness) คือ ความส่วนต่างระหว่างความสูงและความต่ำของพื้นผิวของวัตถุซึ่งส่วนต่างนี้จะแสดงถึงความไม่สม่ำเสมอและความไม่ราบรื่นของพื้นผิว เมื่อพื้นผิวมีความหยาบขึ้น จะทำให้มีการติดต่อกันที่แน่นหนาและมีการเกิดแรงเสียดทานที่มากขึ้น[21] ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อการทำงานและอายุการใช้งานของวัตถุได้ ดังนั้นการวัดความหยาบผิวเป็นสิ่งที่สำคัญในการประเมินคุณภาพและประสิทธิภาพของวัตถุ

และมักจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ อุตสาหกรรมยานยนต์ และ อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เป็นต้น

2.5.2 เครื่องมือวัดความหยาบผิว (Roughness tester)

เครื่องมือวัดความหยาบผิว (Roughness tester) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความหยาบของพื้นผิวของวัตถุ โดยเครื่องมือประกอบด้วยส่วนประกอบหลายชิ้นที่มีหน้าที่เก็บข้อมูล และแปลงข้อมูลเป็นผลลัพธ์ที่สามารถอ่านและวิเคราะห์ได้ง่าย ส่วนที่สัมผัสกับพื้นผิวของวัตถุจะเป็นส่วนที่ไหลคล้ายค้อนที่เคลื่อนที่เชิงเส้นตรงบนพื้นผิว โดยมีระบบเซนเซอร์ที่อ่านค่าแรงดันที่เกิดขึ้นระหว่างการไหลคล้ายค้อนบนพื้นผิว เพื่อวัดความสูงและความต่ำของพื้นผิว ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดความหยาบผิวนี้จะแสดงผลในหน่วยการวัดต่าง ๆ เช่น micron, microinch ซึ่งสามารถนำไปใช้ประเมินคุณภาพและความสมบูรณ์ของวัตถุก่อนนำมาใช้งานหรือส่งออก หรือใช้วัดความหยาบของผิวของวัตถุหลังจากการผลิตเสร็จเรียบร้อยแล้วเพื่อตรวจสอบว่ามีความสมบูรณ์และคุณภาพตามมาตรฐานหรือไม่

2.5.3 หน่วยการวัดความหยาบผิว

หน่วยการวัดความหยาบผิวจะแตกต่างกันไปตามวิธีการวัด และพารามิเตอร์ที่ใช้วัด โดยที่หน่วยการวัดพื้นผิวของวัตถุจะถูกแสดงผลเป็นค่า R_a R_z R_{max} R_p R_v หรือ W_t โดยมีหน่วยเป็นไมโครเมตร โดยที่

R_a (Roughness average) คือ ค่าเฉลี่ยของความสูงและความต่ำของพื้นผิวของวัตถุภายในพื้นที่วัด

R_z (Average maximum height of the profile) คือ ค่าเฉลี่ยของความสูงของจุดสูงสุดและต่ำสุดของพื้นผิวของวัตถุภายในพื้นที่วัด

R_{max} (Maximum peak to valley height) คือ ความสูงระหว่างจุดสูงสุดและต่ำสุดของพื้นผิววัตถุภายในพื้นที่วัด

R_p (Peak height) คือ ความสูงจุดสูงสุดของพื้นผิววัตถุภายในพื้นที่วัด

R_v (Valley depth) คือ ความลึกของจุดต่ำสุดของพื้นผิววัตถุภายในพื้นที่วัด

W_t (Total height) คือ ความสูงทั้งหมดของพื้นผิววัตถุภายในพื้นที่วัด

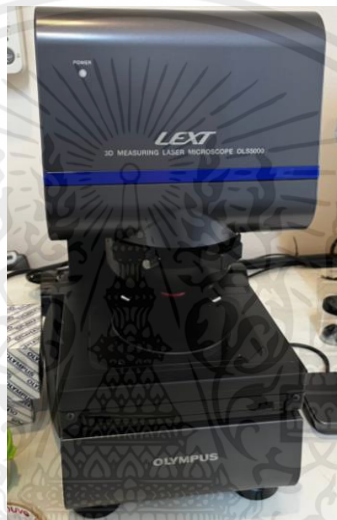
โดยในงานวิจัยนี้เราจะวิเคราะห์ค่า R_a (Roughness average) และ R_z (Average maximum height of the profile) เท่านั้น

2.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความหยาบผิว

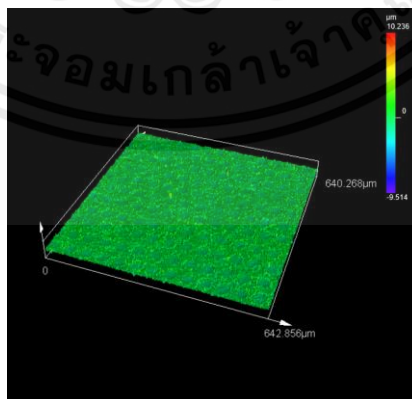
ในงานวิจัยนี้เราได้ใช้กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล ในการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L โดยมีหลักการทำงานดังนี้ กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล เป็นเทคโนโลยีการสแกนตัวอย่างที่ใช้เลเซอร์เพื่อส่องตรวจวัดผิวของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์ความหยาบผิว กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอลจะส่งเสียงรบกวนไปยังผิวตัวอย่าง และเมื่อเสียงรบกวนชนกับผิวตัวอย่าง จะมีการสะท้อนส่งกลับเข้าสู่เลนส์จุดโฟกัส

เลเซอร์จะส่งแสงไปสแกนตัวอย่าง และเซนเซอร์จะรับสัญญาณสะท้อนเพื่อสร้างภาพที่ความละเอียดสูง โดยการสร้างภาพในแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ ขึ้นอยู่กับประเภทของกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอลที่ใช้งาน

ในกระบวนการวิเคราะห์ความหยาบผิว ผลลัพธ์จะแสดงค่าความลาดเอียงของผิว โดยมีหน่วยเป็นนาโนเมตร ทำให้สามารถระบุคุณสมบัติทางพื้นผิวของตัวอย่างได้อย่างแม่นยำ ดังรูปที่ 2.11 แสดงภาพสามมิติแสดงสภาพพื้นผิวของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L รูปที่ 2.12 แสดงภาพกำลังขยาย 20 เท่าของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L จากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล และรูปที่ 2.13 แสดงการวิเคราะห์ค่าความขรุขระที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L



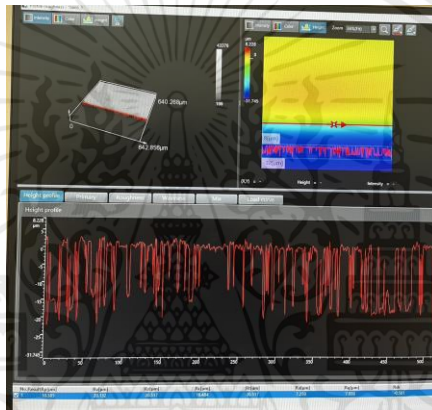
รูปที่ 2.10 กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอลยี่ห้อ Olympus รุ่น 3D Measuring laser microscope OLS 5000



รูปที่ 2.11 แสดงภาพสามมิติแสดงสภาพพื้นผิวของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L



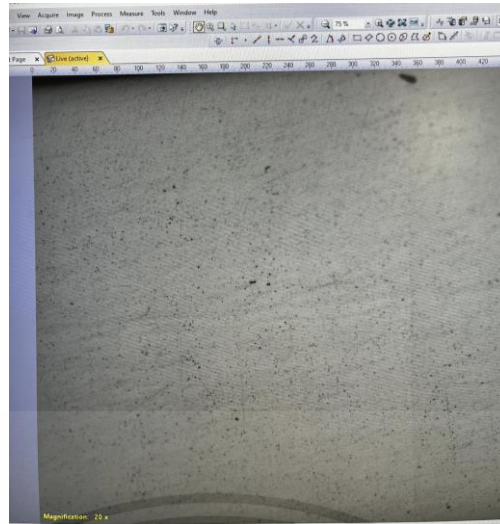
รูปที่ 2.12 แสดงภาพกำลังขยาย 20 เท่าของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L จากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล



รูปที่ 2.13 แสดงการวิเคราะห์ค่าความขรุขระที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L

2.6 ออกไซด์บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L มีการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวที่เรียกว่าออกไซด์ฟิล์ม ซึ่งเป็นชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นจากการตอบสนองของโลหะกับสารเคมีในสภาวะออกซิเดชัน (Oxidation) โดยชั้นฟิล์มออกไซด์จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนและลดการสนิมของเหล็กกล้าไร้สนิม โดยที่ออกไซด์ฟิล์มจะมีความหนาและความแข็งแรงขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขการใช้งาน ซึ่งชั้นฟิล์มออกไซด์ที่หนาและแข็งแรงมากพอจะเรียกได้ว่า ฟิล์มพาสซีฟ ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนและสนิมอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.14 แสดงถึงชั้นฟิล์มของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L



รูปที่ 2.14 แสดงพื้นผิวออกไซด์ของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะเป็นกระบวนการที่ใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อหาปริมาณและส่วนประกอบของโลหะ ซึ่งเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะคือเทคนิคสเปกโตรสโกปี และการวิเคราะห์โดยใช้รังสีเอ็กซ์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโลหะได้โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง

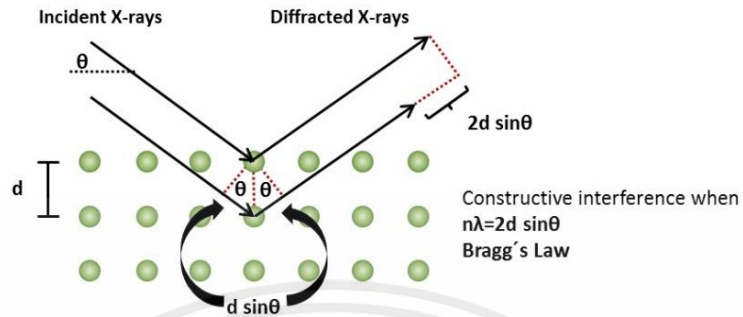
กระบวนการวิเคราะห์โดยใช้รังสีเอ็กซ์ นั้นจะใช้ความสามารถของรังสีเอ็กซ์ มีคลื่นยาวสั้นและมีพลังงานสูงเข้าสู่โครงสร้างตัวอย่าง โดยตัวอย่างจะเป็นโลหะที่ต้องการวิเคราะห์ รังสีเอ็กซ์ที่ส่งเข้าสู่ตัวอย่างจะถูกสะท้อนหรือส่งผ่านโลหะโดยเกิดการเปลี่ยนทิศทางของรังสีเอ็กซ์นั่นเอง โดยในกระบวนการนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) ในการวิเคราะห์รังสีเอ็กซ์ที่ส่งผ่านตัวอย่าง และตรวจวัดคลื่นยาวของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนหรือผ่านไปผ่านมาโดยใช้หลักการ Bragg's law ซึ่งจะช่วยในการหาค่าช่วงคลื่นยาวของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนหรือผ่านไปผ่านมาได้

2.7.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งสามารถใช้ในการวิเคราะห์การเรียงตัวของอะตอมในแบบชิ้นส่วนของวัสดุ โดยการใช้อุปกรณ์เป็นเครื่องมือในการส่งกระแสรังสีผ่านตัวอย่างวัสดุ แล้วตรวจสอบแบบเปรียบเทียบเป็นแผนภูมิและรูปร่างของการสะท้อน และการสับเปลี่ยนทิศทางของรังสีเอ็กซ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงว่าสารวัสดุนั้นมีโครงสร้างแบบใด โครงสร้างดังกล่าวสามารถอธิบายการเรียงตัวของอะตอมภายในวัสดุได้

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) มีการทำงานโดยใช้โครงสร้างซึ่งประกอบด้วยเครื่องส่งรังสีเอ็กซ์ และเครื่องรับภาพของรังสีที่ได้รับการกระจาย โดยเมื่อรังสีเอ็กซ์ถูกส่งผ่านตัวอย่างวัสดุ[22] จะมีการกระจายรังสีออกมาจากอะตอมของวัสดุและกระจายไปยังเครื่องรับภาพของรังสี ซึ่งจะถูกบันทึกเป็น

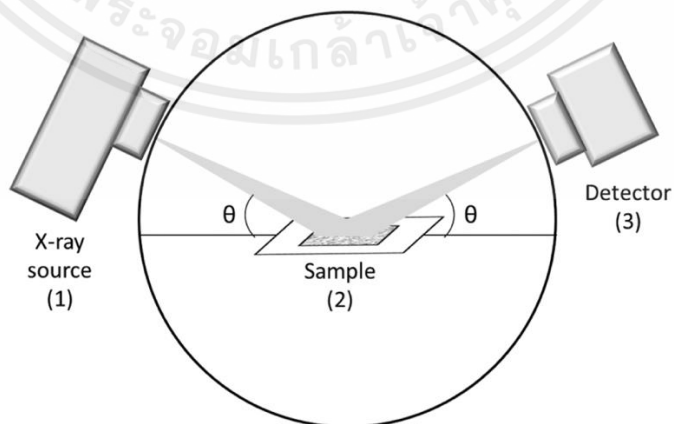
แบบเปรียบเทียบ การกระจายแบบรับภาพของรังสีจะแสดงให้เห็นว่าอะตอมของวัสดุเรียงตัวอย่างไร [23] ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงหลักการกระจายรังสีออกมาจากอะตอมของวัสดุไปยังเครื่องรับภาพของรังสี

2.7.2 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างอนุกรมของวัสดุ โดยใช้รังสีเอ็กซ์เป็นแหล่งของรังสีและวัสดุที่จะวิเคราะห์จะถูกนำมาเรียงเป็นฟอรัมคริสตัล (Crystal) เพื่อให้เกิดการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเกิดเมื่อรังสีเอ็กซ์ชนกับอะตอมในวัสดุและสะท้อนกลับออกมาในทิศทางต่าง ๆ โดยตามกฎ Bragg's law และสามารถนำไปคำนวณได้เพื่อให้ได้รูปแบบการเรียงตัวของอะตอมในวัสดุ ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างอนุกรมของวัสดุต่าง ๆ ได้ [24] ดังรูปที่ 2.16 การวัดเส้นทางการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จะใช้ตัวกรองที่มีรูขนาดต่าง ๆ โดยจะใช้รูขนาดเล็กเพื่อให้ผ่านรังสีเอ็กซ์ที่มีความถี่สูง และใช้รูขนาดใหญ่เพื่อให้ผ่านรังสีเอ็กซ์ที่มีความถี่ต่ำ โดยสัมพันธ์ระหว่างมุมของรังสีเอ็กซ์ที่เข้ามาชนกับตัวกรองและระยะห่างระหว่างรูจะเป็นตัวกำหนดในการวิเคราะห์โครงสร้างอนุกรมของวัสดุ



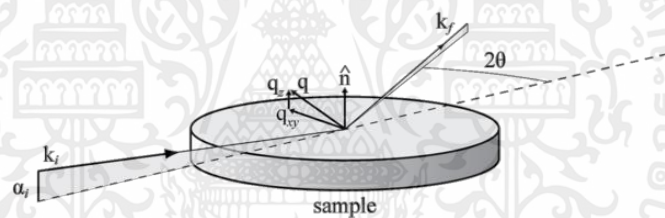
รูปที่ 2.16 แสดงหลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

