

กรณีศึกษาของตัวแปรการตัดที่มีต่อการตัดด้วยแสงเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์
ที่มีผลต่อความกว้างและความหยาบของรอยตัดในเหล็กเหนียว

CASE STUDY ON EFFECTS OF CO₂ LASER CUTTING PARAMETERS ON
KERF WIDTH AND SURFACE ROUGHNESS OF MILD STEEL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-030-027

กรณีศึกษาของตัวแปรการตัดที่มีต่อการตัดด้วยแสงเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์
ที่มีผลต่อความกว้างและความหยาบของรอยตัดในเหล็กเหนียว

CASE STUDY ON EFFECTS OF CO₂ LASER CUTTING PARAMETERS ON
KERF WIDTH AND SURFACE ROUGHNESS OF MILD STEEL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-030-027

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีศึกษาของตัวแปรการตัดที่มีต่อการตัดด้วยแสงเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์
ที่มีผลต่อความกว้างและความหยาบของรอยตัดในเหล็กเหนียว



คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-030-027

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CASE STUDY ON EFFECTS OF CO₂ LASER CUTTING PARAMETERS ON
KERF WIDTH AND SURFACE ROUGHNESS OF MILD STEEL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

KMITL-2019-EN-M-030-027

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ กรณีศึกษาของตัวแปรการตัดที่มีต่อการตัดด้วยแสงเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อความกว้างและความหยาบของรอยตัดในเหล็กเหนียว

Thesis Title Case Study on Effects of CO₂ Laser Cutting Parameters on Kerf Width and Surface Roughness of Mild Steel

นักศึกษา นายภัทรภรณ์ คงเจริญ

รหัสประจำตัว 58601121

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2019-EN-M-030-027

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ฐิตะพล	หุชนะนันท์	
ผศ.ดร.เอกพงษ์	ตันตราภรณ์	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ดร.จิตราภรณ์	วงศางาม	
ดร.มธุรส	สุชาติวัฒน์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2562 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กรณีศึกษาของตัวแปรการตัดที่มีต่อการตัดด้วยแสงเลเซอร์
	คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อความกว้างและความหยابของรอยตัดในเหล็กเหนียว
นักศึกษา	นายภัทรภรณ์ คงเจริญ
รหัสนักศึกษา	58601121
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาถึงผลของตัวแปรการตัดต่างๆที่มีต่อเหล็กกลมขนาด 3 mm ด้วยเลเซอร์ โดยตัวแปรการตัดที่พิจารณาประกอบไปด้วย กำลังของแสงเลเซอร์ ความดันแก๊สออกซิเจนและความเร็วในการตัด คุณภาพของรอยตัดจะพิจารณาจากระยะความกว้างของรอยตัดและค่าความหยابบนผิวด้านข้างของรอยตัด ในการทดลองนี้จะใช้เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แบบคลื่นต่อเนื่องซึ่งให้กำลังสูงสุดอยู่ที่ 4 kW การศึกษาจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะเป็นการทดลองเพื่อพิจารณาผลของตัวแปรการตัดที่มีต่อความกว้างของรอยตัดและค่าความหยابบนผิวด้านข้างของรอยตัด ค่าของตัวแปรที่ใช้คือ กำลังของแสงเลเซอร์ มีค่าเท่ากับ 2,000 2,200 และ 2,400 W ความดันแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 0.07 0.12 และ 0.17 MPa ส่วนความเร็วการตัดที่ใช้ คือ 3,100 3,400 และ 3,700 mm/min ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า เมื่อเพิ่มกำลังเลเซอร์ ความกว้างเฉลี่ยของรอยตัดจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยยังมีผลต่อค่าความหยابของรอยตัด โดยพบว่าเมื่อความดันแก๊สช่วยเพิ่มขึ้น ความหยابบนผิวของรอยตัดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดแคบลง และผิวของรอยตัดมีความเรียบขึ้น และการศึกษาในส่วนที่สอง เป็นการนำเสนอสมการสหสัมพันธ์ของความกว้างและความหยابผิวของรอยตัด เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการสหสัมพันธ์กับการทดลอง สำหรับความกว้างของรอยตัด พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่ถึง 1 % และสำหรับความหยابในรอยตัด พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 6 ถึง 11 %

Thesis	Case Study on Effects of CO ₂ Laser Cutting Parameters on Kerf Width and Surface Roughness of Mild Steel
Student	Mr. Phattaraporn Kongcharoen
Student ID.	58601121
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Dr. Maturose Suchatawat

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the effects of the process parameters on laser cutting of 3 mm thick mild steel plates. The parameters investigated includes laser power, gas pressure and cutting speed. The cut quality was examined by kerf width and cut edge roughness. The laser source used is a continuous wave CO₂ laser with maximum power of 4 kW. The study consisted of two parts. In the first part is an experiment to determine the effect of cutting parameters on the kerf width and the cut edge roughness. The cutting parameters include laser power of 2,000, 2,300 and 2,400 W, oxygen gas pressure of 0.07, 0.12 and 0.17 MPa and cutting speed of 3,100, 3,400 and 3,700 mm/min respectively. The results show that as the laser power increases, the average kerf width is increased. Oxygen gas pressure also has a remarkable effect on the cut edge roughness. It is found that as the gas pressure increases, the roughness is increased. Increasing of the cutting speed gives the narrower average kerf width and the smoother cut surface. The second part of this study presents the correlations for kerf width and roughness. The percentages are less than 1 % and ranged from 6 to 11 % respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกคนที่มีส่วนร่วมในการช่วยสนับสนุนในการทำวิจัย โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้แนวคิด คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนแก้ไขปัญหาตลอดจนหนทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจนประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณบริษัท ซีโต้ เมทอล จำกัด ที่ให้ความกรุณาในการเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทดลองในการทำวิจัยครั้งนี้จนเป็นผลสำเร็จ

สุดท้ายต้องขอขอบคุณทุกคนที่คอยให้กำลังใจที่จะสู้กับปัญหาและอุปสรรคต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินงานวิจัย ทั้งบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง และครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และประสบการณ์แก่ข้าพเจ้า

ภัทราภรณ์ คงเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญ (ต่อ)	V
สารบัญ (ต่อ)	VI
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
สารบัญรูป (ต่อ)	IX
สารบัญรูป (ต่อ)	X
รายการสัญลักษณ์.....	XI
รายการสัญลักษณ์ (ต่อ).....	XII
รายการสัญลักษณ์ (ต่อ).....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 สมมติฐานการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	4
2.1 ผลของแก๊สต่างๆที่มีผลต่อการตัดโลหะด้วยเลเซอร์	4
2.2 ผลของแก๊สออกซิเจน กำลังเลเซอร์ และความเร็วตัดที่มีผลต่อการตัดโลหะด้วย เลเซอร์.....	4
2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความกว้างรอยตัดในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีบทพื้นฐาน	10
3.1 เลเซอร์	10
3.2 คุณสมบัติทั่วไปของแสงเลเซอร์.....	10
3.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์และวิธีการกระตุ้น.....	11
3.4 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์.....	13
3.5 กลไกการตัดด้วยเลเซอร์.....	19
3.6 ตัวแปรที่มีผลต่อการตัดด้วยเลเซอร์	23
3.7 ลักษณะเฉพาะในรอยตัดที่เกิดจากการตัดเลเซอร์	36
3.8 การวัดความหยابของพื้นผิว	38
3.9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์	41
3.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน	49
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย	54
4.1 การออกแบบการทดลอง.....	54
4.2 การดำเนินการตัด	54
4.3 การตรวจสอบความกว้างของรอยตัด	56
4.4 การตรวจสอบความหยابผิวของรอยตัด	56
4.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ	57
4.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความแปรปรวน	59
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	60
5.1 ผลการทดลอง	60
5.2 การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของระยะความกว้างและความหยابของรอยตัด.....	69
5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของระยะความกว้างและความหยابของรอยตัด.....	70
5.4 การสร้างสมการสหสัมพันธ์	76
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	81
6.1 สรุปผลการวิจัย	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2 สรุปผลจากการวิเคราะห์ถดถอยและการสร้างสมการสหสัมพันธ์	81
6.3 สรุปผลสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้.....	82
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก ก ประวัติและชนิดของเลเซอร์.....	88
ภาคผนวก ข ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	97
ภาคผนวก ค ค่าความกว้างรอยตัดที่ได้จากการทดลอง.....	98
ภาคผนวก ง รูปถ่ายจากการวัดความกว้างรอยตัด.....	106
ภาคผนวก จ ค่าความหยาบผิวในรอยตัดที่ได้จากการทดลอง.....	120
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองทั้งหมด.....	125
ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์ความถดถอยจากโปรแกรม SPSS.....	126
ภาคผนวก ซ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากโปรแกรม SPSS.....	132
ภาคผนวก ฌ การคำนวณขนาดความกว้างรอยตัดโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์.....	140
ภาคผนวก ฎ ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	144
ประวัติผู้เขียน	156