2.7.3 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (Grazing-incidence x-ray diffraction; GIXRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD) เป็นเทคนิคการใช้รังสีเอ็กซ์ในการวิเคราะห์สารที่มีพื้นผิวที่ทราบค่าความสูงของเฉพาะพื้นผิวเท่านั้น ซึ่งใช้รังสีเอ็กซ์ที่มีความพิเศษเป็นเอกลักษณ์ของรังสีเอ็กซ์ ในการวิเคราะห์ข้อมูลและการแปลผล

หลักการของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD) คือการเปลี่ยนรังสีเอ็กซ์ให้มีมุมชนิด Grazing incidence angle (มุมที่มากกว่ามุมวิกฤต) โดยทำการวางรังสีเอ็กซ์มุมต่ำกว่ามุมวิกฤตให้มีการรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นบนพื้นผิวเฉพาะเท่านั้น [25] จากนั้นนำข้อมูลของแสงที่สะท้อนกลับมาไปวิเคราะห์และหาค่าความสูงของพื้นผิวได้ โดยใช้หลักการ Bragg's law ในการคำนวณค่าองค์ประกอบของสารในพื้นผิว

การวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ จะช่วยในการระบุโครงสร้างของสารบนพื้นผิว โดยเฉพาะถ้าพื้นผิวนั้นมีความสูงต่ำมาก ๆ เช่น บนพื้นผิวฟิล์มบาง หรืออนุภาคที่เคลือบบนผิว ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีการอื่น ๆ เช่น XRD หรือ TEM อาจจะไม่เหมาะสม



รูปที่ 2.17 แสดงหลักการทำงานของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ

2.7.4 ความแตกต่างระหว่างเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD) เป็นเทคนิคทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุ โดยอาศัยคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดการสะท้อน เพื่อช่วยในการหาข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างภายในของวัสดุ โดยความแตกต่างระหว่าง เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD) คือ

1. มุมการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ใช้มุมการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่มากกว่า 5 องศา ในขณะที่เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ ใช้มุมการสะท้อนระหว่าง 0.1 ถึง 5 องศา เพื่อให้มีการกระจายของรังสีเอ็กซ์บนพื้นผิวของตัวอย่าง

2. ความละเอียดในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ มีความละเอียดสูงกว่าเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากมุมการสะท้อนที่ต่ำกว่าจะช่วยให้มีการพิจารณาตัวอย่างได้โดยไม่ต้องกังวลถึงการสะท้อนที่มาจากคอนวอลูชัน ซึ่งจะทำให้เกิดเพลิงภายในภาพการสะท้อน

3. การปรับค่ามุมเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะใช้เทคนิคแบบ Bragg-brentano ในการปรับมุมของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ในขณะที่เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ จะใช้เทคนิคแบบ grazing-incidence ในการปรับมุมเพื่อให้มีการกระจายของรังสีเอ็กซ์บนพื้นผิวตัวอย่าง

4. การใช้งานเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ใช้ได้กับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่และสามารถวิเคราะห์โครงสร้างภายในของวัสดุที่เป็นแบบซ้อนทับได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม การควบคุมคุณภาพและการวิจัยในงานเคมีและวัสดุ

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ ใช้งานได้กับตัวอย่างที่มีพื้นผิวเรียบและเล็ก ๆ ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามปกติ โดยเฉพาะในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในการสังเคราะห์วัสดุ หรือในการศึกษาลักษณะการเจริญเติบโตของชั้นบาง ๆ บนพื้นผิวตัวอย่าง

ดังนั้น การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ การใช้งานเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ นั้นอยู่ในการใช้ประโยชน์ของแต่ละเทคนิคให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์และตัวอย่างที่มีอยู่

2.7.5 โปรแกรมวิเคราะห์ผลของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

โปรแกรมวิเคราะห์ผลของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ หรือ โปรแกรมวิเคราะห์แบบมุลาก คือ โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพสัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ได้มาจากการกระทำของรังสีเอ็กซ์ กับวัสดุทดสอบ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าของแบบผลึก (Crystal structure) ของสารและความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางกลไกภายใน โปรแกรมวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีหลายชนิด อาทิเช่น

1. Bruker diffractplus เป็นโปรแกรมขั้นนำที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ภาพสัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) อย่างละเอียด สามารถสร้างไฟล์ที่ใช้กับระบบผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันต่าง ๆ ได้

2. Fullprof suite เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการวิเคราะห์และจำลองโครงสร้างผลึกของสารต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การกระจายรังสีเอ็กซ์ (Rietveld refinement) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการวิเคราะห์ผลจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3. Panalytical x'pert high score เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพสัญญาณผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน และจัดทำรายงานผลการวิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความสามารถในการระบุโครงสร้างผลึกและพารามิเตอร์ต่าง ๆ

4. Materials studio เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการกระจายรังสีเอ็กซ์ และวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ซึ่งมีฟังก์ชันการวิเคราะห์ที่หลากหลาย เช่น การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก การคำนวณค่าความเป็นไปได้ของโครงสร้างผลึก และการจำลองพฤติกรรมของสารต่อสารอื่น

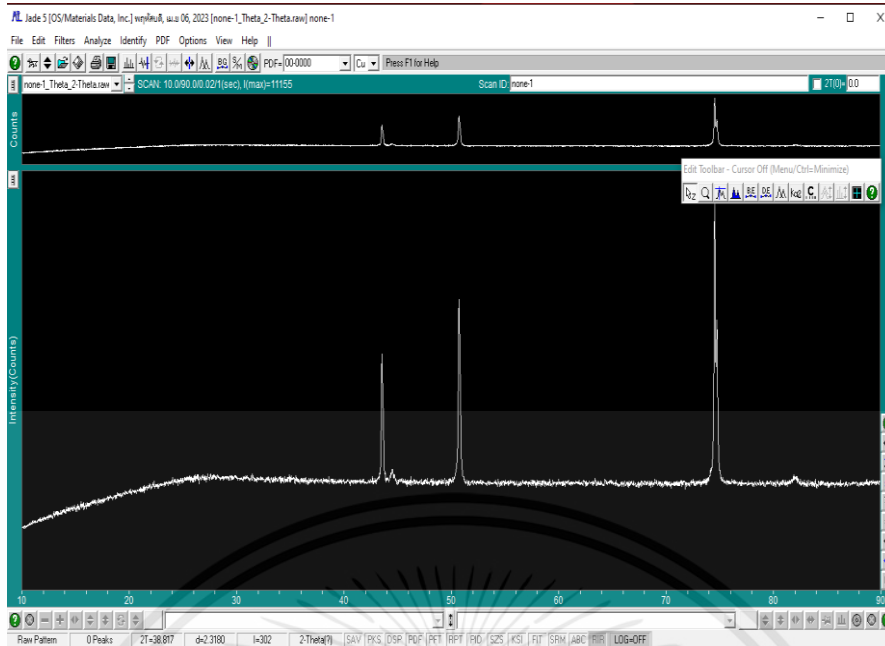
5. TOPAS เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพสัญญาณผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน โดยใช้วิธีการคำนวณ Rietveld refinement เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์กับโครงสร้างผลึกที่เป็นไปได้ของสาร

6. Jade5 เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในวงการวิจัยและอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสาร เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Rietveld refinement ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงในการตีความโครงสร้างผลึกของสารแต่ละชนิด

Jade5 มีความสามารถในการสร้างโมเดลโครงสร้างผลึกของสาร โดยใช้ฐานข้อมูลโครงสร้างผลึกที่มีอยู่และเทคนิค Rietveld refinement ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของโมเดล ซึ่งจะช่วยให้ผู้วิเคราะห์สามารถตีความโครงสร้างผลึกของสารได้ถูกต้องและมีความแม่นยำสูง

นอกจากนี้ Jade5 ยังมีฟังก์ชันการวิเคราะห์ผล XRD อื่น ๆ อีกมากมาย เช่น การวิเคราะห์แบบ fingerprinting, การวิเคราะห์ภาวะปริมาณของสารในผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน การวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน แบบ quantitative analysis ทำให้ Jade5 เป็นโปรแกรมที่มีความหลากหลายในการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของสารในปัจจุบัน

โปรแกรมวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันช่วยให้ผู้วิเคราะห์สามารถวิเคราะห์และตีความผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำสูง นอกจากนี้ ยังช่วยให้ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกใช้เทคนิคและอัลกอริทึมต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ของสารแต่ละชนิดได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 2.18 โปรแกรม Jade5 ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

2.8 การทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน (Corrosion testing)

การทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน (Corrosion testing) เป็นการทดสอบเพื่อวัดและประเมินความทนทานต่อกระบวนการกัดกร่อนของวัสดุต่าง ๆ โดยการทดสอบนี้จะใช้เครื่องมือหรือวิธีการต่าง ๆ เช่น การทดสอบด้วยสารเคมี การทดสอบด้วยการต่อสู้อกับสภาพแวดล้อมที่เป็นต้น

ทฤษฎีที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อน จะเกี่ยวกับกฎของธรรมชาติและสมบัติของวัสดุ โดยจะเน้นไปที่ปัจจัยที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น แรงดัน การติดตั้ง การใช้งาน และสมบัติอื่น ๆ ของวัสดุเพื่อตรวจวัดค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุ

นอกจากนี้ ยังมีการใช้ทฤษฎีการทดสอบการกัดกร่อนต่าง ๆ อย่างเช่น ทฤษฎีการทดสอบการกัดกร่อนด้วยการอุ้น การทดสอบการกัดกร่อนด้วยการเปลี่ยนค่า pH การทดสอบด้วยการตรวจวัดความเค็มของสารเคมีในสภาพแวดล้อม และการทดสอบด้วยการวัดแรงดันผ่านวัสดุ เป็นต้น

2.8.1 วิธีการทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion test)

วิธีการทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion test) มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีการทดสอบต่างกันไปตามลักษณะของวัสดุ และเงื่อนไขการใช้งานของวัสดุนั้นๆ ดังนั้นการเลือกวิธีการทดสอบที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์คุณสมบัติการกัดกร่อนของวัสดุ [26] โดยทั่วไปแล้ว วิธีการทดสอบการกัดกร่อนจะมีดังนี้

1. Weight loss test วิธีนี้ใช้วัสดุทดสอบมาตั้งเป็นแท่งหรือแผ่นแล้วนำไปแช่ในสารเคมีที่มีฤทธิ์กัดกร่อน เมื่อเวลาผ่านไปจนครบระยะเวลาการทดสอบ ก็จะนำวัสดุทดสอบออกมาแล้วชั่งน้ำหนักเพื่อวัดการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้น เมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ จะสามารถคำนวณหาค่าสูญเสียของวัสดุได้

2. Electrochemical test วิธีนี้ใช้การทดสอบโดยการวัดกระแสไฟฟ้า และโปรตอนในสารเคมีที่เข้าติดกับวัสดุทดสอบ ซึ่งการทดสอบโดยวิธีนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับค่า pH และค่าโปรตอนที่มีผลต่อการกัดกร่อนของวัสดุ [27]

3. Salt spray test วิธีนี้ใช้สารเคมีเกี่ยวกับเกลือที่พ่นไปในส่วนของวัสดุ และทำให้เกิดความชื้น โดยจะทดสอบโดยการเปลี่ยนสภาพอากาศเป็นแรงดันอากาศและความชื้นในสภาพที่สูงกว่าปกติ จากนั้นนำวัสดุไปทดสอบว่าเกิดการกัดกร่อนหรือไม่ [28]

โดยวิธีการทดสอบการกัดกร่อนมีหลายวิธีที่สามารถใช้ได้ แต่ในกรณีนี้จะศึกษาด้วยวิธีการทดสอบศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (Open circuit potential) ในการทดสอบ

2.8.2 การทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (Open circuit potential; OCP)

การทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น (OCP) เป็นทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของวัสดุ โดยมีการวัดแรงดันไฟฟ้า (Potential) ระหว่างวัสดุกับสารอื่น ๆ เพื่อตรวจสอบว่าวัสดุนั้นสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากสารอื่น ๆ ได้หรือไม่

ในกระบวนการกัดกร่อนของวัสดุ จะมีการเกิดการตอบสนองระหว่างวัสดุกับสารที่กัดกร่อน ทำให้มีการไหลกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุ ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุ โดยถ้าแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำ หมายความว่าวัสดุนั้นมีความอ่อนแอต่อการกัดกร่อน แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูง หมายความว่าวัสดุนั้นมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดี

การวัดแรงดันไฟฟ้านี้จะใช้เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า โดยการวัดเพื่อทำการประเมินความต้านทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุ ในการวัดแรงดันไฟฟ้านี้จะเป็นการวัดแรงดันไฟฟ้าบนผิววัสดุโดยที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านผ่านวัสดุ (เปิดวงจร) โดยวิธีนี้จะช่วยให้ผู้วิจัยและผู้ผลิตสามารถประเมินความต้านทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุได้ และช่วยในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการใช้งานตามสภาพแวดล้อมและสารอื่น ๆ ที่อาจจะมียอยู่ในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ นอกจากนี้ การวัดแรงดันไฟฟ้าแบบเปิดวงจรยังช่วยในการตรวจสอบว่ามีสารอื่น ๆ เข้ามาสัมผัสกับวัสดุหรือไม่ ซึ่งถ้ามีสารอื่น ๆ เข้ามาสัมผัสกับวัสดุ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าบนวัสดุ และจะช่วยในการบ่งบอกถึงการกัดกร่อนของวัสดุในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าแบบเปิดวงจรเป็นวิธีการที่สะดวกและเหมาะสมในการใช้งานจริง และได้รับการยอมรับโดยกลุ่มวิจัยและผู้ผลิตวัสดุทั่วโลก

การวัดแรงดันไฟฟ้าแบบเปิดวงจรเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและความสามารถในการทำนายการกัดกร่อนของวัสดุอย่างไรเสียหายนอกจากนี้วิธีการนี้ยังเป็นวิธีการที่สามารถใช้เพื่อวัดความเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าบนวัสดุที่ได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การติดตั้งในสภาพอากาศที่มีความชื้นสูงหรือการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีสารเคมีหรือสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ผลิตเลือกวัสดุที่เหมาะสมและปรับปรุงกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการวัดแรงดันไฟฟ้าแบบเปิดวงจรเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการควบคุมคุณภาพวัสดุและการจัดการในกระบวนการผลิตวัสดุในสายอุตสาหกรรม

ซึ่งได้รับการยอมรับโดยกลุ่มวิจัยและผู้ผลิตวัสดุทั่วโลกเป็นอย่างมาก ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้กำหนดวัสดุที่เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิงคือ Ag/AgCl และใช้ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงแท่งอิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/AgCl

2.8.3 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/AgCl

ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/AgCl ที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.9 % $\frac{w}{w}$ NaCl ใน DIH_2O สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ Nernst

$$E = E^\circ + \left(\frac{RT}{nF}\right) \times \ln \left(\frac{[\text{Ag}^+]}{[\text{Cl}^-]}\right) \quad (2)$$

- โดยที่
- E คือ ศักย์ไฟฟ้า
 - E° คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน
 - R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
 - T คือ อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)
 - n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายโอนในปฏิกิริยาอิเล็กโทรด (1 สำหรับ Ag/AgCl)
 - F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์
 - [Ag +] คือ ความเข้มข้นของซิลเวอร์
 - [Cl -] คือ ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน

ที่ 37 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในหน่วยเคลวินคือ 310.15 องศาเคลวิน ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนใน 0.9 % $\frac{w}{w}$ NaCl ใน DIH_2O คือ 0.154 โมล ตามที่คำนวณในคำตอบก่อนหน้า

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/AgCl โดยทั่วไปจะรายงานเป็น +0.1976 โวลต์ เทียบกับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน (SHE) ที่ 25 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดจะแปรผันตามอุณหภูมิ และต้องใช้ปัจจัยการแก้ไขเพื่อปรับความแตกต่างของอุณหภูมิ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานสำหรับอิเล็กโทรด Ag/AgCl อยู่ที่ประมาณ -0.06 มิลลิโวลต์ต่อองศาเคลวิน

ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/AgCl ใน สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งคือ $0.9\% \frac{w}{w}$ NaCl ใน DIH_2O ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณได้ดังนี้

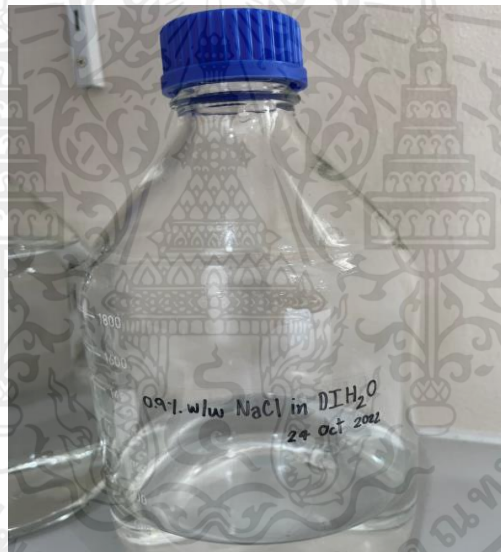
$$E = E^\circ + \left(\frac{RT}{nF}\right) \times \ln\left(\frac{[Ag^+]}{[Cl^-]}\right)$$

$$E = 0.1976 + \left(\frac{8.314}{1} \times 298.15 \times 96485\right) \times \ln\left(\frac{[Ag^+]}{[Cl^-]}\right) +$$

$$(-0.06 \times (310.15 - 298.15))$$

$$E \approx +0.1969 \text{ โวลต์}$$

ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/AgCl ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $0.9\% \frac{w}{w}$ NaCl ใน DIH_2O ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จึงมีค่าประมาณ +0.1969 โวลต์ เมื่อเทียบกับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน



รูปที่ 2.20 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $0.9\% \frac{w}{w}$ NaCl ใน DIH_2O

2.8.4 มาตรฐานการทดสอบวัสดุทางการแพทย์

ISO 10993-15 คือมาตรฐานสากลที่กำหนดเกี่ยวกับการประเมินความเสี่ยงของวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ต่อผิวหนัง (Skin) ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การติดต่อโดยตรง (Direct contact) การฉีด (Injection) การแพร่กระจาย (Aerosol) การสัมผัสกับเลือด (Blood contact) เป็นต้น

มาตรฐานนี้จะใช้ในการประเมินความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่สัมผัสกับผิวหนัง โดยการประเมินความเสี่ยงนั้นจะต้องพิจารณาตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะเวลาที่สัมผัส ปริมาณวัสดุที่สัมผัส พฤติกรรมการใช้งานวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น

การปฏิบัติตามมาตรฐานนี้จะช่วยให้ผู้ผลิตวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์สามารถตรวจสอบความเสี่ยงต่อผิวหนังได้และปรับปรุงผลิตภัณฑ์เพื่อลดความเสี่ยงในการใช้งานได้ โดยในการประเมินความเสี่ยงนั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและการทดสอบต่าง ๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ในการปรับปรุงวัสดุ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ให้มีคุณภาพและปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

ตาม ISO 10993-15 ข้อกำหนดที่ 5.2 กำหนดว่าสารละลายที่ใช้ในการทดสอบควรมีความเข้มข้นและความเป็นกลางของ pH ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับวัตถุทดสอบ ซึ่งสารละลายที่ใช้ได้สามารถระบุได้ตามความเหมาะสมของแต่ละวัตถุทดสอบ ดังนี้

1. สารละลายที่ใช้ในการทดสอบควรมีความเข้มข้นและความเป็นกลางของ pH ที่เหมาะสมสำหรับวัตถุทดสอบ
2. สารละลายควรเป็นสารที่ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย และไม่มีฤทธิ์ที่จะเปลี่ยนแปลงลักษณะของวัตถุทดสอบ
3. สารละลายควรมีความเสถียรและไม่มีการหมักเกิดขึ้นในช่วงเวลาทดสอบ
4. สารละลายควรมีความสะอาดและไม่มีสารอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อทดสอบ

ตัวอย่างของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ PBS (Phosphate buffered saline) หรือ Ringer's solution ซึ่งเป็นสารละลายที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานของวัตถุต่อการกัดกร่อน ในบางกรณีอาจใช้สารละลายอื่น ๆ ที่เหมาะสมกับวัตถุทดสอบเช่นเดียวกัน ในการศึกษาในครั้งนี้เราจะใช้ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.9 % $\frac{w}{w}$ NaCl ใน DIH_2O ซึ่งเป็นสารละลายที่สามารถใช้ในการทดสอบได้ตาม ISO 10993-15 และเป็นสารละลายที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นสารละลายที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทดสอบความเป็นพิษในเซลล์และเนื้อเยื่อของมนุษย์ ดังนั้นสารละลายนี้ถือว่าปลอดภัยและสามารถใช้แทนสารละลายอื่น ๆ ได้ในการทดสอบความเป็นพิษของวัตถุ [29]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย การวางแผนการทำงาน วิธีการทดลอง ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

- 3.1 วัสดุและอุปกรณ์
- 3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง
- 3.3 สถานที่ทำการทดลอง
- 3.4 ระยะเวลาการทำวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในส่วนของการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการมาร์กด้วยเลเซอร์ต่อสมบัติพื้นผิว และการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ใช้วัสดุและอุปกรณ์ดังนี้

3.1.1 วัสดุ

- 3.1.1.1 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.2.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับเตรียมชิ้นงาน

1. เครื่องเลเซอร์มาร์ก (ยี่ห้อ Keyence รุ่น MD-X ประเภท 3-Axis hybrid laser marker)
2. เครื่องตัดไฮดรอลิก

- 3.2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาค่าสี

1. กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล
2. โปรแกรม ImageJ

- 3.2.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาความขรุขระ

1. กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล (ยี่ห้อ Olympus รุ่น 3D Measuring Laser microscope OLS5000)
2. โปรแกรม Olympus OLS5100 Analysis application

- 3.2.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษารูปร่างของผิวของชิ้นออกไซด์

1. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)
2. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD)

- 3.2.1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการศึกษาพฤติกรรมกัดกร่อน

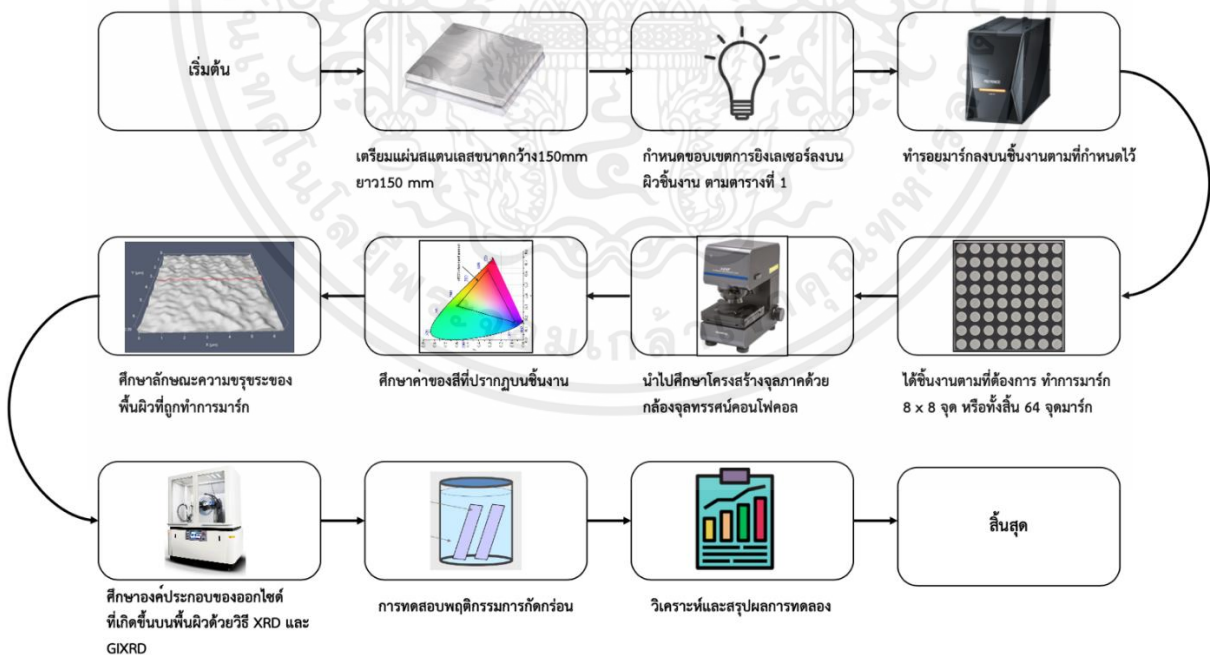
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและห้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (ยี่ห้อ Metrohm)
2. โปรแกรม Dropview
3. ปีกเกอร์
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
5. เทอมอมิเตอร์
6. เอทานอล
7. แท่งขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl
8. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.9% $\frac{w}{w}$ NaCl ใน DIH₂O

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง

3.2.1 ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

คณะผู้จัดทำได้ออกแบบขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่สำคัญของการมาร์กด้วยเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L โดยมีการกำหนดขั้นตอนการทดลองต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยเริ่มจากการเตรียมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ให้ได้ตามขนาดที่กำหนด ออกแบบขอบเขตการทำมาร์กด้วยเลเซอร์ ลงมือทำตามขั้นตอนที่ออกแบบไว้ และศึกษาค่าสี ความขรุขระ องค์ประกอบของออกไซด์ที่เกิดขึ้น ทดลองพฤติกรรมการกัดกร่อน หลังจากนั้นจึงสรุปผลและวิเคราะห์ผลการศึกษา



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพขั้นตอนการทดลองตลอดโครงการ

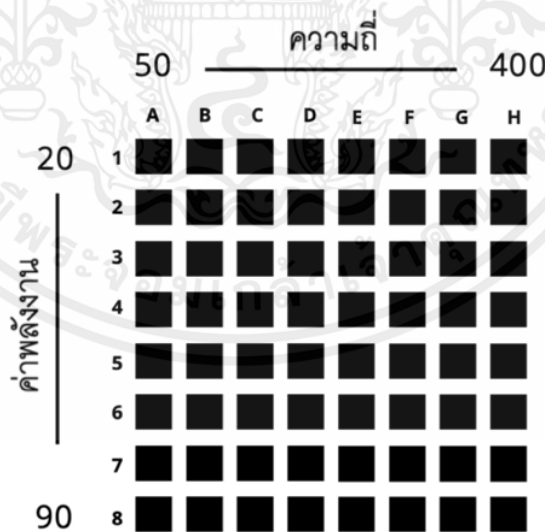
3.2.2 วางแผนออกแบบตัวแปรของการมาร์กด้วยเลเซอร์

ทีมผู้วิจัยทำการวางแผนและออกแบบตัวแปรที่สำคัญของการมาร์กด้วยเลเซอร์ บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด316L คือจะทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ 3 ความเร็วได้แก่ 1500 2500 และ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที กำหนดค่าพลังงานที่ 20 ถึง 90 % ของพลังงานสูงสุด โดยแต่ละการมาร์กจะเพิ่มค่าพลังงานครั้งละ 10% และ ความถี่ที่ 50 ถึง 400 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยแต่ละการมาร์กจะเพิ่มค่าความถี่ครั้งละ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าตัวแปรของการมาร์กด้วยเลเซอร์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด316L

ตัวแปรของการมาร์กด้วยเลเซอร์	ขอบเขตการทดลอง
ความเร็ว (มิลลิเมตรต่อวินาที)	1500 2500 3500
ค่าพลังงาน (%)	20 30 40 50 60 70 80 90
ความถี่ (กิโลเฮิร์ตซ์)	50 100 150 200 250 300 350 400

ทีมผู้วิจัยทำการออกแบบขนาดของรอยมาร์กบนการมาร์กด้วยด้วยเครื่องเลเซอร์มาร์กของยี่ห้อ Keyence รุ่น MD-X series ประเภท 3-Axis hybrid laser marker คือ มาร์กเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เป็นเมทริกซ์ 8 แถวในค่าพลังงานที่ต่างกัน คือที่ 20% ถึง 90% ของพลังงานสูงสุด และ 8 หลักในค่าความถี่ที่ 50 ถึง 400 กิโลเฮิร์ตซ์ รวมเป็น 64 รอยมาร์ก ดังรูปที่ 3.2

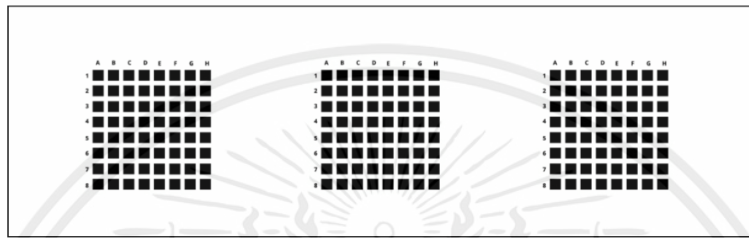


รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบรอยมาร์กของการมาร์กด้วยเลเซอร์

3.2.3 ขั้นตอนการตรวจสอบค่าสี

3.2.3.1 การเตรียมชิ้นงาน

ทีมผู้วิจัยทำการเตรียมแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ขนาด 50x150 มิลลิเมตรและทำการมาร์ก
รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1.5 x 1.5 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องเลเซอร์มาร์กของยี่ห้อ Keyence รุ่น MD-X series
ประเภท 3-Axis hybrid laser marker เป็นเมทริกซ์ 8 แถวในค่าพลังงานที่ต่างกัน และ 8 หลักในค่าความถี่ที่
ต่างกัน โดยทำ 3 เมทริกซ์ต่อ 1 ความเร็ว และทำเช่นนี้ทั้ง 3 ความเร็ว ดังรูปที่ 3.3 เพื่อนำมาตรวจสอบหา
ค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มสี