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สรุปการใช้ค่าพารามิเตอร์ของนักวิจัยในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์	9
3.1 พลังงานความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับโลหะชนิดต่างๆ	21
3.2 วิธีการตัดเลเซอร์สำหรับวัสดุแบบต่างๆ	23
4.1 แสดงตัวแปรต่างๆในการทดลองตัดด้วยเลเซอร์	55
5.1 ผลการทดลอง	65
5.2 การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของความกว้างรอยตัด	69
5.3 การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของความหยาบในรอยตัด	70
5.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความกว้างรอยตัดกับกำลัง ของเลเซอร์.....	70
5.5 ผลความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของความกว้างรอยตัดกับกำลังของเลเซอร์.....	71
5.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความกว้างรอยตัดกับ ความดันของแก๊สช่วย.....	72
5.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความกว้างรอยตัดกับ ความเร็วตัด	72
5.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความหยาบผิวในรอยตัด กับกำลังของเลเซอร์	73
5.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความหยาบผิวในรอยตัด กับความดันของแก๊สช่วย	73
5.10 ผลความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของความหยาบในรอยตัดกับความดันของแก๊สช่วย.....	74
5.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความกว้างรอยตัด กับความเร็วตัด	75
5.12 ผลความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวในรอยตัดกับความเร็วตัด.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูป	หน้า
3.1 ลักษณะของคลื่นแสง (ก) คลื่นแสงเลเซอร์ (ข) คลื่นแสงตามธรรมชาติ	11
3.2 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์	12
3.3 การเลือกใช้เลเซอร์ชนิดต่างๆโดยแบ่งตามความยาวคลื่นและกำลังเฉลี่ย แสดงบนการใช้งาน ประเภทต่างๆ.....	12
3.4 ความหนาแน่นของกำลังของเลเซอร์กับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการต่างๆ ของเลเซอร์.....	15
3.5 การทำให้ผิวแข็งด้วยเลเซอร์	15
3.6 การเชื่อมด้วยเลเซอร์	16
3.7 การตัดด้วยเลเซอร์	17
3.8 การเจาะด้วยเลเซอร์	17
3.9 การแกะสลักด้วยเลเซอร์	18
3.10 การทำตราประทับด้วยเลเซอร์	18
3.11 กลไกในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์	19
3.12 แผนภาพแสดงลักษณะของการตัดด้วยเลเซอร์แบบฟิวชั่น	20
3.13 แผนภาพแสดงลักษณะของการตัดด้วยเลเซอร์แบบออกซิเดชัน	21
3.14 แผนภาพแสดงลักษณะของการตัดด้วยเลเซอร์แบบ Vaporization	22
3.15 ผังก้างปลาสำหรับตัวแปรที่มีผลต่อการตัดด้วยเลเซอร์	24
3.16 ตัวอย่างลักษณะของโหมดตามขวางชนิดต่างๆของแสงเลเซอร์	25
3.17 การดูคลื่นแสงของวัสดุและความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดต่างๆ	26
3.18 ผลของระนาบของการโพลาไรซ์ของเลเซอร์กับคุณภาพการตัด	27
3.19 หัวตัดชนิดต่างๆสำหรับการตัดเลเซอร์	33
3.20 ความเร็วตัดสำหรับเหล็กเหนียวที่กำลังของเลเซอร์ค่าต่างๆและแนวทางสำหรับการเลือกใช้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูของหัวตัดและความดันแก๊สออกซิเจน	34
3.21 การรวมแสงของเลเซอร์ด้วยเลนส์นูนและกระจกเว้า	35
3.22 แผนภาพการรวมแสงของเลเซอร์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.23 แถบรีวในรอยตัด (Striation)	36
3.24 หยดวัสดุที่แข็งตัว (Dross).....	37
3.25 บริเวณกระทบร้อน (Heat-affected zone: HAZ).....	38
3.26 เครื่องวัดความหยาบรุ่น Mitutoyo Surftest SJ-310	38
3.27 แสดงตัวอย่างในการหาค่าความหยาบเฉลี่ย (Ra)	39
3.28 แสดงตัวอย่างในการหาค่าความหยาบสูงสุด (Ry)	40
3.29 แสดงตัวอย่างในการหาค่าความหยาบของพื้นผิวแบบลิบจุด (Rz)	40
3.30 แสดงค่า β_1 เมื่อตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) มีความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรง	42
4.1 เครื่องตัดเลเซอร์ FANUC C4000	54
4.2 แผนภาพการตัดเลเซอร์	55
4.3 ชิ้นงานตัวอย่าง	55
4.4 ตำแหน่งการวัดความกว้างรอยตัด (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง	56
4.5 รูปถ่ายความกว้างรอยตัดจากกล้องจุลทรรศน์ (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง	56
4.6 ตำแหน่งการวัดความหยาบบนรอยตัด	57
4.7 ความขรุขระบนพื้นผิวของรอยตัด	57
5.1 ตัวอย่างแสดงการวัดความกว้างรอยตัดที่ได้จากการทดลอง (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง	60
5.2 ผลของความกว้างรอยตัดเนื่องจากกำลังของเลเซอร์ (ความดันแก๊สออกซิเจน = 0.17 MPa)..	61
5.3 ผลของความกว้างรอยตัดเนื่องจากความเร็วตัด (ความดันแก๊สออกซิเจน = 0.17 MPa)..	61
5.4 ผลของความดันแก๊สออกซิเจนที่มีต่อความกว้างรอยตัด (ก) กำลังเลเซอร์ = 2000 W, (ข) กำลังเลเซอร์ = 2200 W และ (ค) กำลังเลเซอร์ = 2400 W	62
5.5 ผลของความเร็วตัดที่มีต่อความหยาบของรอยตัด (ก) กำลังเลเซอร์ = 2000 W, (ข) กำลังเลเซอร์ = 2200 W และ (ค) กำลังเลเซอร์ = 2400 W	66
5.6 ผลของกำลังของเลเซอร์ที่มีต่อความหยาบของรอยตัด (ก) ความเร็วตัด = 3100 mm/min, (ข) ความเร็วตัด = 3400 mm/min และ (ค) ความเร็วตัด = 3700 mm/min.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
5.7 ผลของความดันแก๊สออกซิเจนที่มีต่อความหยาบของรอยตัด (ก) กำลังเลเซอร์ = 2000 W, (ข) กำลังเลเซอร์ = 2200 W และ (ค) กำลังเลเซอร์ = 2400 W	68
5.8 กราฟแสดงผลของกำลังของเลเซอร์ต่อความกว้างของรอยตัดเฉลี่ย	71
5.9 กราฟแสดงผลของความดันแก๊สช่วยต่อความหยาบผิวในรอยตัดเฉลี่ย	74
5.10 กราฟแสดงผลของความดันแก๊สช่วยต่อความหยาบผิวในรอยตัดเฉลี่ย	76
5.11 แสดงการสร้างสมการสหสัมพันธ์ของความกว้างของรอยตัด	79
5.12 แสดงการสร้างสมการสหสัมพันธ์ของความหยาบในรอยตัด	80