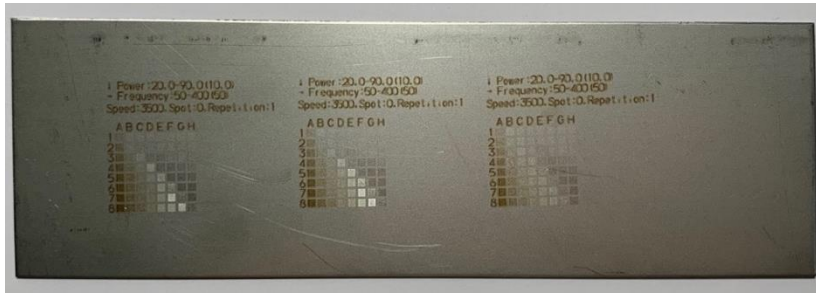
รูปที่ 3.3 ขอบเขตของการมาร์กด้วยเลเซอร์ในแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L
ขนาด 50 x 150 มิลลิเมตร 1 แผ่น ต่อ 1 ความเร็ว



รูปที่ 3.4 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที



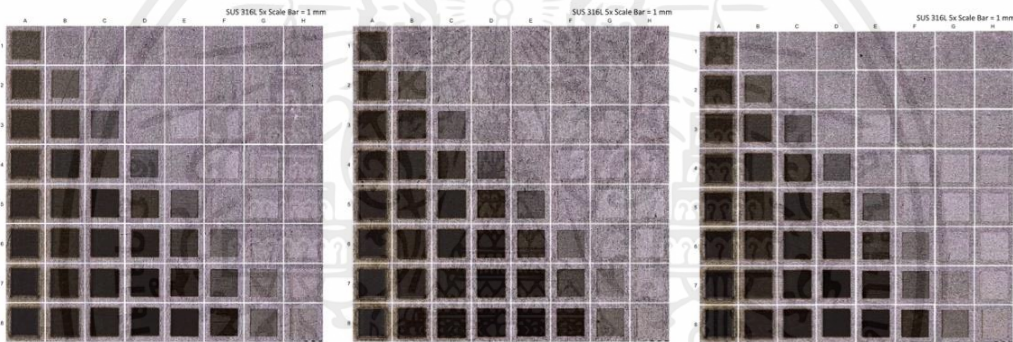
รูปที่ 3.5 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที



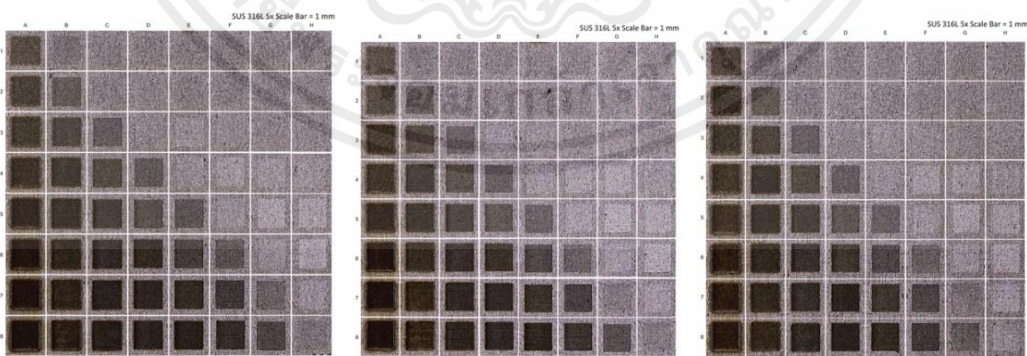
รูปที่ 3.6 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที

3.2.3.2 ช่วงดำเนินการตรวจสอบ

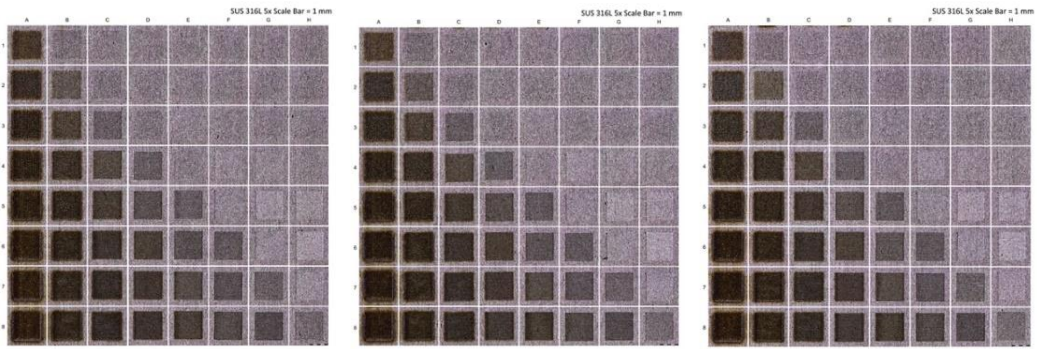
ทีมผู้วิจัยดำเนินการขั้นตอนถ่ายรูปชิ้นงานที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอล ยี่ห้อ Olympus รุ่น 3D Measuring laser microscope OLS5000 ด้วยกำลังขยาย 5 เท่า ได้ดังรูปที่ 3.7 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.7 รอยมาร์กจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที



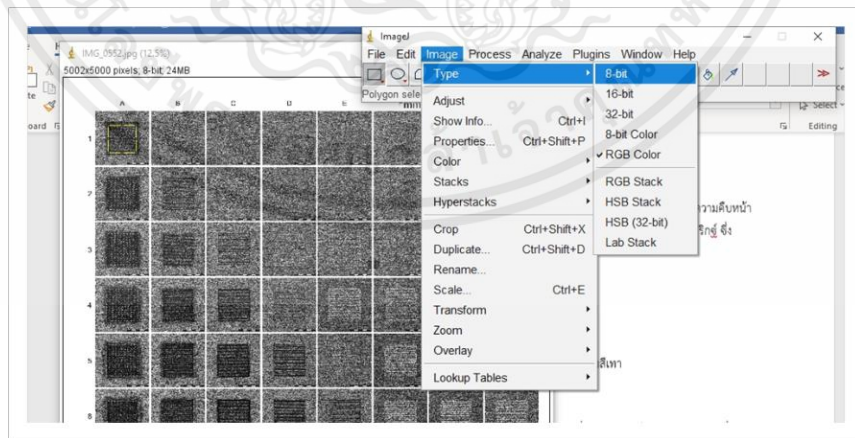
รูปที่ 3.8 รอยมาร์กจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า ที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที



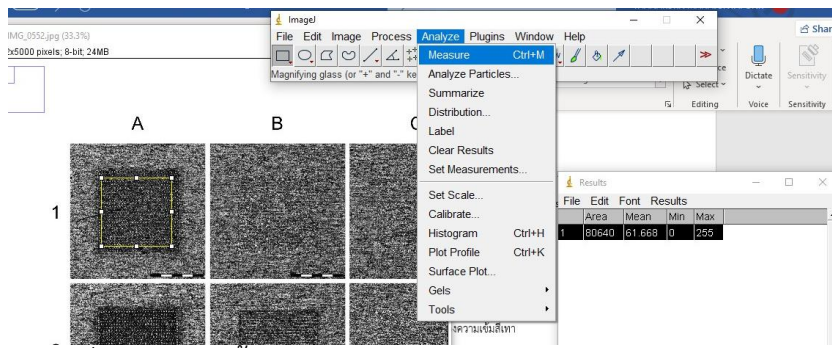
รูปที่ 3.9 รอยมาร์กจากกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลที่กำลังขยาย 5 เท่า
ที่ความเร็ว 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที

ในขั้นตอนวิเคราะห์ค่าสีของชิ้นงานที่ทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ทีมผู้วิจัยได้ใช้การตรวจสอบค่าความเข้มสีด้วยโปรแกรม ImageJ ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์ได้ดังนี้

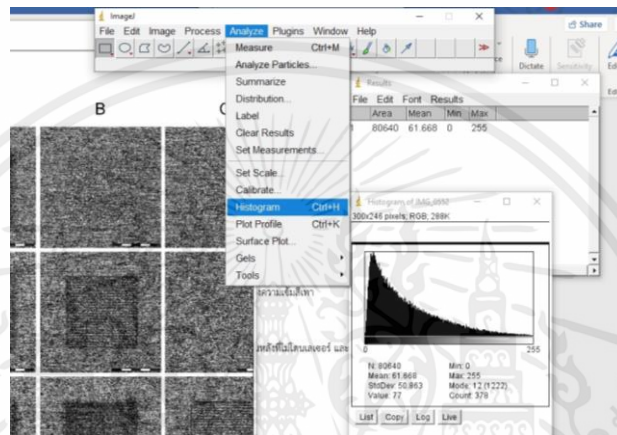
1. เปิดโปรแกรม ImageJ เลือกรูปภาพที่ต้องการตรวจสอบ
2. ปรับภาพเป็นภาพขาวดำ (8-bit)
3. ใช้เครื่องมือสี่เหลี่ยม กรอบพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบ
4. กดคำสั่ง Analyze และ Measure เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของความเข้มสีของรอยมาร์ก (J_x)
5. เลือกพื้นที่ให้ครบทั้ง 64 รอยมาร์ก รวมทั้งพื้นที่ที่ไม่ถูกการมาร์ก เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเข้มสีของพื้นหลัง (J_f)
6. เก็บค่าที่ได้ใส่ในตาราง เพื่อวิเคราะห์
7. ทำซ้ำขั้นตอน 1-6 ซ้ำจนครบทุกชิ้นงานที่ต้องการ



รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการปรับภาพเป็นขาวดำ



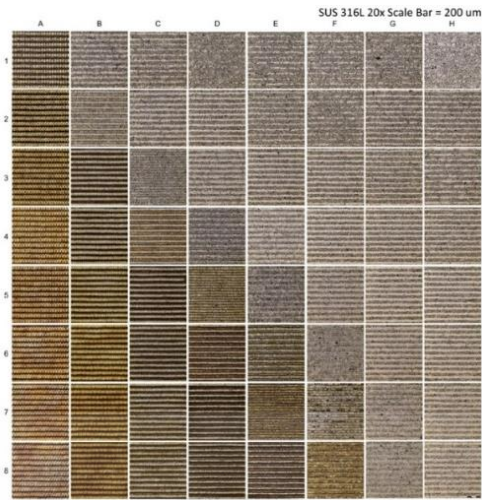
รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการ Analyze ค่าความเข้มชั้นของสี



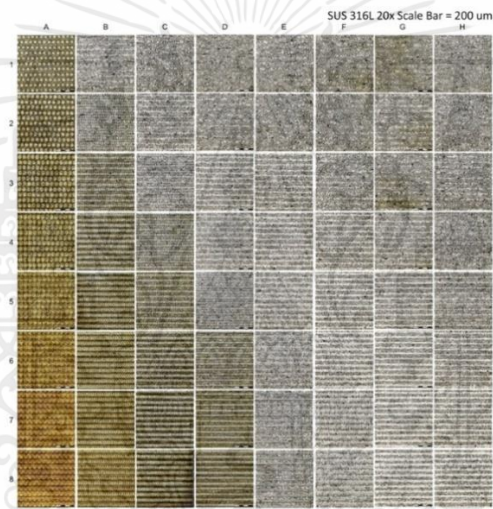
รูปที่ 3.12 แสดงขั้นตอนการเปิดหน้าต่างแสดงกราฟฮิสโตแกรมของค่าความเข้มชั้นของสี

3.2.4 ขั้นตอนการตรวจสอบความขรุขระ

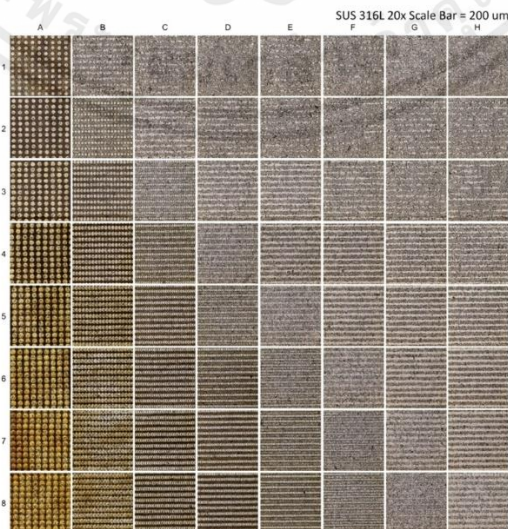
ทีมผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบค่าความเรียบผิวของรอยมาร์กจากการมาร์กด้วยเลเซอร์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ซึ่งเป็นชิ้นงานเดียวกับชิ้นงานในขั้นตอนการตรวจสอบค่าสี โดยใช้กล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอลยี่ห้อ Olympus รุ่น 3D Measuring laser microscope OLS5000 ที่กำลังขยาย 20 เท่า ได้ดังรูปที่ 3.13 3.14 และ 3.15



รูปที่ 3.13 รอยมาร์กที่กำลังขยาย 20 เท่า ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.14 รอยมาร์กที่กำลังขยาย 20 เท่า ที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.15 รอยมาร์กที่กำลังขยาย 20 เท่า ที่ความเร็ว 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที

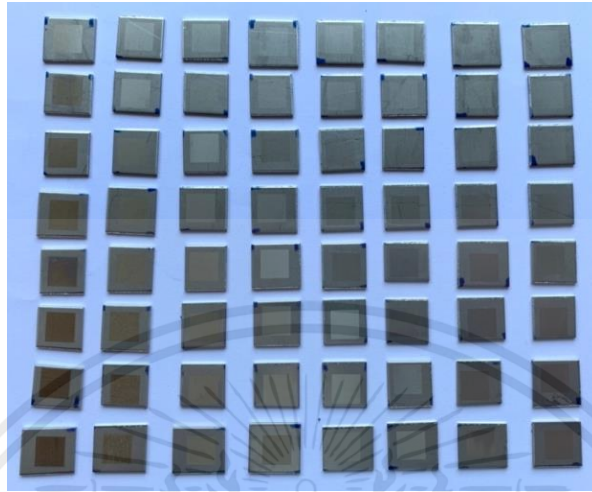


รูปที่ 3.19 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.20 รูปชิ้นงานจริงหลังจากทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ความเร็ว 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที

หลังจากนั้นทีมผู้วิจัยนำชิ้นงานไปตัดออกตามแต่ละรอยมาร์กเป็นขนาดไม่เกิน 20 x 20 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องตัดไฮดรอลิก และได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 รูปชิ้นงานหลังทำการตัดด้วยเครื่องตัดไฮดรอลิก ที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที

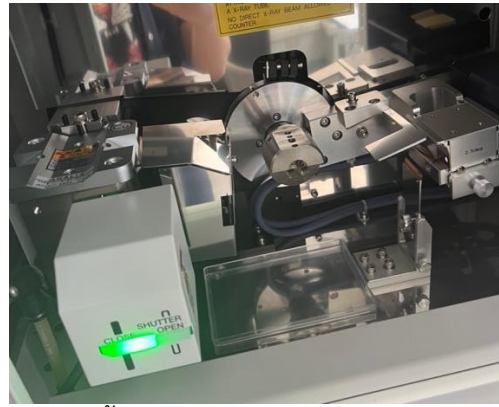
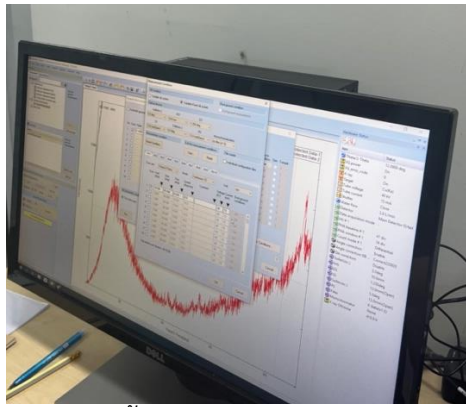
3.2.5.2 ช่วงดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

ทีมผู้วิจัยดำเนินการขั้นตอนการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของชั้นฟิล์มออกไซด์ ด้วยการเลือกชิ้นงานตัวอย่างมาตรวจสอบนั้นคือ ที่พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ทั้ง 3 ความเร็วคือ 1500 2500 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที รวมถึงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ยังไม่ผ่านการทำมาร์กด้วยเลเซอร์ เพื่อเปรียบเทียบผล ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของชั้นฟิล์มออกไซด์

หลังนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) จะได้ข้อมูลเป็นความสัมพันธ์กราฟของผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

3.2.5.3 ช่วงดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD)

ทีมผู้วิจัยดำเนินการขั้นตอนการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของชั้นฟิล์มออกไซด์ ด้วยการเลือกชิ้นงานตัวอย่าง 1 ชิ้นมาตรวจสอบ เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) นั้นคือ รอยมาร์กที่พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD) โดยเลือกควบคุมเงื่อนไข 3 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลได้แก่ แกน $\theta/2\theta$ ความเร็ว 10 องศาต่อนาที แกน 2θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 10 องศาต่อนาที และ แกน 2θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 3 องศาต่อนาที

3.2.6 ขั้นตอนการตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน

3.2.6.1 การเตรียมชิ้นงาน

ทีมผู้วิจัยใช้ชิ้นงานที่ตัดได้ตามรอยมาร์กจากขั้นตอนการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของออกไซด์มาทำการตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน โดยเลือกรอยมาร์กที่พลังงาน 80% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ของความเร็ว 1500 2500 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที รวมทั้งชิ้นงานที่ไม่ผ่านการมาร์กด้วยเลเซอร์มาทำการทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานโดยวิธีศึกษาการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น

3.2.5.2 ช่วงดำเนินการตรวจสอบ

ทีมผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานโดยวิธีศึกษาการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น Open circuit potential (OCP) ซึ่งใช้เครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat) ยี่ห้อ Metrohm โดยชิ้นงานทดสอบจะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) ส่วนอิเล็กโทรดแท่งเงิน (Ag/AgCl) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งคือ $0.9\% \frac{w}{w}$ NaCl ใน DIH_2O ในอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำความสะอาด หลังจากนั้นซับชิ้นงานให้แห้ง และนำชิ้นงานทดสอบใส่เข้าไปในที่ยึด (Holder) จุ่มลงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งคือ $0.9\% \frac{w}{w} \text{NaCl}$ ใน DIH_2O ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส
2. เปิดเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat) โดยต่อเข้าคอมพิวเตอร์ เข้าโปรแกรม Dropview 8400 เลือก node โหมด Open circuit potentiometry
3. ตั้งค่าตัวแปรในโปรแกรมโดยใช้เวลาทดสอบ 3600 วินาที
4. นำชิ้นงานทดสอบลงในบีกเกอร์โดยให้อยู่ใกล้กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)
5. กด run เพื่อเริ่มทำการตรวจสอบและเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.24 แสดงการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานโดยวิธีศึกษาการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น

3.3 สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.4 ระยะเวลาการทำวิจัย

การดำเนินโครงการวิจัยนี้มีระยะในการดำเนินงาน โดยเริ่มจากเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2565 และจะสิ้นสุดในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2566

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ รวมถึงการนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ห้อธิพลของตัวแปรที่สำคัญของการมาร์กด้วยเลเซอร์ลงบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

- 4.1 ผลการศึกษาค่าสี
- 4.2 ผลการศึกษาความขรุขระ
- 4.3 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นออกไซด์ฟิล์ม
- 4.4 ผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน
- 4.5 การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์

4.1 ผลการศึกษาค่าสี

หลังจากดำเนินขั้นตอนตรวจสอบค่าความเข้มข้นสีดำของชิ้นงาน ด้วยโปรแกรม ImageJ จึงได้ค่าความเข้มสีเฉลี่ย (J_x) จากการตรวจสอบ 3 เมทริกซ์ในแต่ละรอย ทั้ง 3 ความเร็ว ได้ผลดังตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยความเข้มสี (J_x) ในความเร็วที่ 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที

ค่าเฉลี่ยความเข้มสี (J_x)	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	50	100	150	200	250	300	350	400
		A	B	C	D	E	F	G	H
พลังงาน (%)									
20	1	55.94	121.48	129.95	126.17	128.33	126.93	125.35	125.82
30	2	38.33	72.02	143.25	146.11	133.51	129.53	139.35	136.9
40	3	30.94	38.34	75.64	142.4	159.06	152.69	146.38	147.25
50	4	26.07	29.79	37.29	68.55	133.98	163.69	159.48	154.47
60	5	23.34	30.32	21.3	36.24	72.79	143.13	163.27	161.43
70	6	21.17	27.37	20.42	17.91	38.69	90.4	148.37	162.31
80	7	20.3	22.19	19.89	13.85	19.83	59.19	110.22	155.42
90	8	20.25	19.41	17.57	13.24	13.33	24.87	86.57	136.24

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยความเข้มสี (J_x) ในความเร็วที่ 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที

ค่าเฉลี่ยความเข้มสี (J_x)	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	50	100	150	200	250	300	350	400
		A	B	C	D	E	F	G	H
พลังงาน (%)									
20	1	61.64	107.92	118.71	119.00	120.97	120.56	119.68	122.71
30	2	51.44	79.94	120.77	126.13	120.29	120.67	123.76	122.23
40	3	42.20	57.79	85.57	132.39	138.27	132.27	129.59	127.60
50	4	36.30	44.12	63.99	81.86	138.92	148.96	147.31	138.64
60	5	29.09	39.53	52.34	71.61	82.19	144.36	156.79	151.52
70	6	26.71	39.97	46.16	47.92	67.66	91.42	145.68	159.07
80	7	24.83	37.75	41.28	39.09	48.50	65.41	111.62	148.39
90	8	23.52	36.24	37.19	36.52	37.10	51.48	79.13	125.65

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยความเข้มสี (J_x) ในความเร็วที่ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที

ค่าเฉลี่ยความเข้มสี (J_x)	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	50	100	150	200	250	300	350	400
พลังงาน (%)		A	B	C	D	E	F	G	H
20	1	61.07	115.69	128.35	129.15	129.94	127.34	129.24	128.82
30	2	52.49	87.56	121.03	128.48	127.55	127.66	127.58	125.89
40	3	44.49	63.86	96.36	122.99	136.68	130.68	129.18	128.28
50	4	38.31	48.96	71.87	95.44	131.91	146.42	143.28	135.75
60	5	35.10	40.41	57.10	79.93	91.86	140.73	155.41	152.60
70	6	32.79	39.01	51.92	64.29	84.11	89.93	145.41	160.19
80	7	31.84	40.07	47.23	56.85	74.39	83.11	98.54	148.75
90	8	32.10	38.60	45.78	56.01	59.96	74.02	76.50	109.22

หลังจากนั้นทีมผู้วิจัยนำค่าความเข้มสีมาคำนวณหาค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ (k^*) ได้ค่าดังตารางที่ 4.4 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ (k^*) ในความเร็วที่ 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที

k^* เฉลี่ย	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	50	100	150	200	250	300	350	400
พลังงาน (%)		A	B	C	D	E	F	G	H
20	1	58.82	10.53	4.27	7.08	5.48	6.49	7.66	7.32
30	2	71.78	46.96	-5.51	-7.62	1.66	4.58	-2.65	-0.83
40	3	77.22	71.77	44.30	-4.88	-17.15	-12.47	-7.82	-8.47
50	4	80.80	78.07	72.54	49.52	1.31	-20.59	-17.48	-13.79
60	5	82.81	77.69	84.31	73.33	46.40	-5.45	-20.27	-18.92
70	6	84.41	79.85	84.95	86.81	71.51	33.41	-9.30	-19.57
80	7	85.04	83.66	85.34	89.79	85.40	56.41	18.81	-14.49
90	8	85.07	85.71	87.06	90.25	90.19	81.69	36.22	-0.38

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ (k^*) ในความเร็วที่ 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที

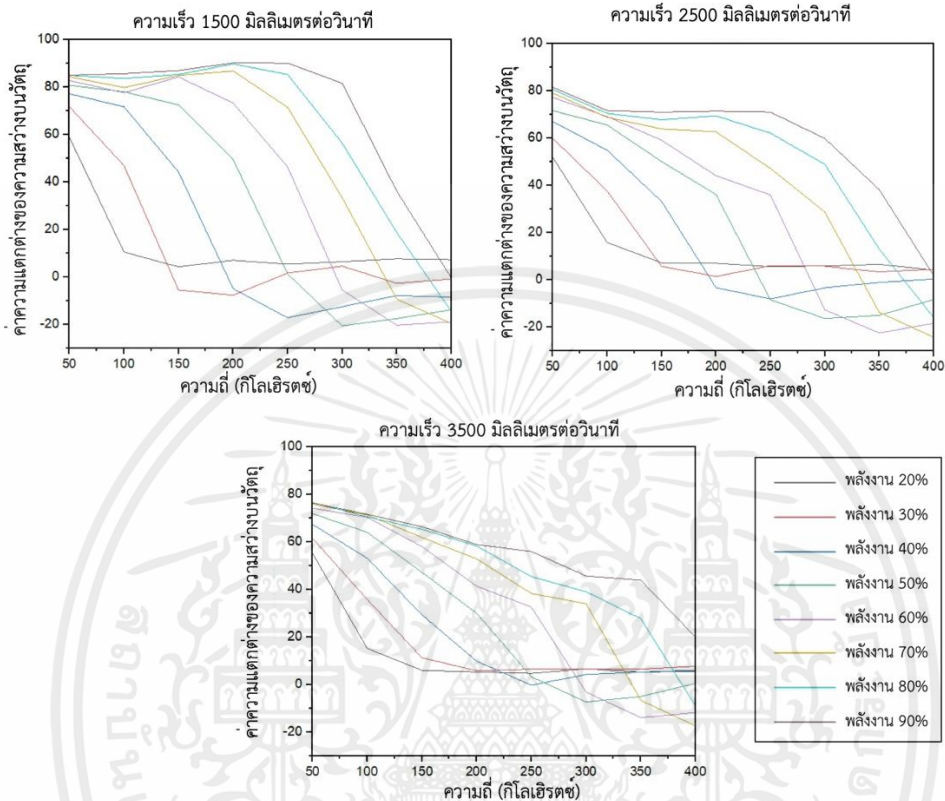
k^* เฉลี่ย	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	50	100	150	200	250	300	350	400
พลังงาน (%)		A	B	C	D	E	F	G	H
20	1	51.86	15.79	7.23	7.04	5.55	5.86	6.55	4.16
30	2	59.95	37.61	5.71	1.44	6.05	5.76	3.41	4.50
40	3	67.06	54.90	33.22	-3.28	-8.06	-3.38	-1.06	0.32
50	4	71.66	65.59	50.11	36.12	-8.44	-16.36	-14.99	-8.37
60	5	77.30	69.19	59.17	44.14	35.98	-12.66	-22.48	-18.43
70	6	79.11	68.83	63.99	62.65	47.26	28.75	-13.71	-24.32
80	7	80.60	70.52	67.80	69.48	62.17	48.99	13.08	-15.93
90	8	81.62	71.76	71.00	71.50	71.07	59.89	38.29	1.89

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ (k^*) ในความเร็วที่ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที

k^* เฉลี่ย	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	ความเร็ว (มิลลิเมตรต่อวินาที)							
		50	100	150	200	250	300	350	400
พลังงาน (%)		A	B	C	D	E	F	G	H
20	1	55.26	15.26	6.02	5.36	4.76	6.66	5.30	5.63
30	2	61.61	35.83	11.34	5.83	6.51	6.42	6.47	7.75
40	3	67.46	53.19	29.41	9.89	-0.19	4.25	5.31	6.01
50	4	71.98	64.11	47.30	30.08	3.32	-7.30	-4.99	0.54
60	5	74.27	70.40	58.15	41.42	32.66	-3.11	-13.86	-11.79
70	6	75.97	71.40	61.96	52.90	38.39	34.09	-6.55	-17.38
80	7	76.64	70.63	65.39	58.36	45.48	39.11	27.78	-8.99
90	8	76.47	71.71	66.46	58.97	56.05	45.76	43.94	19.97

4.1.1 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาค่าสี สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุ (k^*) และความถี่ ของทั้ง 3 ความเร็ว ในแต่ละพลังงานได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุและความถี่ ในแต่ละพลังงาน ที่ความเร็ว 1500 2500 3500 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ

จากกราฟจะเห็นว่าแนวโน้มของทั้ง 3 ความเร็ว เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือที่ความถี่ต่ำ เมื่อพลังงานสูงขึ้น ค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุจะเพิ่มขึ้นหมายถึงเกิดการมาร์กที่เข้มขึ้น และที่ความถี่สูง เมื่อพลังงานสูงขึ้น ค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุจะลดลง ไปจนถึงติดลบซึ่งหมายถึงสีของรอยมาร์กสว่างกว่าสีพื้นหลัง หรือเกิดการขีดผิวออกไป จนถึงค่าหนึ่งที่มีพลังงานมากพอ ก็จะกลับมาเป็นการมาร์ก

จากกราฟจะเห็นว่าแนวโน้มของทั้ง 3 ความเร็ว เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือที่ความถี่ต่ำ เมื่อพลังงานสูงขึ้น ค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุจะเพิ่มขึ้นหมายถึงเกิดการมาร์กที่เข้มข้น และที่ความถี่สูง เมื่อพลังงานสูงขึ้น ค่าความแตกต่างของความสว่างบนวัตถุจะลดลง ไปจนถึงติดลบซึ่งหมายถึงสีของรอยมาร์กสว่างกว่าสีพื้นหลัง หรือเกิดการขีดผิวออกไป จนถึงค่าหนึ่งที่มีพลังงานมากพอ ก็จะกลับมาเป็นการมาร์ก

4.2 ผลการศึกษาความขรุขระ

จากการถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอลที่กำลังขยาย 20 เท่า ทีมผู้วิจัยสามารถตรวจสอบค่าเฉลี่ยความเรียบผิวจากโปรแกรม Olympus OLS5100 Analysis application เฉลี่ยรอยมาร์กละ 4 ค่า ดังตารางที่ 4.7 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิว (Ra) ในความเร็วที่ 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที

ค่าเฉลี่ยความ เรียบผิว (Ra)	ความถี่ (กิโลเฮิร์ตซ์)	50	100	150	200	250	300	350	400
พลังงาน (%)		A	B	C	D	E	F	G	H
20	1	0.432	0.338	0.457	0.429	0.36	0.419	0.462	0.378
30	2	0.4	0.353	0.256	0.358	0.4	0.406	0.367	0.449
40	3	0.409	0.33	0.38	0.201	0.204	0.258	0.434	0.276
50	4	0.411	0.307	0.396	0.243	0.151	0.149	0.199	0.135
60	5	0.421	0.342	0.364	0.374	0.181	0.138	0.168	0.18
70	6	0.423	0.374	0.351	0.375	0.238	0.147	0.137	0.161
80	7	0.415	0.361	0.31	0.424	0.268	0.194	0.126	0.148
90	8	0.391	0.392	0.345	0.401	0.295	0.224	0.158	0.154

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิว (Ra) ในความเร็วที่ 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที

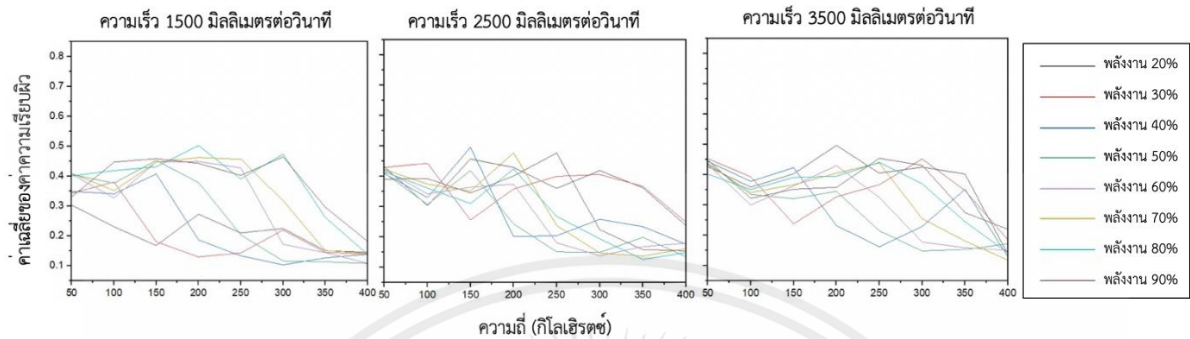
ค่าเฉลี่ยความ เรียบผิว (Ra)	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	ความเร็วที่ 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที							
		50	100	150	200	250	300	350	400
พลังงาน (%)		A	B	C	D	E	F	G	H
20	1	0.432	0.338	0.457	0.429	0.36	0.419	0.462	0.378
30	2	0.4	0.353	0.256	0.358	0.4	0.406	0.367	0.449
40	3	0.409	0.33	0.38	0.201	0.204	0.258	0.434	0.276
50	4	0.411	0.307	0.396	0.243	0.151	0.149	0.199	0.135
60	5	0.421	0.342	0.364	0.374	0.181	0.138	0.168	0.18
70	6	0.423	0.374	0.351	0.375	0.238	0.147	0.137	0.161
80	7	0.415	0.361	0.31	0.424	0.268	0.194	0.126	0.148
90	8	0.391	0.392	0.345	0.401	0.295	0.224	0.158	0.154

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิว (Ra) ในความเร็วที่ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที

ค่าเฉลี่ยความ เรียบผิว (Ra)	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	ความเร็วที่ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที							
		50	100	150	200	250	300	350	400
พลังงาน (%)		A	B	C	D	E	F	G	H
20	1	0.427	0.359	0.403	0.497	0.405	0.425	0.502	0.438
30	2	0.453	0.393	0.238	0.327	0.367	0.452	0.348	0.385
40	3	0.444	0.378	0.352	0.232	0.162	0.229	0.352	0.329
50	4	0.438	0.335	0.321	0.345	0.215	0.148	0.153	0.151
60	5	0.433	0.3	0.363	0.43	0.28	0.178	0.159	0.15
70	6	0.435	0.341	0.367	0.405	0.401	0.255	0.181	0.118
80	7	0.488	0.351	0.391	0.395	0.441	0.33	0.245	0.167
90	8	0.448	0.322	0.352	0.358	0.454	0.431	0.305	0.22

4.2.1 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาความเรียบผิว สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิว (Ra) และความถี่ ของทั้ง 3 ความเร็ว ในแต่ละพลังงานได้ดังรูปที่ 4.2



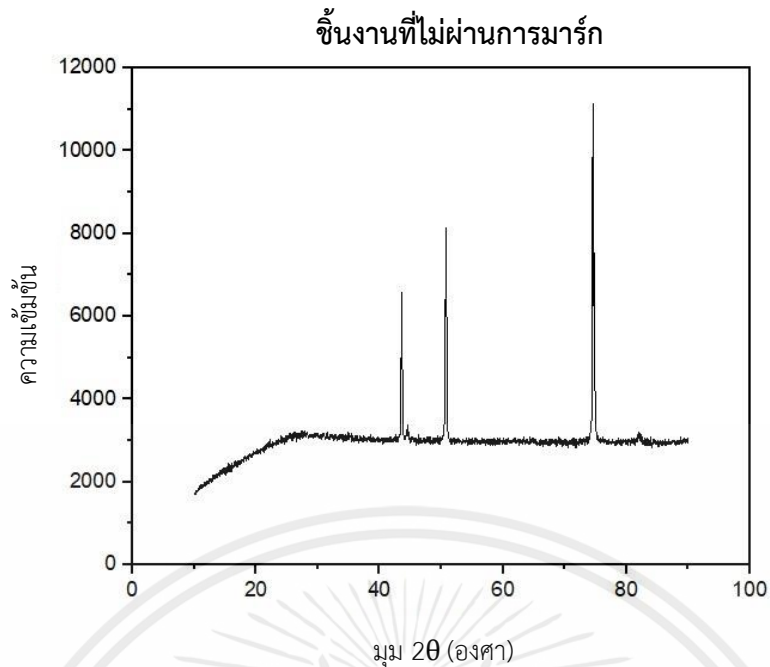
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิว (Ra) และความถี่ ในความเร็วที่ 1500 2500 และ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความเรียบผิว (Ra) และความถี่ สังเกตทั้ง 3 ความเร็วจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ ในช่วงความถี่ต่ำ เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นความเรียบผิวจะลดลง เมื่อเทียบกับค่าความเรียบผิวก่อนที่จะทำการมาร์ก และที่ความถี่สูง เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเรียบผิวเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับค่าความเรียบผิวก่อนที่จะทำการมาร์ก

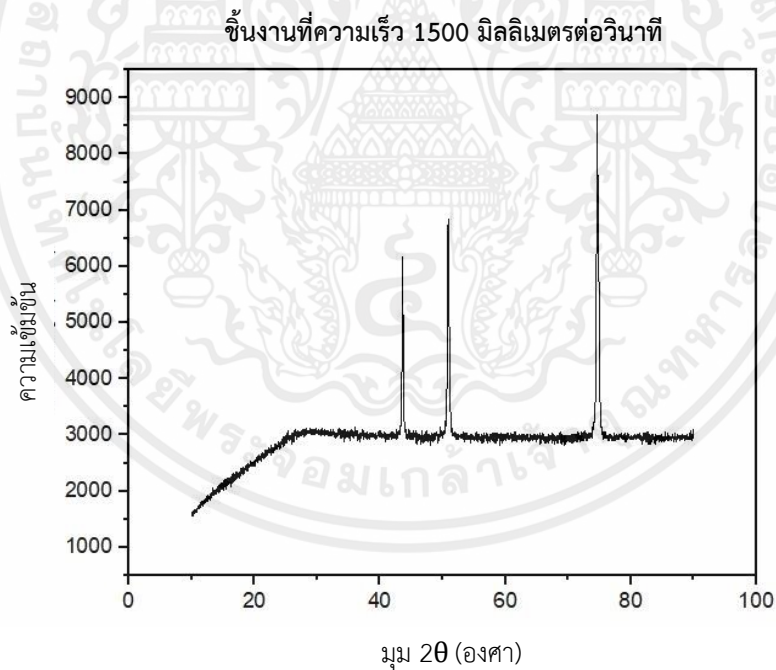
4.3 ผลการศึกษาความขรุขระ

4.3.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นออกไซด์ฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

หลังนำชิ้นงานไปตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) จะได้ข้อมูลเป็นความสัมพันธ์กราฟของผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ดังรูปที่ 4.3 4.4 4.5 และ 4.6

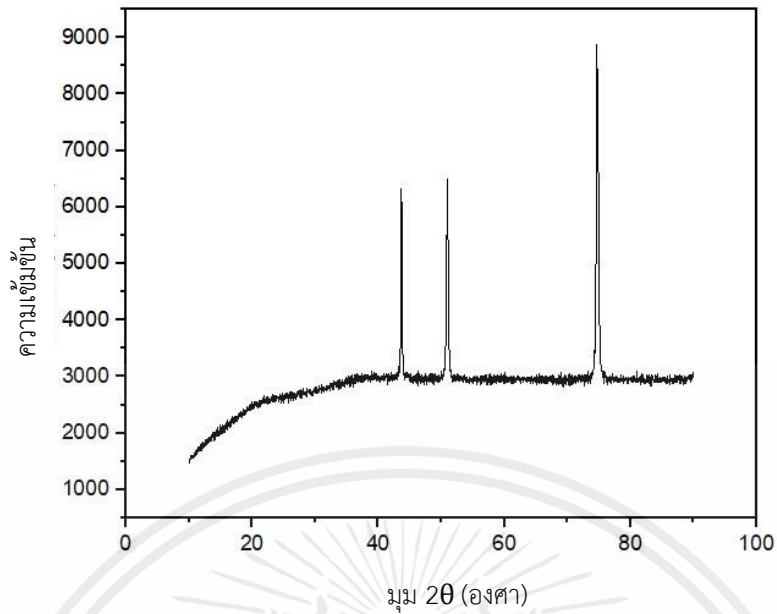


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด316L ที่ยังไม่ผ่านการมาร์กด้วยเลเซอร์



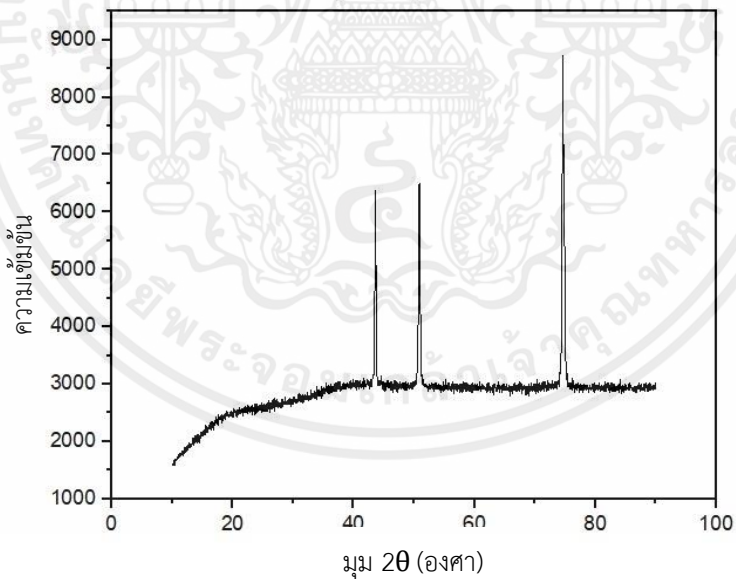
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันที่พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที

ชิ้นงานที่ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์
ความเร็ว 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที

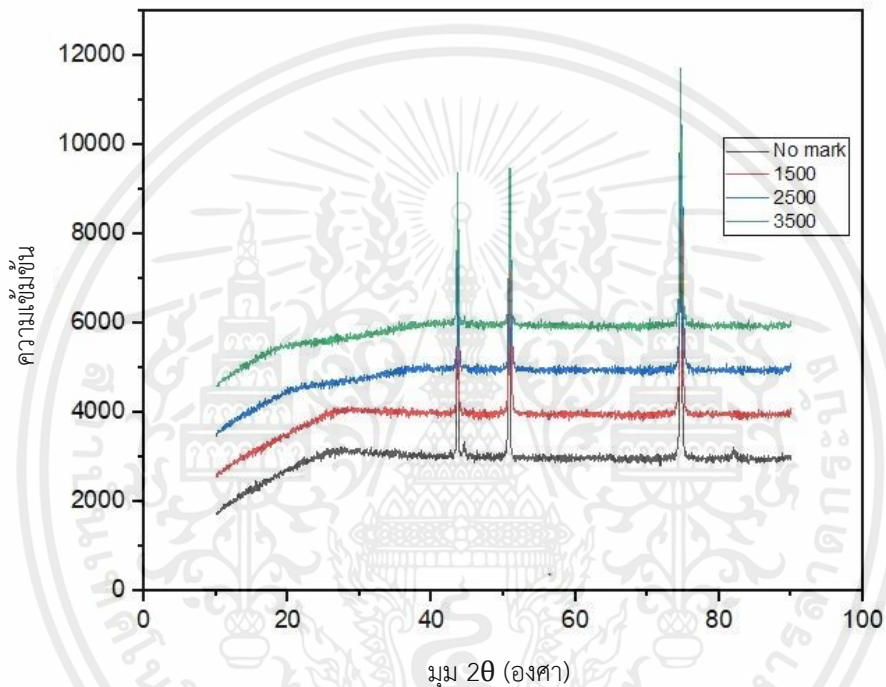
ชิ้นงานที่ความเร็ว 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์
ความเร็ว 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที

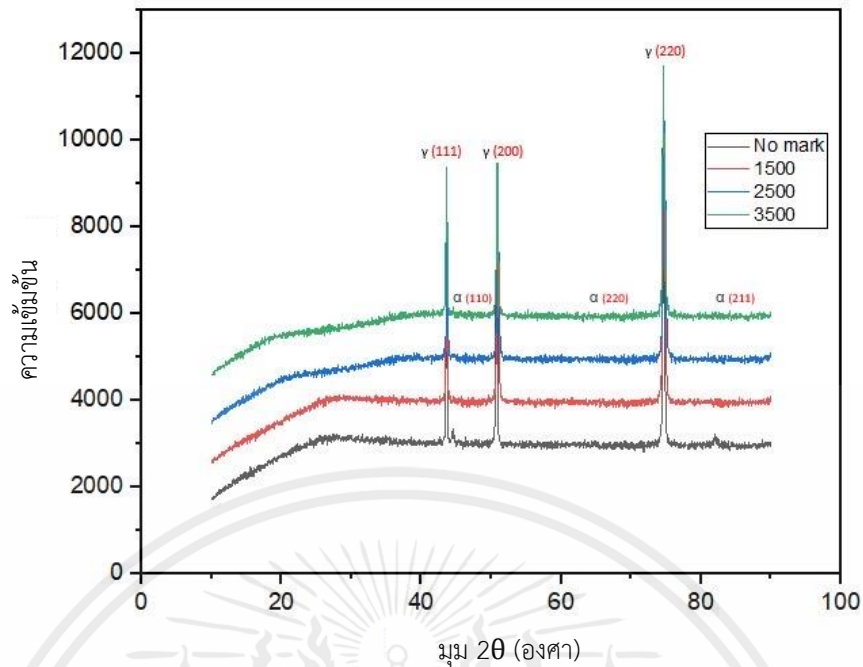
4.3.1.1 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นฟิล์มออกไซด์บนรอยมาร์กจากการมาร์กด้วยเลเซอร์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) จะเห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของรอยมาร์กที่ทั้ง 3 ความเร็วคือ 1500 2500 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ที่ยังไม่ผ่านการมาร์กด้วยเลเซอร์ มีผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่เหมือนกัน เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) จะยิงรังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดในองศาที่มาก ทำให้รังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับผลึกในชั้นเนื้อโลหะไม่ใช่ชั้นออกไซด์ ทำให้ผลของตัวอย่างทั้ง 4 ชั้นงานออกมากเหมือนกัน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของชั้นงานตัวอย่างทั้ง 4 ชั้น