รายการสัญลักษณ์

A	=	Effective energy coupling factor ที่ผิววัสดุที่เกิดขึ้นขณะกระบวนการตัด
A	=	พื้นที่หน้าตัดของลำแสงเลเซอร์ [mm]
A_0	=	การอธิบายสมการของอัตราการถ่ายเทพลังงาน [m^3/J]
A_3	=	การสูญเสียพลังงานจากการนำความร้อนในวัสดุในเฟสของของแข็ง [$(m^2 s^{-1})^{1/2}$]
B	=	สัมประสิทธิ์ความถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปรพร้อมทั้งค่าคงที่เพื่อนำมาใช้ในการสร้างสมการพยากรณ์
b_j	=	สัมประสิทธิ์ความถดถอยของตัวแปรอิสระที่ $j : j = 1, 2, \dots, k$
$Beta$	=	สัมประสิทธิ์ความถดถอย (Standardized regression coefficient)
DOF	=	ช่วงความลึกของโฟกัส (Depth of focus)
e	=	ความคลาดเคลื่อน (Error)
f	=	เศษส่วนของความดันที่ลดลงในรอยตัด (fraction of pressure of pressure drop in the kerf)
HAZ	=	บริเวณกระทบร้อน (Heat-affected zone)
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นงาน [W/mK]
k	=	จำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด
$MS_{a,bl}$	=	ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนระหว่าง Block (Mean squares interactions)
MS_b	=	ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean squares between groups)
MSE	=	ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean of squares error)
MS_w	=	ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean squares within groups)
M_w	=	น้ำหนักโมเลกุล ในหน่วย กรัมต่อโมล [g/mol]
P	=	กำลังของเลเซอร์ [W]
p	=	ความน่าจะเป็น (Probability)
P_d	=	ความหนาแน่นของกำลัง, [W/mm^2]
P_g	=	ความดันของแก๊สช่วย [kPa]
Ra	=	ความหยาบผิวเฉลี่ย (Average roughness)
Rc	=	ความสูงกลางของลักษณะความหยาบ (The mean height of the roughness)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

Rq	=	ความหยาบผิวรากกำลังสองเฉลี่ย (The root mean square roughness)
Rp	=	จุดสูงสุดของความหยาบ (The maximum peak height)
Rv	=	จุดต่ำสุดของความหยาบ (The maximum valley height)
Ry	=	ค่าความหยาบสูงสุด (Maximum height)
Rz	=	ค่าเฉลี่ยความหยาบของพื้นผิวแบบสิบจุด (Ten-spot average roughness)
R^2	=	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination)
R_a^2	=	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแล้ว (adjusted coefficient of determination)
r	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)
SEE	=	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (Standard error of estimate)
$S.E.$	=	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error)
$Sig.$	=	ค่านี้สำคัญ (Significant)
S_j	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรอิสระที่ j (X_j)
SSB	=	ผลรวมของการแปรผันระหว่างกลุ่ม (Between group sum of squares)
SSE	=	ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (sum of squares error)
SSR	=	ค่าแปรปรวนของ Y เนื่องจากอิทธิพลของ X_1, \dots, X_k (Sum Square of Residuals)
SST	=	ผลรวมกำลังสองหรือค่าแปรปรวนทั้งหมด (Sum Square of Total)
SSW	=	ผลรวมของการแปรผันภายในกลุ่ม (Within group sum of square)
S_y	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรตาม Y
T_0	=	อุณหภูมิแวดล้อม [K]
T_m	=	อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ [K]
w	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ที่ผิวชิ้นงาน [m]
w_k	=	ระยะความกว้างของรอยตัด (kerf width) [m]
α	=	ค่าการแพร่ความร้อน [m^2/s]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

β	=	อัตราส่วนที่ช่วยให้กลายเป็นไอบนผิววัสดุ
β_0	=	ส่วนตัดแกน Y หรือค่าของ Y เมื่อค่า X มีค่าเป็นศูนย์ หรือสัมประสิทธิ์ความถดถอย
β_1	=	ความชัน (slope) ของเส้นตรง
η_u	=	ปัจจัยของไอร้อนยวดยิ่งในบริเวณของโลหะเหลว
ρ	=	ความหนาแน่นของวัสดุ [kg/m^3]
ρ_g	=	ความหนาแน่นของแก๊สช่วย [kg/m^3]
σ	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล [\AA]



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการตัดโลหะด้วยเลเซอร์มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในงานทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือชิ้นส่วนอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ รวมไปถึงการตัดเพื่อทำเป็นลวดลายต่างๆเพื่อความสวยงาม ในทางปฏิบัติการตัดโลหะสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตัดด้วยพลาสมา (Plasma arc cutting) การตัดด้วยแก๊สออกซิเจน (Oxyfuel cutting) และการตัดด้วยแรงดันน้ำ (Water jet cutting) ซึ่งวิธีการตัดเหล่านี้ล้วนไม่มีการสัมผัสกันระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน โดยคุณภาพของการตัดมักพิจารณาจาก ระยะความกว้างของรอยตัด (Kerf width) และคุณภาพผิวของรอยตัด ซึ่งความหยาบผิว (Surface roughness) หรือการเกิดแถบริ้วในรอยตัด (Striation) ในการตัดด้วยพลาสมา และ แก๊สออกซิเจน จะเกิดความหยาบในรอยตัดมาก และมีความกว้างของรอยตัดมากกว่าการตัดด้วยเลเซอร์ คือมากกว่า 1 mm และ 2 mm ตามลำดับ[1] ส่วนการตัดด้วยแรงดันน้ำถึงแม้ว่าจะมีความเร็วกว่าการตัดด้วยเลเซอร์ แต่ความกว้างยังถือว่ามีความมากกว่า คืออยู่ในช่วง 0.7-2.5 mm [1] ส่วนความกว้างของการตัดด้วยเลเซอร์อยู่ในช่วง 0.1 – 1 mm [1]

หลักการของการตัดด้วยเลเซอร์จะเป็นกระบวนการตัดด้วยความร้อน กล่าวคือจะอาศัยพลังงานความร้อนจากการรวมแสงเพื่อหลอมละลายวัสดุที่ต้องการตัด ซึ่งข้อดีของการตัดด้วยเลเซอร์คือ ไม่มีการสัมผัสกันระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน มีความแม่นยำสูง ใช้เวลาในการตัดน้ำ สามารถตัดวัสดุที่มีรูปร่างซับซ้อนได้และมีระยะความกว้างของรอยตัดที่แคบ

ความหยาบผิวของรอยตัดและระยะความกว้างของรอยตัดสามารถควบคุมได้จากตัวแปรที่สำคัญคือ ความเร็วตัด (Cutting speed) ความดันของแก๊สช่วย (Assist gas pressure) และกำลังของเลเซอร์ (Laser power) ในส่วนของแก๊สช่วยจะมีหน้าที่เป่าโลหะเหลวออกไปสู่ด้านล่าง ซึ่งพบว่าการใช้แก๊สออกซิเจนจะทำให้สามารถตัดโลหะได้เร็วกว่าการใช้แก๊สชนิดอื่นๆ [2] และแก๊สออกซิเจนยังส่งผลต่อระยะความกว้างของรอยตัดและความหยาบในรอยตัด เนื่องจากแก๊สออกซิเจนเมื่อมาสัมผัสกับโลหะเหลว จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแก๊สออกซิเจนกับโลหะเหลว จะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดชั้นฟิล์มของโลหะเหลวเกาะติดอยู่ตามผนังของรอยตัด ดังนั้นเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สออกซิเจนจะทำให้ระยะความกว้างของรอยตัดและความหยาบในรอยตัดเพิ่มขึ้น [3, 4] นอกจากนี้กำลังของเลเซอร์และความเร็วตัดก็ส่งผลต่อระยะความกว้างของรอยตัด และความ

หยาบในรอยตัด กล่าวคือ เมื่อเพิ่มกำลังของเลเซอร์และลดความเร็วตัดจะทำให้ความกว้างรอยตัดเพิ่มขึ้น และความหยาบในรอยตัดลดลง [5, 6]