ในขั้นตอนตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของชั้นฟิล์มออกไซด์บนรอยมาร์ก ทีมผู้วิจัยได้ใช้การตรวจสอบชั้นงานด้วยโปรแกรม Jade 5.0 สามารถตรวจสอบโครงสร้างผลึกจากผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันได้คือ พบโครงสร้างผลึก 2 ชนิด ซึ่งคือ เฟสออสเตไนต์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC และเฟสเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC ดังรูปที่ 4.8

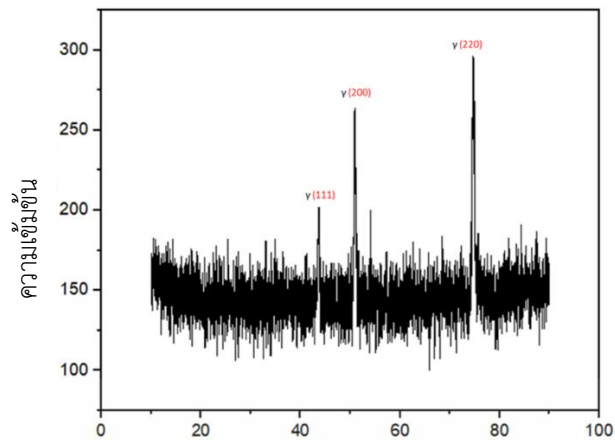


รูปที่ 4.8 โครงสร้างผลึกจากการวิเคราะห์ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้น

4.3.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นออกไซด์ฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD)

เนื่องจากผลของการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นออกไซด์ฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) มีผลที่เหมือนกันในทั้ง 4 ชิ้นงาน หมายความว่าเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ยิงรังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดในองศาที่มาก ทำให้รังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับผลึกในชั้นเนื้อโลหะ จึงให้วิธีการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD) ซึ่งจะเป็นเทคนิคที่ยิงรังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดในองศาที่น้อยกว่า โดยผู้วิจัยเลือกชิ้นงานรอยมาร์กที่พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที มาเป็นตัวอย่างการตรวจสอบ โดยเลือกควบคุมเงื่อนไซ 3 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลได้แก่ แกน $\theta/2\theta$ ความเร็ว 10 องศาต่อนาที แกน 2θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 10 องศาต่อนาที และ แกน 2θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 3 องศาต่อนาที ได้ผลดังนี้

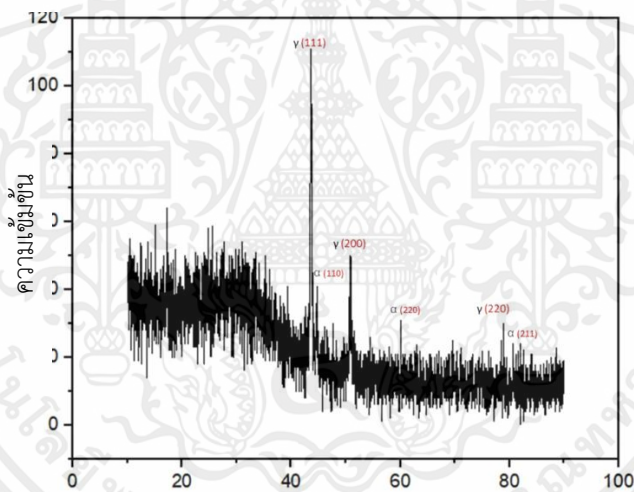
แกน $\theta/2\theta$ ความเร็ว 10 องศาต่ออนาที



มุม 2θ (องศา)

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผล GIXRD แกน $\theta/2\theta$ ความเร็ว 10 องศาต่ออนาทีของชิ้นงานตัวอย่าง พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที

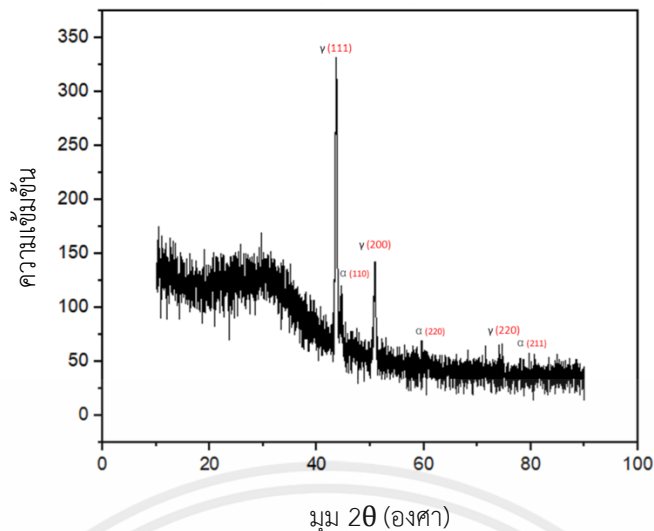
แกน 2θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 10 องศาต่ออนาที



มุม 2θ (องศา)

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผล GIXRD แกน 2θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 10 องศาต่ออนาทีของชิ้นงานตัวอย่าง พลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที

แกน 2θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 3 องศาต่อนาที



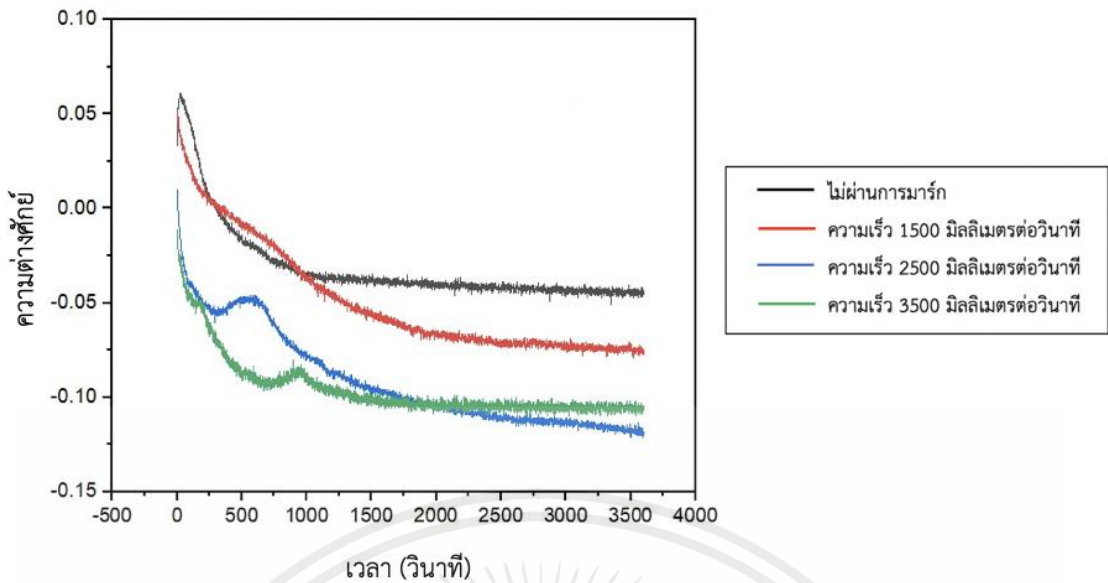
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผล GIXRD แกน 2θ ที่ ω 0.3 องศา ความเร็ว 3 องศาต่อนาทีของชิ้นงานตัวอย่าง
หลังงาน 90% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที

4.3.2.1 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

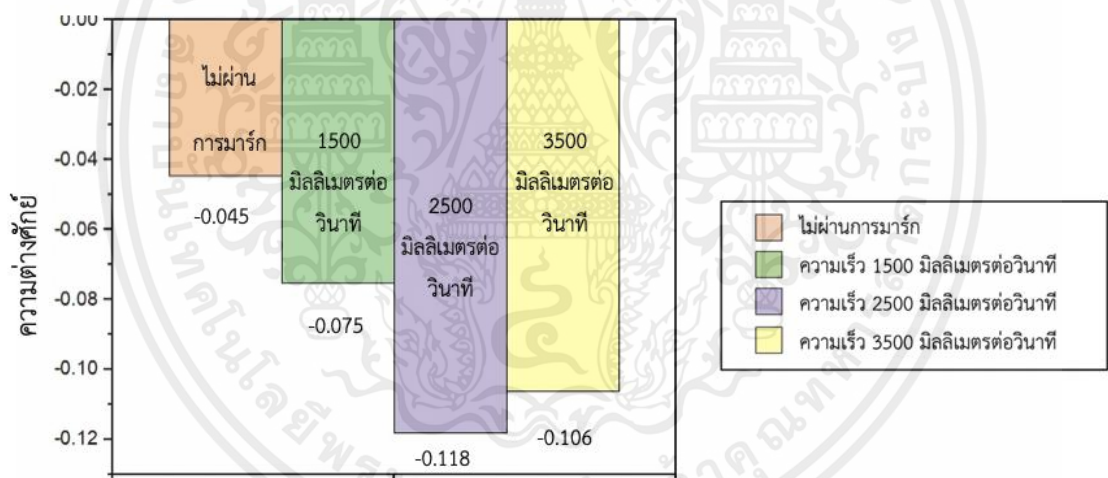
หลังจากการทดลองนำชิ้นงานที่คาดว่าจะสามารถตรวจพบเฟสออกไซด์ ซึ่งคือรอยมาร์กที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยมุมตกกระทบแบบแฉลบ (GIXRD) พบว่ายังสามารถพบเจอเฟสออสเทนไนต์และเฟสเฟอร์ไรต์ เหมือนการใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพียงแต่ค่าความหนาแน่นที่มุมตกกระทบต่ำนั้น มีค่าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) จุดสูงสุดเหล่านี้ที่มีความเข้มเพิ่มขึ้นที่มุมตกกระทบน้อยที่สุดจะบ่งชี้ว่ามีชั้นออสเทนไนต์บาง ๆ อยู่บนพื้นผิวด้านบน แม้แต่ในมุมในองศาที่น้อยลงหรือความเร็วการตรวจสอบช้าลงเพื่อเพิ่มความละเอียดในการตรวจสอบ ก็ยังตรวจสอบไม่พบพิกที่สอดคล้องกับเฟสออกไซด์ เนื่องจากอาจมีความหนาของฟิล์มนี้ (ความหนาของชั้นฟิล์มมีความหนาน้อยกว่า 0.04 มิลลิเมตร)

4.4 ผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน

หลังการตรวจสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานโดยวิธีศึกษาการทดสอบค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น Open circuit potential (OCP) ได้ผลดังรูปที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.12 กราฟศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (OCP) รวมของชิ้นงานที่รอยมาร์ก พลังงาน 80% ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ที่ความเร็ว 1500 2500 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที และชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการมาร์กด้วยเลเซอร์



รูปที่ 4.13 กราฟแท่งแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่สถานะคงที่ในเวลา 100 วินาทีสุดท้ายของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการมาร์ก และชิ้นงานที่ความเร็ว 1500 2500 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

4.4.1 วิเคราะห์ผลจากการทดลอง

จากกราฟศักย์ไฟฟ้าแบบเปิด (OCP) รวมของชิ้นงานที่รอยมาร์ก พลังงาน 80% ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ความเร็ว 1500 2500 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที และชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการมาร์กด้วยเลเซอร์ เห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มลดลงและเข้าสู่ช่วงคงที่ หมายถึงชิ้นงานได้มีการสูญเสียอิเล็กตรอนซึ่งก็คือเกิดการกัดกร่อนนั่นเอง กล่าวได้ว่ายิ่งชิ้นงานที่เข้าสู่ช่วงคงที่ช้า ก็จะมีการกัดกร่อนมาก ดังนั้นชิ้นงานที่ไม่ผ่านการมาร์ก จะเกิดการกัดกร่อนน้อยที่สุด ตามมาด้วยชิ้นงานที่ความเร็ว 1500 3500 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ด้วยข้อมูลที่ผู้วิจัยมีจากการวิเคราะห์ค่าสีและความขรุขระ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ค่าพลังงานมากจะทำให้บ่อหลอมมีขนาดใหญ่และก่อให้เกิดออกไซด์มาก รวมทั้งความถี่ที่น้อยจะทำให้เกิดระยะห่างระหว่างบ่อหลอมมาก ซึ่งรอบบริเวณบ่อหลอมจะเกิดออกไซด์ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบรูปจากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล ที่กำลังขยาย 20 เท่า จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ความเร็ว 1500 มิลลิเมตรต่อวินาที จะมีออกไซด์มากที่สุด ตามมาด้วยชิ้นงานที่ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที และ ชิ้นงานที่ 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.14 จึงสรุปได้ว่าการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์จะทำให้เกิดการกัดกร่อนมากขึ้น แต่ออกไซด์จะช่วยต้านทานการกัดกร่อน ดังนั้นรอยมาร์กที่มีออกไซด์มากจะต้านทานการกัดกร่อนได้มากกว่ารอยมาร์กที่มีออกไซด์น้อย



รูปที่ 4.14 รูปจากกล้องจุลทรรศน์สแกนด้วยเลเซอร์คอนโฟคอล ที่กำลังขยาย 20 เท่า ของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการมาร์ก และชิ้นงานที่ความเร็ว 1500 3500 2500 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

4.5 การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์

4.5.1 ผลกระทบจากค่าพลังงาน

จากผลของตัวแปรพลังงานต่อการศึกษาค่าสี เมื่อค่าพลังงานที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าของความคมชัดและค่าความเข้มของสีรอยมาร์กที่ได้รับผลกระทบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเป็นแนวโน้มที่ชัดเจน เนื่องจากเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ผิวหน้าของเหล็กจนเกิดออกไซด์ขึ้นที่พื้นผิว เมื่อพลังงานสูงขึ้น ขนาดของบ่อหลอมที่เกิดจากการทำเลเซอร์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.15 และเกิดสีของออกไซด์ที่มีความเข้มขึ้นตามพลังงานที่ได้รับผลกระทบ

จากผลของตัวแปรพลังงานต่อการศึกษาค่าความเรียบผิว เมื่อพลังงานสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการหลอมเหลวของโลหะของบ่อหลอม ทำให้ความเรียบผิวลดลง ในทางกลับกันเมื่อค่าพลังงานลดลงจะเกิดการหลอมเหลวของโลหะของบ่อหลอมลดลง และทำให้ความเรียบผิวมากขึ้น