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการทดลองตัดแผ่นเหล็กเหนียว (Mild steel) ขนาดความหนา 3 mm ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย โดยจะทำการปรับค่าตัวแปรการตัด ได้แก่ กำลังของเลเซอร์ ความเร็วการตัด และความดันแก๊ส จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณภาพของรอยตัด และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับสมการทำนายขนาดความกว้างของรอยตัด รวมทั้งสร้างสมการสหสัมพันธ์ของความกว้างรอยตัดและความหยาบผิวในรอยตัด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาเชิงทดลองของตัวแปรการตัด ได้แก่ กำลังของแสงเลเซอร์ ความดันของแก๊สออกซิเจน และความเร็วการตัด ที่ส่งผลต่อขนาดความกว้างและความหยาบของรอยตัด สำหรับการตัดเหล็กเหนียวด้วยเลเซอร์
2. เพื่อเปรียบเทียบความสำคัญของกำลังของแสงเลเซอร์ ความดันของแก๊สออกซิเจน และความเร็วตัดที่มีต่อความกว้างและความหยาบของรอยตัดโดยใช้วิธีการทางสถิติ
3. เพื่อสร้างสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดความกว้างและความหยาบของรอยตัด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาและทดลองการตัดเลเซอร์โดยใช้เหล็กเหนียว ขนาดความหนา 3 mm
2. ใช้เลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ และมีแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย
3. กำลังของแสงเลเซอร์ที่ใช้คือ 2000, 2200 และ 2,400 W ความดันแก๊สออกซิเจนที่ใช้คือ 0.07, 0.12 และ 0.17 MPa และความเร็วตัดที่ใช้คือ 3100, 3400 และ 3700 mm/min

1.4 สมมติฐานการวิจัย

1. ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วการตัดที่แตกต่างกันส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดแตกต่างกัน
2. ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วการตัดที่แตกต่างกันส่งผลให้ความหยาบในรอยตัดแตกต่างกัน
3. กำลังของเลเซอร์มีผลต่อความกว้างของรอยตัดมากที่สุด
4. ความเร็วตัดมีผลต่อความหยาบของรอยตัดมากที่สุด

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดเลเซอร์
2. กำหนดความหนาของวัสดุที่ต้องการตัด ค่าตัวแปรในการตัดและสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการทดลองตัดเหล็กเหนียวด้วยเลเซอร์โดยใช้ค่าตัวแปรต่างๆ
4. นำชิ้นงานที่ได้มาทำการวัดขนาดและทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
5. ทำการวิเคราะห์ถดถอย
6. ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน
7. สร้างสมการสหสัมพันธ์สำหรับทำนายความกว้างและความหนาของรอยตัด
8. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการศึกษา และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ผลของชนิดของแก๊สต่อการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

Chen [2] ได้ศึกษาผลกระทบในการตัดเหล็กเหนียวด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้แก๊สที่ให้มีทั้งแก๊สบริสุทธิ์และแก๊สผสม แก๊สบริสุทธิ์ ได้แก่ แก๊สออกซิเจน ไนโตรเจน อาร์กอน และฮีเลียม ส่วนแก๊สผสม ได้แก่ แก๊สอาร์กอนกับไนโตรเจน อาร์กอนกับฮีเลียม ออกซิเจนกับอาร์กอน ออกซิเจนกับไนโตรเจน และออกซิเจนกับฮีเลียม พบว่าการใช้แก๊สออกซิเจนเพียงอย่างเดียวทำให้คุณภาพของรอยตัดดีที่สุด ในการใช้แก๊สเฉื่อยเพียงอย่างเดียวต้องใช้ความเร็วตัดที่ต่ำและความดันแก๊สที่สูง ส่วนการใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สออกซิเจนกับแก๊สอื่นๆจะทำให้เกิดการเกาะติดของหยดโลหะ (Dross adhesion) ซึ่งอาจแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มความดันแก๊ส อย่างไรก็ตามการเพิ่มความดันแก๊สจะส่งผลให้มีการออกซิไดซ์เกิดขึ้นในรอยตัดส่งผลให้คุณภาพในรอยตัดลดลง

Chen [4] ได้ศึกษาผลกระทบของแก๊สช่วยความดันสูงในการตัดเหล็กคาร์บอนต่ำความหนา 3 mm ด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์กำลังสูง โดยเปรียบเทียบระหว่างแก๊สออกซิเจน อาร์กอน ไนโตรเจน และอากาศ จากการทดลองพบว่า การใช้แก๊สออกซิเจนและอากาศที่ความดันสูง (10 bar) ทำให้เกิดคุณภาพการตัดที่ไม่ดี กล่าวคือ มีการออกซิไดซ์เกิดขึ้นที่ด้านบนของผิวรอยตัด การใช้แก๊สอาร์กอนที่ความดันสูงทำให้เกิดรอยตัดที่ค่อนข้างเรียบ ส่วนการใช้แก๊สไนโตรเจนที่ความดันสูงทำให้เกิดการเกาะติดของหยดโลหะและมีความหยابเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันตั้งแต่ 2 ถึง 10 bar อย่างไรก็ตาม ความเร็วตัดเมื่อใช้อากาศเป็นแก๊สช่วยนั้นเร็วกว่าการใช้แก๊สเฉื่อย (อาร์กอนและไนโตรเจน) แต่ช้ากว่าในการใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย Chen [4] จึงสรุปว่าการใช้แก๊สออกซิเจนชนิดที่ดีที่สุด ส่วนแก๊สไนโตรเจนและอาร์กอนอาจจะนำมาใช้แทนได้ อย่างไรก็ตามการใช้อากาศเป็นแก๊สช่วยนั้นจะให้ผลที่ด้อยกว่าแก๊สอื่นๆ กล่าวคือ ในด้านของความเร็วการตัด จะต้องใช้ความเร็วตัดที่ช้ากว่าการใช้แก๊สออกซิเจน ส่วนในด้านของคุณภาพผิว การใช้แก๊สเฉื่อยจะให้ผิวที่เรียบที่สุด ถึงแม้ว่าต้องใช้ความเร็วตัดที่ต่ำกว่าแก๊สอื่นๆ แต่ในการใช้อากาศเป็นแก๊สช่วยจะเกิดความหยابผิวสูงที่สุด

2.2 ผลของแก๊สออกซิเจน กำลังของเลเซอร์ และความเร็วตัดที่มีผลต่อการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

Chen และ Yao [7] ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อจำลองการตัดเหล็กเหนียวด้วยเลเซอร์โดยใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย โดยการลดความบริสุทธิ์ให้กับแก๊สออกซิเจนตั้งแต่ 99.5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนไปถึง 90% จะทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ลดลง เกิดความร้อนในการตัดลดลง ทำให้ต้องใช้ความเร็วตัดที่ลดลง นอกจากนี้ยังได้อธิบายการเกิดแถบริ้วในรอยตัด ว่ามีความสัมพันธ์กับพลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในชั้นออกไซด์ Chen และ Yao [7] ได้อธิบายว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากการตัดเหล็กด้วยแก๊สออกซิเจนจะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ขึ้นในรอยตัด แต่ชั้นออกไซด์นี้จะไม่เสถียร คือมีการแตกตัวและสร้างขึ้นใหม่ตลอดเวลาเนื่องจากแรงของความดันแก๊สที่ถูกขับออกมา จะเกิดวนเป็นวัฏจักร อันเนื่องมาจากความผันผวนของอุณหภูมิและชั้นของโลหะที่หลอมเหลวและเป็นสาเหตุให้เกิดแถบริ้วในรอยตัด

Chen และ Yao [8] ได้ศึกษากลไกการเกิดแถบริ้วในรอยตัด ในการตัดเหล็กเหนียวด้วยเลเซอร์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการทดลอง ผลที่ได้พบว่า การเพิ่มความเร็วตัดทำให้มีเวลาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเวลาในการเกิดโลหะหลว่น้อยลง ส่งผลให้ความลึกของแถบริ้วในรอยตัด (Striation depth) ลดลง ส่วนการเพิ่มความดันของแก๊สออกซิเจน ทำให้มีความหนาแน่นของแก๊สออกซิเจนมากขึ้นในรอยตัด ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากขึ้น ทำให้ความลึกของแถบริ้วในรอยตัดเพิ่มขึ้นด้วย โดยทั้งการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นให้ผลที่สอดคล้องกัน

Wee และ Li [9] ได้ศึกษาการเกิดแถบริ้วในรอยตัดจากการตัดเหล็กเหนียวด้วยเลเซอร์ โดยพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการการอนุรักษ์มวล การอนุรักษ์โมเมนตัม และการอนุรักษ์พลังงาน ผลที่ได้พบว่าเมื่อมีการเพิ่มความเร็วตัดทำให้ความหนาของชั้นออกไซด์ที่หลอมละลายลดลง และการตัดเหล็กโดยการใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะมีการคายความร้อน (Exothermic reaction) ออกมา ทำให้อุณหภูมิของโลหะหลวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้น

Powell และคณะ [10] ทำการทดลองตัดเหล็กเหนียวด้วยเลเซอร์เพื่อให้ได้รอยตัดที่มีความหยาบน้อยที่สุด พบว่าเมื่อความเร็วตัดต่ำจะเกิดความหยาบในรอยตัดสูง และการเกิดความหยาบที่ต่ำที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วตัดต่ำกว่าความเร็วตัดสูงสุดเล็กน้อย เนื่องจากที่ความเร็วตัดสูงสุดจะทำให้ลักษณะของหน้าตัด (Cut front) มีความโค้งหรือมีความเอียงมาก ส่งผลให้อัตราการไหลของโลหะหลวที่จะถูกขับออกไปสู่ด้านล่างลดลง และยังเป็น การเพิ่มความปั่นป่วน (turbulence) ของโลหะหลวในบริเวณนั้น จึงเป็นสาเหตุที่มีความหยาบผิวเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วตัดสูงสุด

Rajaram และคณะ [11] ได้ทดลองตัดเหล็ก 4130 ด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยได้ปรับค่ากำลังของเลเซอร์และความเร็วตัด ในการศึกษานี้จะพิจารณาความกว้างของรอยตัด ความหยาบผิว ความถี่ของแถบริ้ว (Striation frequency) และขนาดของบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone, HAZ) พบว่าในกรณีที่กำลังของเลเซอร์ต่ำส่งผลให้มีขนาดความกว้างรอยตัดและบริเวณกระทบร้อนน้อย เนื่องจากมีความร้อนที่ส่งผ่านลงไปในตัวต่ำ ส่วนในกรณีที่ความเร็วตัดต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้ความหยาบและความถี่ของแถบริ้วต่ำ ความหยาบที่ลดลงในการศึกษานี้ ผลที่ได้ตรงข้ามกับการตัดเลเซอร์โดยทั่วไป เนื่องจากในการศึกษานี้ใช้ช่วงค่าของความเร็วตัดที่สูงกว่าค่าที่เหมาะสมในเงื่อนไขของกำลังของเลเซอร์และความหนาของวัสดุ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis) พบว่ากำลังของเลเซอร์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดและบริเวณกระแทกร้อน ส่วนความเร็วตัดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความหยาบและความถี่ของแถบริ้วในรอยตัด และการตัดเพื่อให้ได้คุณภาพรอยตัดที่เหมาะสม คือ ความกว้างรอยตัดน้อย บริเวณกระแทกร้อนน้อย และความหยาบต่ำที่สุด ควรใช้กำลังของเลเซอร์ที่ต่ำ และความเร็วตัดที่สูง

Lamikiz และคณะ [12] ได้ศึกษาและทดลองตัดเหล็กชนิด Advance high strength steels (AHSS) ด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย โดยทำการปรับค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส ความเร็วตัด และตำแหน่งของจุดโฟกัส จากการทดลองพบว่า เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นและความเร็วตัดลดลงจะส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การวางตำแหน่งของจุดโฟกัสที่อยู่ต่ำกว่าผิวด้านบนของชิ้นงานทำให้มีคุณภาพรอยตัดที่ดีกว่า

Yilbas [3] ได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรการตัดที่มีต่อความกว้างของรอยตัดและการเกิดแถบริ้วในรอยตัด จากการตัดเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีความหนา 12 mm ด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นและความดันของแก๊สออกซิเจนส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงของความกว้างรอยตัด และการใช้กำลังของเลเซอร์และความดันของแก๊สออกซิเจนที่สูงขึ้น จะส่งผลให้มีการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermal erosion) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแถบริ้วในรอยตัดและความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้น

Thomas [5] ได้ศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อการตัดเหล็กกล้ากำลังสูง (high strength steel) โดยทำการปรับค่ากำลังของเลเซอร์และความเร็วตัด และใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วตัดจะทำให้เกิดแถบริ้วในรอยตัดลดลง ส่วนการเพิ่มกำลังของเลเซอร์จะทำให้เกิดแถบริ้วในรอยตัดเพิ่มขึ้น และยังทำให้ความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ในการเพิ่มกำลังของเลเซอร์ส่งผลให้เกิด HAZ ที่กว้างขึ้น โดยเมื่อมี HAZ มากขึ้นส่งผลให้อายุการล้า (Fatigue life) ของวัสดุลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุ เมื่อนำวัสดุมาทดสอบการล้าจึงเกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) มาก ส่งผลให้มีอายุการล้าลดลง

Cekic และ Begic Hajdarevic [6] ได้สร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับการตัดเหล็กกล้าผสมสูง (High-alloy steel) ความหนา 3 mm ด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขกับการทดลอง โดยปรับค่าความเร็วตัด ความดันแก๊สออกซิเจน และระยะโฟกัส จากการศึกษาพบว่าทั้งผลของความหยาบผิวในรอยตัดและผลบริเวณกระแทกร้อนจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ เพิ่มความเร็วตัดทำให้ความหยาบและบริเวณกระแทกร้อนลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความกว้างรอยตัดในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

Kar และคณะ [13] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการตัดเลเซอร์ โดยใช้วิธี Scaling laws ด้วยเลเซอร์ชนิดออกซิเจน-ไอโอดีน (Chemical Oxygen-Iodine Laser, COIL) ในการตัดสแตนเลสโดยการใช้หลักการสมดุลพลังงาน ซึ่งสัมพันธ์กับความลึกในการตัด (Cutting depth) กับตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ กำลังของเลเซอร์ ขนาดของจุดลำแสงเลเซอร์ (Spot size) ความเร็วตัด และความเร็วของแก๊สช่วย (Cutting gas velocity)

จากกฎการสมดุลพลังงานสำหรับกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์สามารถทำให้เปลี่ยนมาเป็นสมการอย่างง่ายโดยใช้ระบบพารามิเตอร์ที่เป็นกลุ่มก้อน (Lumped parameter technique) ผลลัพธ์หลังจากการพิจารณาการสมดุลพลังงานเป็นสมการดังนี้

$$\frac{P}{d} = \frac{vw_k + A_3 \sqrt{vw_k}}{A_0} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$A_0 = \frac{A}{a_0} \quad \text{และ} \quad A_3 = \frac{1}{a_0} \frac{(w_k + 2w)(k(T_m - T_0))}{2\sqrt{\alpha w w_k}} \quad (2.2)$$

และ

$$a_0 = \rho(C_p(T_m - T_0) + L_m + \beta L_b) \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- P คือ กำลังของเลเซอร์ [W]
 - d คือ ความลึกของการตัดหรือความหนาของชิ้นงาน [m]
 - v คือ ความเร็วตัด [m/s]
 - w_k คือ ระยะเวลาความกว้างของรอยตัด (kerf width) [m]
 - w คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ที่ผิวชิ้นงาน [m]
 - T_m คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ [K]
 - T_0 คือ อุณหภูมิแวดล้อม [K]
 - A_0 คือ อธิบายสมการของอัตราการถ่ายเทพลังงาน [m³/J]
 - A คือ Effective energy coupling factor ที่ผิววัสดุที่เกิดขึ้นขณะกระบวนการตัด
 - β คือ อัตราส่วนที่ช่วยให้กลายเป็นไอบนผิววัสดุ (Factor of evaporation contribution)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- α คือ ค่าการแพร่ความร้อน [m^2/s]
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นงาน [W/mK]