ผลกระทบจากค่าพลังงาน ทำให้เกิดออกไซด์บนชิ้นผิวชิ้นงาน ยิ่งพลังงานสูงบริเวณรอบบ่อหลอมจะเกิดการไหม้และเกิดออกไซด์มาก แต่ที่บริเวณบ่อหลอมจะมีออกไซด์น้อยเนื่องจากเกิดการหลุดร่อนของพื้นผิว ทำให้เป็นบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย เมื่อเทียบกับบริเวณที่มีออกไซด์จากการมาร์กด้วยเลเซอร์มาก



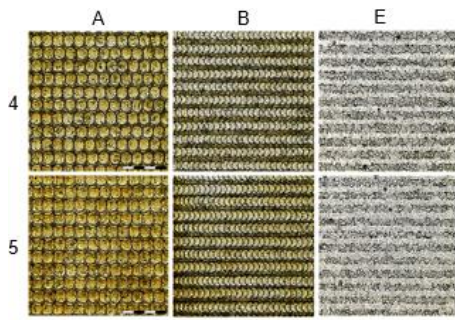
รูปที่ 4.15 แสดงผลกระทบของพลังงานกับขนาดของพื้นที่วงกลมบนรอยมาร์ค ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ และค่าพลังงานที่ 20% 50% 80% ตามลำดับ

4.5.2 ผลกระทบจากค่าความถี่

จากผลของตัวแปรความถี่ต่อการศึกษาค่าสี ที่ความถี่ต่ำ เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มสีจะมากขึ้น แต่ที่ความถี่สูงค่าความเข้มของสีจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีสีที่สว่างกว่าสีตั้งต้น เนื่องจากเมื่อความถี่สูงขึ้นจะไม่เกิดการสะสมของความร้อน แต่เกิดการหลุดร่อนพื้นผิวหน้าของในแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม 316L และไม่เกิดสีจากการไหม้รวมถึงออกไซด์ แต่จะทำให้สีสว่างขึ้นเนื่องจากผิวหน้าของชั้นออกไซด์ที่หลุดออกไป เกิดเป็นการขัดผิว จึงทำให้เห็นสีของชั้นเนื้อเหล็ก จนเมื่อพลังงานสูงพอที่จะเกิดการมาร์กและสามารถเห็นความเข้มขึ้นของสีแปรผันไปตามค่าพลังงาน

จากผลของตัวแปรความถี่ต่อการศึกษาค่าความเรียบผิว ที่ความถี่สูงจะทำให้ความเรียบผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการซ้อนทับกันของรอยมาร์กที่ได้รับผลกระทบจากค่าพลังงาน ดังรูปที่ 4.16 เมื่อเกิดการขัดที่ผิวหน้าของชิ้นงานจะทำให้ค่าความเรียบผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ที่ความถี่ต่ำจะทำให้การทับซ้อนกันของรอยมาร์กลดลง ขอบของบ่อหลอมที่ไม่ทับซ้อนกันก็จะทำให้ความเรียบผิวลดลง

ผลกระทบจากค่าความถี่บ่งบอกถึงความห่างของแต่ละบ่อหลอมบนแนวเลเซอร์หรือการทับซ้อนกันของบ่อหลอม ซึ่งจะสอดคล้องกับผลกระทบจากค่าพลังงานคือการเกิดออกไซด์ กล่าวได้ว่า ที่ความถี่ต่ำจะมีออกไซด์บริเวณรอยมาร์กมากกว่าที่ความถี่สูง เนื่องจากการทับซ้อนกันของบ่อหลอม ทำให้ที่ความถี่สูงมีเพียงบริเวณที่เป็นบ่อหลอมอยู่บนผิวชิ้นงาน จึงเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าที่ความถี่ต่ำ



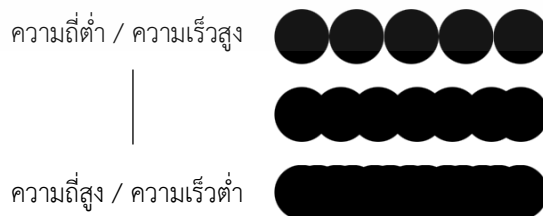
รูปที่ 4.16 แสดงผลกระทบของความถี่กับขนาดของการซ้อนทับกันของวงกลมบนรอยมาร์ค ที่พลังงาน 50% และ 60% (แนวนอน) ความถี่ 50 100 250 กิโลเฮิร์ตซ์ (แนวตั้ง) ตามลำดับ

4.5.3 ผลกระทบจากค่าความเร็ว

ตัวแปรความเร็วมีความสอดคล้องกันกับตัวแปรพลังงานและความถี่ กล่าวได้คือ เมื่อควบคุมค่าพลังงานให้คงที่ ที่ความเร็วต่ำขนาดของบ่อหลอมจะใหญ่เช่นเดียวกับที่พลังงานสูง ที่ความเร็วสูงขนาดของบ่อหลอมจะเล็กกว่า เช่นเดียวกับที่พลังงานต่ำ ดังรูปที่ 4.17 และเมื่อควบคุมความถี่ให้คงที่ ที่ความเร็วต่ำจะเกิดการทับซ้อนกันของบ่อหลอมมากเช่นเดียวกับที่ความถี่สูง และที่ความเร็วสูงจะเกิดการทับซ้อนกันของบ่อหลอมน้อยเช่นเดียวกับที่ความถี่ต่ำ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดบ่อหลอม ระหว่างความถี่และความเร็ว



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์การเกิดการทับซ้อนกันของรอยมาร์ค ระหว่างความถี่และความเร็ว

4.5.4 สรุปผลกระทบจากตัวแปรที่มีผลต่อการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์

ในการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ในแต่ละจุด จะเกิดการหลุดร้อนของพื้นผิววัตถุ และเกิดการไหม้บริเวณรอบบ่อหลอม จึงส่งผลให้เกิดสี ความเรียบผิว และออกไซด์ที่แตกต่างกัน หลังจากทำการศึกษาสึบนพื้นผิวของวัตถุ ความเรียบผิว และพฤติกรรมการกัดกร่อนของการเกิดออกไซด์จากการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ จึงสามารถสรุปผลกระทบจากตัวแปรของการทำการมาร์กด้วยเลเซอร์ ลงบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L ซึ่งได้แก่ ค่าพลังงาน ความถี่ และ ความเร็ว ได้ดังนี้

ตัวแปรพลังงานส่งผลต่อขนาดและความลึกของบ่อหลอม การเกิดออกไซด์ และการเกิดการไหม้บริเวณรอบบ่อหลอม ตัวแปรความถี่ ส่งผลต่อการทับซ้อนกันของบ่อหลอม รวมถึงการสะสมพลังงานความร้อนที่จะทำให้เกิดการไหม้บริเวณรอบบ่อหลอม ส่วนตัวแปรความเร็ว จะสอดคล้องกับทั้งตัวแปรพลังงานและความถี่



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะของการพัฒนาความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียมโมลิบดีนัมโดยการเติมธาตุเจือ ซึ่งแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการทำมาร์กด้วยเลเซอร์ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความคมชัด ค่าความหยาบผิว และพฤติกรรมการกัดกร่อน ของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L หลังจากการทำมาร์กด้วยเลเซอร์ เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมทางการแพทย์ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้อุปกรณ์ปลูกฝังทางการแพทย์ได้รับการพัฒนาตาม ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ปลูกฝังทางการแพทย์นั้นมีหลากหลายประเภทตามการใช้งาน ซึ่งปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เลือกศึกษา เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เนื่องจากโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน การสึกหรอและแรงเสียดทานได้ดี และยังมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกาย นอกจากนี้ยังพบว่า

เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L เป็นวัสดุที่มักถูกนำมาใช้ในงานทางการแพทย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีความเป็นกรดหรือด่างสูง เช่น เซลล์และอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่มีการติดตั้งที่ใกล้ชิดกับร่างกายของมนุษย์ นอกจากนี้ สิ่งที่ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L นั้นมีคุณสมบัติต่อไวรัสและแบคทีเรียที่ดีและมีการยึดหยุ่นในการออกแบบสินค้ามาก เพราะโลหะเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316L นั้นเป็นวัสดุที่สามารถอยู่ในร่างกายได้ (Biocompatible) ซึ่งหมายความว่ามันสามารถนำมาใช้ในการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่มีการติดตั้งได้ในร่างกายของมนุษย์ได้โดยไม่ก่อให้เกิดภาวะแพ้หรือปฏิกิริยากับร่างกาย

เราได้ทำการควบคุมตัวแปรของการทำเลเซอร์ทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ ค่าความเร็ว ความถี่ และพลังงาน ในการยิงเราจะกำหนดขอบเขตตัวแปรดังนี้ ค่าความเร็ว 1500 2500 และ 3500 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าความถี่อยู่ที่ 50-400 กิโลเฮิร์ต และควบคุมพลังงานที่ 20-90% จากการศึกษาผลกระทบเราได้สรุปว่า เมื่อค่า พลังงานเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มของรอยมาร์กชัดขึ้น หรือ ค่าคอนทราสต์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วและความถี่ จะทำให้รอยมาร์กไม่ชัด เมื่อเพิ่มความถี่ถึงจุดหนึ่งจะกลายเป็นการขีดที่ผิว ทำให้พื้นผิวส่องสว่างขึ้นหรือคอนทราสต์ติดลบนั่นเอง ต่อมาเมื่อเราเพิ่มความถี่ จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง และสุดท้าย เมื่อเพิ่มความเร็วอัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นจาก 1500 3500 และ 2500 ตามลำดับ เนื่องจากชนิดของออกไซด์มีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการกัดกร่อน โดยจากรูปที่กำลังขยาย 20 เท่า พื้นที่ที่มีสีดำมากกว่าจะมีอัตราการกัดกร่อนที่น้อยกว่าพื้นที่ที่มีการซ้อนทับกันมากกว่า โดยจะมีตัวแปรที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความเร็ว ความถี่ และพลังงานได้นั้นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การซ้อนทับกันของรอยมาร์ก (Overlap coefficient)

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบจะต้องระมัดระวังเรื่องการปนเปื้อนของคราบน้ำมันจากเครื่องตัดและรอยนิ้วมือจากผู้ทำการเตรียม เนื่องจากรอยมาร์กที่เราจะนำไปทดสอบจะต้องนำไปทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อน จึงมีโอกาสที่ค่าจะคลาดเคลื่อนเนื่องจากการปนเปื้อน อีกทั้งออกไซด์ที่เกิดขึ้นยังสามารถหลุดออกมาได้ง่ายเมื่อมีการเสียดสีที่เล็กน้อย

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกบนพื้นผิวชิ้นงานด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) หลังการทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายของเหลวในร่างกายเทียม ไม่พบเฟสอื่น อาจจะเป็นเพราะเนื่องจากว่าชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นบางจนทำให้รังสีทะลุไปที่เนื้อผิวของโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L หากนำชิ้นงานทดสอบไปวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบธาตุทางเคมีบริเวณพื้นผิวด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) จะทำให้ทราบว่าเกิดฟิล์มชนิดใดบนพื้นผิวของชิ้นงานเพื่อสนับสนุนข้อสรุปได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.K. Lawrence, D.P. Adams, D.F. Bahr, N.R. Moody (2013), Mechanical and electromechanical behavior of oxide coatings grown on stainless steel 304 L by nanosecond pulsed laser irradiation, Surf Coat Tech 235.
- [2] B. Dusser, Z. Sagan, H. Soder, N. Faure, J.P. Colombier, M. Jourlin, E. Audouard (2010), Controlled nanostructures formation by ultra fast laser pulses for color marking, Opt Express 18 (3) 2913–2924.
- [3] S. Valette a,*, P. Steyer b, L. Richard c, B. Forest c, C. Donnet a, E. Audouard a (2006), Influence of femtosecond laser marking on the corrosion resistance of stainless steels, Applied Surface Science 252.
- [4] Y.F. Xiang a, R.L. Mei a, F. Azad c, L.Z. Zhao a, S.C. Su a,b,*, G.G. Lu d,*, S.P. Wang e (2022), Investigation by nanosecond fiber laser for hybrid color marking and its potential application, Optics & Laser Technology 147.
- [5] Sykaras N, Iacopino AM, Marker VA, Triplett RG, Woody RD (2000). Implant materials, designs, and surface topographies: their effect on osseointegration. A literature review. Int J Oral Maxillofac Implants ; 15: 675-690 [PMID: 11055135]
- [6] Monika Saini, Yashpal Singh, Pooja Arora, Vipin Arora, Krati Jain (2015), Implant biomaterials: A comprehensive review, World J Clin Cases 2015 January 16; 3(1): 52-57 ISSN 2307-8960 (online)
- [7] Parr G, Hanson A. An Introduction to Stainless Steel (1965). Materials Park: ASM.
- [8] Erickson A R, Wiech R E. Metals Handbook (1994). Materials Park: ASM Federation.
- [9] Kovach, Curtis W. (2002). "High Performance Stainless Steels". Nickel Institute.
- [10] Gould, R. Gordon (1959). "The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. in Franken, P.A. and Sands, R.H. (Eds.). The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan, 15 June through 18 June 1959. pp. 128. OCLC 02460155.
- [11] นพพร รัตนช่วง.ม.ป.ป.คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ยุคใหม่ (01420222). คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.(อัครา).
- [12] ธีชัย ตระกูลเลิศยศ. 2559. LASER Part I : แสง LASER คืออะไร , มีคุณสมบัติอย่างไร. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://www.scimath.org/article/item/4827-laser-part-i-laser>

- [13] วีทิต วรรณเลิศลักษณ์.2560. เลเซอร์ (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7263-2017-06-13-13-39-22>
- [14] The American Iron and Steel Institute (AISI) also has information on stainless steel and its properties: <https://www.steel.org/stainless-steel>
- [15] Specialty Steel Industry of North America (SSINA). (2017). Stainless Steel in Medical Applications.: <https://www.ssina.com/articles/medical-applications-of-stainless-steel>
- [16] International Stainless Steel Forum (ISSF). (2020). Medical Devices Made of Stainless Steel. : <https://www.worldstainless.org/Applications/Medical-Devices>
- [17] Poynton, C. (2012). Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces. Elsevier.
- [18] Fairchild, M. D. (2013). Color appearance models. John Wiley & Sons.
- [19] Yendrikhovskij, S. N. (1998). On the problem of evaluation of color differences in CIELAB space. Color research & application, 23(2), 84-87.
- [20] Bhushan, B. (1999). Principles and applications of tribology. John Wiley & Sons.
- [21] Blunt, L. (2002). The measurement of roughness. In Handbook of surface and nanometrology (pp. 191-217). Taylor & Francis.
- [22] Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). Elements of X-ray diffraction (3rd ed.). Prentice Hall.
- Jenkins, R., & Snyder, R. L. (1996). Introduction to X-ray powder diffractometry. John Wiley & Sons.
- [23] Scardi, P., & Leoni, M. (2014). Advances in X-ray analysis. International Centre for Diffraction Data.
- [24] Birkholz, M. (2006). Thin Film Analysis by X-ray Scattering. John Wiley & Sons.
- [25] Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). Elements of X-ray Diffraction. Prentice Hall.
- [26] ASTM G1-03(2019), Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [27] ASTM G3-14, Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [28] ISO9227:2017, Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray tests, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017.
- [29] ISO 10993-15:2000. Biological evaluation of medical devices – Part 15: Identification and quantification of degradation products from polymeric medical devices. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.