ในการประยุกต์ใช้จากกฎการเปลี่ยนขนาดสำหรับกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์ จะได้ขนาดความกว้างของรอยตัดอันเนื่องมาจากขนาดของลำแสงเลเซอร์ที่แคบที่สุดบนผิวชิ้นงาน (w) ดังนี้

$$w_k = \frac{1}{v} \left[\frac{2.51 \sqrt{\alpha} \frac{(2A\eta_u)}{w k(T_m - T_0)} P \sqrt{v}}{1 + 3.08 \times 10^7 \left(\frac{A_0}{A_3 \sqrt{f}} \right) \left(\frac{\rho \rho_g \sigma^2}{M_w P_g f \sqrt{w}} \right) P \sqrt{v}} \right] \quad (2.4)$$

- เมื่อ f คือ เศษส่วนของความดันที่ลดลงในรอยตัด (fraction of pressure of pressure drop in the kerf)
 σ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล ในหน่วย อังสตรอม [\AA]
 M_w คือ น้ำหนักโมเลกุล ในหน่วย กรัมต่อโมล [g/mol]
 P_g คือ ความดันของแก๊สช่วย [kPa]
 ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊สช่วย [kg/m^3]
 ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ [kg/m^3]
 η_u คือ ปัจจัยของไอร้อนยวดยิ่งในบริเวณของโลหะเหลว (Super heating factor in the melt front)

จากสมการที่ 2.4 เป็นสมการสำหรับทำนายความกว้างรอยตัดซึ่งได้มาจากกฎการสมดุลพลังงานโดยตัดแปรสำคัญที่มีผลต่อความกว้างรอยตัดคือ ความเร็วตัด กำลังของเลเซอร์ ความดันของแก๊สช่วย โดย Kar และคณะ [13] ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของค่า d/P ที่ค่า $v w_k$ เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองโดยใช้วัสดุชนิดต่างๆ เช่น อลูมิเนียม นิกเกิล ทองแดง สเตนเลส และไททาเนียม พบว่าค่าที่ได้ระหว่างการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน คือเมื่อ d/P เพิ่มขึ้น $v w_k$ จะลดลง นั่นคือหากค่า d และ v คงที่ เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น ความกว้างรอยตัดจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามหากค่า d และ w_k คงที่ เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น จะต้องใช้ความเร็วตัดที่เร็วขึ้นด้วย

Yilbas [14] ได้ศึกษาผลกระทบที่มีต่อความกว้างรอยตัด อันเนื่องมาจากค่าตัวแปรต่างๆในการตัดเลเซอร์ได้แก่ กำลังของเลเซอร์ ความเร็วตัด และ Energy coupling factor โดยพัฒนามาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Kar และคณะ [13] อย่างไรก็ตามลำแสงเลเซอร์ที่ใช้มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวรรณกรรมปริทัศน์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่น ชนิดและความหนาของวัสดุ กำลังของเลเซอร์ ชนิดและความดันของแก๊สช่วย และความเร็วตัด ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปการใช้ค่าพารามิเตอร์ของนักวิจัยในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์

นักวิจัย	วัสดุ		กำลังของเลเซอร์	ความดันแก๊สช่วย	ความเร็วตัด
	ชนิดของวัสดุ	ความหนา			
Powell และคณะ [10]	Mild steel	1.1 mm	1000 W	O ₂ : 2 bar	2000 – 8000 mm/min
Thomas [5]	High strength steels	2 mm	800 – 2000 W	O ₂ : 100 kPa	1500 – 4500 mm/min
Lamikiz และคณะ [12]	Advance high strength steels	0.8 - 1.5 mm	200 – 600 W	O ₂ : 3 – 8 bar	2000 – 8000 mm/min
Wee and Li [9]	Mild steel	1 - 3 mm	800 – 1000 W	O ₂ : 0.2279 N/m ²	13 – 20 mm/s
Cekic และ Begic Hajdarevic [6]	High-alloy steel 1.4828	3 mm	500 – 2000 W	O ₂ : 12.5 – 17.5 bar	2000 – 4000 mm/min
Rajaram และคณะ [11]	4130 Steel	1.27 mm	700 – 1300 W	O ₂ : 1.3 kg/cm ²	29.6 – 55 mm/s
Kar และคณะ [13]	Stainless steel	upto 5 mm	1000 – 10000 W	N ₂ : 827.37 kPa	0 – 5 mm/s
Chen และ Yao [8]	Mild steel	2 mm	1.2 × 10 ⁸ W/m ²	O ₂ : 2 – 3 bar	20 – 55 mm/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีบทพื้นฐาน

3.1 เลเซอร์

เลเซอร์ (LASER, light amplification by stimulated emission of radiation) เป็นลำแสงชนิดหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้อุปกรณ์กำเนิดลำแสง โดยเลเซอร์นั้นมีหลากหลายชนิดและให้คุณสมบัติที่ต่างกันไปขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ ลำแสงเลเซอร์เป็นลำแสงที่มีขนาดเล็กและมีการเบี่ยงเบนน้อย (Low-divergence beam) และความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดต่างๆจะแตกต่างกัน สามารถสังเกตได้จากสีของแสงเลเซอร์ ถ้าอยู่ในสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible spectrum) การนำเลเซอร์มาใช้ประโยชน์นั้นมีหลายรูปแบบ โดยกระบวนการที่สำคัญของเลเซอร์คือการส่งพลังงานผ่านสื่อนำแสงหรือตัวกลางเลเซอร์ ซึ่งสามารถใช้ของแข็ง ของเหลว แก๊ส หรืออิเล็กตรอนอิสระ ตัวอย่างเช่น ในอุปกรณ์กำเนิดเลเซอร์จะมีออปติคัลคาวิตี (Optical cavity) ประกอบด้วยกระจก 2 อันที่จัดวางให้ขนานกัน ทำหน้าที่สะท้อนแสงผ่านสื่อนำแสงกลับไปกลับมา ทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้น แล้วจึงส่งลำแสงออกมา ซึ่งจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าหรือแสงในหลายความยาวคลื่นในการทำให้ลำแสงเกิดกระบวนการเหนี่ยวนำเพื่อเพิ่มพลังงานนี้ [15]

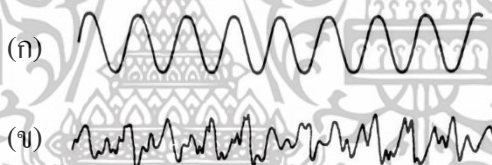
3.2 คุณสมบัติทั่วไปของแสงเลเซอร์

แสงเลเซอร์เป็นแสงที่ถูกสร้างขึ้น ไม่สามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยคุณสมบัติจะแตกต่างกับแสงตามธรรมชาติ หรือแสงจากหลอดไฟทั่วไป โดยหลักการของการเกิดแสงเลเซอร์นั้นเกิดจากการควบคุมให้อะตอมหรือโมเลกุลของตัวกลางเลเซอร์เปล่งแสงออกมาอย่างมีระเบียบ โดยคุณสมบัติของแสงเลเซอร์มีดังนี้ [25]

1. ความเป็นแสงสีเดียว แสงเลเซอร์มีลำแสงที่มีสีเดียว โดยในทางทฤษฎีแล้วช่วงความถี่ของเส้นสเปกตรัมมีค่าน้อยมาก ซึ่งจะพบว่าเลเซอร์ชนิดแต่ละชนิดจะมีช่วงความถี่เฉพาะค่า (ในกรณีแสงธรรมชาติ เส้นสเปกตรัมมีความกว้างหลายพันเมกะเฮิร์ตซ์ (MHz))
2. มีความขนานของลำแสงดีมาก คือลำแสงเลเซอร์นั้นจะมีการเบี่ยงเบนน้อยมากเมื่อเทียบกับแสงในธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สามารถรวมแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดเล็กๆได้ดีมาก ในทางทฤษฎีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดรวมแสงของเลเซอร์จะสามารถมีขนาดเล็กได้เท่ากับความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์
4. มีความเข้มของพลังงาน (Energy density) ที่สูงมาก ซึ่งนิยามด้วยพลังงานต่อพื้นที่หน้าตัดที่แสงตกกระทบ
5. มีโคฮีเรนซ์ที่ตีมาก หรือเป็นแสงอาพันธ์ (Coherent) ที่สูง กล่าวคือ เป็นแสงที่มีความถี่เดียว และถูกผลิตออกมาแบบอินเฟส (In phase) จึงเป็นการแทรกสอด (Interference) น้อยมาก แสงจึงสามารถเดินทางไปได้ไกล โดยความเข้มของแสงลดลงน้อยมากเมื่อเทียบกับแสงในธรรมชาติชนิดอื่นๆ แสดงการเปรียบเทียบคลื่นแสงเลเซอร์และคลื่นแสงตามธรรมชาติดังรูปที่ 3.1 คือแสงเลเซอร์ที่ถูกส่งออกมาจากต้นกำเนิดจะมีรูปคลื่นแบบไซน์ (Sine wave) สม่่าเสมอดังรูปที่ 3.1 (ก) แต่ถ้าเป็นแสงธรรมชาติจะมีความถี่หลายค่าผสมกันและเฟสของคลื่นแต่ละความถี่ที่ไม่ตรงกัน จึงทำให้คลื่นแสงธรรมชาติมีรูปดังรูปที่ 3.1 (ข) ดังนั้นแสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีเฟสของคลื่นเพียงเฟสเดียว
6. สามารถรวมพลังงานของแสงไว้มากๆ แล้วจึงออกมาเป็นแสงพัลส์ (Pulse) ที่มีพลังงานสูงได้



รูปที่ 3.1 ลักษณะของคลื่นแสง (ก) คลื่นแสงเลเซอร์และ (ข) คลื่นแสงตามธรรมชาติ [25]

3.3 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดเลเซอร์และวิธีการกระตุ้น

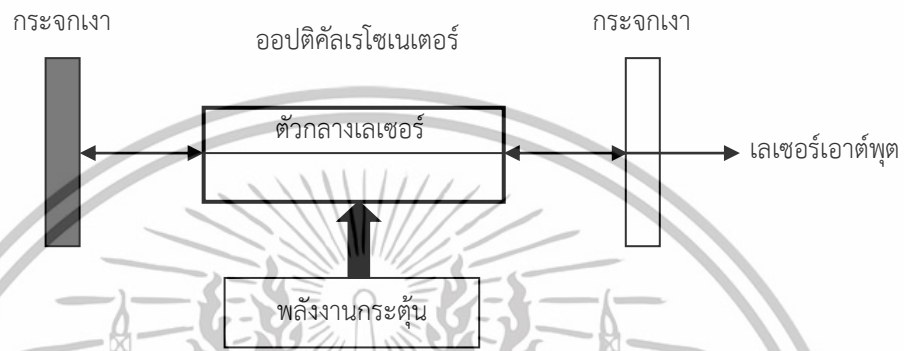
เครื่องกำเนิดเลเซอร์ ไม่ว่าจะเป็นเลเซอร์ชนิดใดจะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 3.2 ดังนี้คือ

1. ตัวกลางเลเซอร์ (Laser Medium หรือ Active medium) – เป็นวัสดุหรือตัวกลางที่จะให้กำเนิดแสงเลเซอร์ออกมา มีทั้งวัสดุของแข็ง ของเหลวและก๊าซ มักจะเรียกชื่อเลเซอร์ตามชื่อของตัวกลางเลเซอร์หรือแอกทีฟมีเดีย
2. ออปติคัลเรโซเนเตอร์ หรือ ออปติคัลคาวิตี (Optical Resonator หรือ Optical Cavity) – เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยกระจกสะท้อนแสงหรือมีความวาวเทียบเท่ากับกระจกเพื่อทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

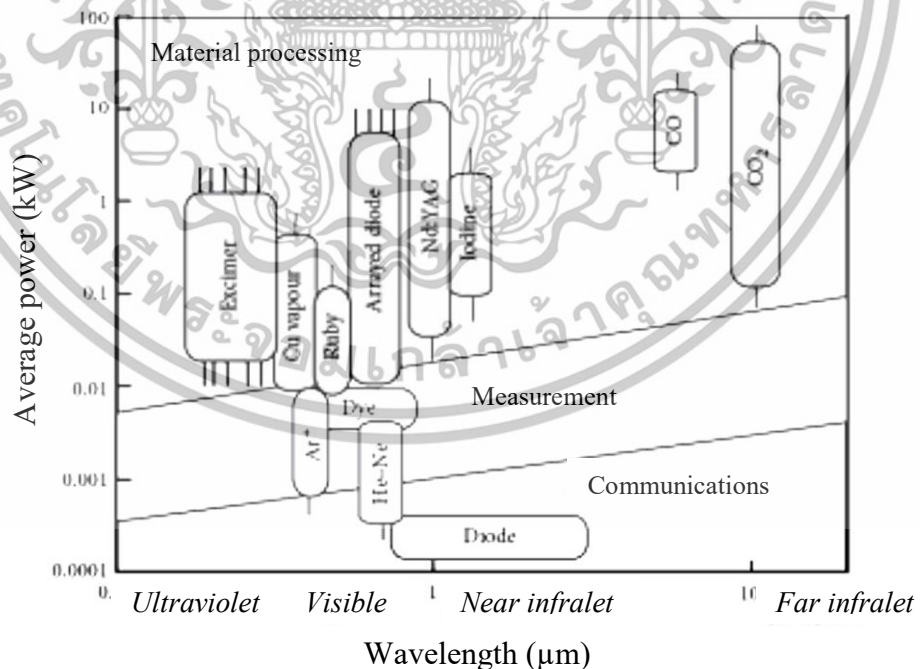
หน้าที่ป้อนกลับ (feedback) ให้แสงเป็นคลื่นนิ่ง และทำให้แสงมีความเข้มสูงขึ้นจนถึงจุดเลเซอร์ (lasing)

3. แหล่งกำเนิดพลังงานหรือกระตุ้น (Excitation Power Source) - เป็นต้นกำเนิดพลังงาน เช่น กำเนิดแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อดิซชาร์จให้ก๊าซกลายเป็นพลาสมา หรือใช้กำเนิดลำอิเล็กตรอนหรือใช้ฉัตรกระแสไฟฟ้า หรือใช้ทำให้เกิดแสงแฟลชสว่างมากๆ



รูปที่ 3.2 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์

เลเซอร์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัว เช่น ความยาวคลื่น กำลังเฉลี่ยของเลเซอร์ โดยในการนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่นการติดต่อสื่อสาร การวัดขนาด หรือในกระบวนการผลิตวัสดุ ควรเลือกชนิดของเลเซอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน รูปที่ 3.3 แสดงการเลือกใช้เลเซอร์ชนิดต่างๆ



รูปที่ 3.3 การเลือกใช้เลเซอร์ชนิดต่างๆโดยแบ่งตามความยาวคลื่นและกำลังเฉลี่ย แสดงบนการใช้งานประเภทต่างๆ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การประยุกต์ใช้งานเลเซอร์

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติเด่น คือ เป็นคลื่นแสงที่มีระเบียบ มีลักษณะเป็นลำแสง ความเข้มแสงสูง จึงมีศักยภาพในการประยุกต์มากมาย ได้แก่ การใช้เลเซอร์เพื่อเจาะ ตัด เชื่อม เลเซอร์เป็นแสงที่มีความเข้มสูง และเป็นลำแสง เมื่อโฟกัสจะมีขนาดเล็กสามารถ เจาะ ตัด เชื่อมวัสดุต่างๆได้ รูปที่เจาะ รอยเชื่อม จะมีขนาดเล็กและคมชัดมาก ทำให้สามารถทำงานที่มีความละเอียดสูงได้ เลเซอร์ที่ใช้งานต้องมีกำลังสูงเช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ [15]

1. การใช้เลเซอร์ด้านการแพทย์

เลเซอร์ถูกนำมาใช้ในการผ่าตัดและรักษาทางการแพทย์และจักษุแพทย์ เช่น การผ่าตัดที่มีขนาดเล็ก (Microsurgery) การผ่าตัดต้อ เป็นต้น เลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์อาร์กอน การเลือกใช้เลเซอร์แบบต่างๆขึ้นอยู่กับว่า อวัยวะที่ต้องการผ่าตัดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงสีอะไร และขนาดกำลังของเลเซอร์ เช่น เส้นเลือดแดงจะดูดกลืนสีแดงได้น้อย จึงใช้เลเซอร์แสงสีเขียวที่ได้จากเลเซอร์แก๊สอาร์กอน ในการใช้งานจริงๆอาจใช้ลำแสงที่มีกระจกเลนส์อยู่ภายใน และหักงอได้เป็นตัวนำแสงเลเซอร์ไปยังบริเวณอวัยวะที่จะผ่าตัด หรือใช้ลำแสงเลเซอร์ผ่านกล้องจุลทรรศน์ผ่าตัดในการรักษาโรคมะเร็ง เลเซอร์ที่ใช้จะต้องมีความหนาแน่นพลังงาน $300 - 500 \text{ J/cm}^2$ แสงเลเซอร์จะทำลายเซลล์เนื้อเยื่อโดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อปกติโดยรอบบาดแผลภายหลังการผ่าตัดจะฟื้นตัวเร็ว ในงานจุลศัลยกรรมของเส้นเลือด เลเซอร์สามารถห้ามเลือดให้หยุดไหลโดยการเชื่อมเส้นเลือดเล็กๆภายในบริเวณจำกัดให้ติดกัน วิธีการอาจใช้ท่อนำแสงเข้ามาช่วย เพื่อนำแสงเลเซอร์ไปตามช่องอวัยวะที่เข้าถึงยาก

2. การใช้เลเซอร์ด้านสื่อสารโทรคมนาคม

การสื่อสารในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้คลื่นไมโครเวฟ หรือใช้โทรศัพท์ อย่างไรก็ตามหลังจากที่มีการพัฒนาเลเซอร์ไดโอด (semiconductor diode laser) และเส้นใยแก้วนำแสง (optical fiber) แล้วการสื่อสารด้วยแสง (optical communication) หรือการส่งข้อมูลข่าวสารจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งหรือระหว่างเมืองต่างๆ ก็เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ในอนาคตการสื่อสารด้วยเลเซอร์จะเข้ามาแทนที่ระบบโทรศัพท์ที่ใช้หลอดตัวนำที่ใช้งานอยู่ทั่วไป แสงเลเซอร์นี้มีจุดเด่นที่ไม่มีสัญญาณรบกวนเพราะเป็นคลื่นแสง มีความจุข้อมูลสูงมากเพราะมีความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุ ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเส้นหนึ่งสามารถจุคู่สายโทรศัพท์ได้เป็นพันๆคู่

3. การใช้เลเซอร์ด้านการสร้างภาพสามมิติ

ปัจจุบันได้ใช้เลเซอร์ในการสร้างภาพ 3 มิติหรือภาพ โฮโลกราฟี หมายถึง กระบวนการสร้างภาพ ฮอโลแกรม ซึ่งเป็นภาพ 3 มิติ แตกต่างจากการสร้างภาพเชิง 3 มิติ โดยฮอโลแกรมนั้นเป็นภาพที่บันทึกลงบนฟิล์ม หรือ แผ่นเคลือบด้วยสารสำหรับบันทึกแสง ซึ่งผ่านเทคนิคการบันทึกด้วยการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน (Coherence) เช่น แสงเลเซอร์ และเมื่อถูกส่องสว่างอย่างเหมาะสม จะแสดงให้เห็นภาพที่มีลักษณะ 3 มิติ ฮอโลกราฟี เป็นเทคนิคที่ช่วยให้แสงกระจายจากวัตถุที่จะบันทึก และได้ถูกสร้างขึ้นใหม่ต่อมา เพื่อให้ปรากฏเป็นวัตถุอยู่ในตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับการบันทึก การเปลี่ยนแปลงรูปแบบตำแหน่งและทิศทางของการระบการมองเห็น เปลี่ยนแปลงไปอย่างถูกต้อง เหมือนกับถ้าวัตถุก็ยังคงเป็นปัจจุบันจึงทำให้ภาพที่บันทึก (โฮโลแกรม) ปรากฏเป็นสามมิติ เทคนิคของฮอโลกราฟียังสามารถใช้ในการเก็บ ดึงและประมวลผลข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแสง ในขณะที่ฮอโลกราฟีเป็นที่นิยมใช้เพื่อใช้แสดงภาพ 3 มิติแบบคงที่ แต่ก็ยังไม่สามารถสร้างฉากตามต้องการโดยการแสดง ปริมาตรของ holographic ได้ ถ้าจะกล่าวในคำพูดที่เป็นเชิงวิชาการมากขึ้น ก็อาจกล่าวได้ว่า โฮโลแกรม ก็คือ บันทึกของรูปแบบการแทรกสอดของลำแสง ที่มีหน้าคลื่นสอดคล้องกัน 2 ลำ

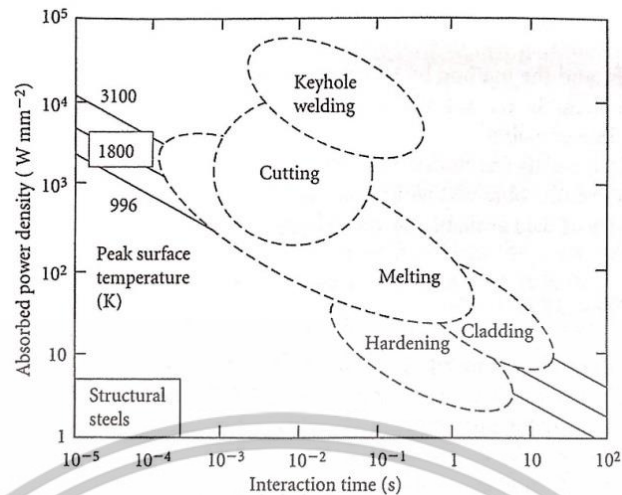
4. การใช้เลเซอร์ในการวัด

การใช้เลเซอร์ในการวัด นับ ทดสอบ ตรวจสอบการควบคุม ทั้งในกระบวนการผลิตและในงานวิทยาศาสตร์ เช่น การตรวจสอบอย่างลึกลับเครื่องบินโดยไม่ทำลาย โดยวิธีโฮโลกราฟี (Holography) การวัดปริมาณมลภาวะเพื่อหาปริมาณของสารต่างๆในบรรยากาศ เนื่องจากเลเซอร์มีความยาวคลื่นคงที่และเป็นลำแสงขนานจึงถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานการวัดที่ละเอียดแม่นยำ เช่น การวัดขนาดของสิ่งของ การวัดระยะทางทั้งใกล้และไกล โดยอาศัยหลักการของการแทรกสอด

5. การใช้เลเซอร์ในงานอุตสาหกรรม

ในการนำเลเซอร์มาประยุกต์ใช้งานวัสดุในอุตสาหกรรมนั้นมีหลายกระบวนการ อาทิ การเชื่อม การตัด การทำให้ผิวแข็ง การเคลือบผิว เป็นต้น โดยสิ่งที่สำคัญในการบวนการผลิตด้วยเลเซอร์นั้นคือกำลังของเลเซอร์และระยะเวลาที่ลำแสงเลเซอร์กระทำต่อวัสดุ ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ นั้นจะทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่แตกต่างกัน รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกำลังของเลเซอร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และกระบวนการต่างๆในอุตสาหกรรมของโลหะหรืออัลลอย ซึ่งได้แสดงอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุคือ อุณหภูมิที่ทำให้โลหะเปลี่ยนจากเพิร์ลไลท์ (Pearlite) เป็นออสเทนไนต์ (Austenite) คือ 996 K อุณหภูมิที่ทำให้โลหะหลอมละลาย คือ 1800 K และอุณหภูมิที่ทำให้กลายเป็นไอคือ 3100 K [1]

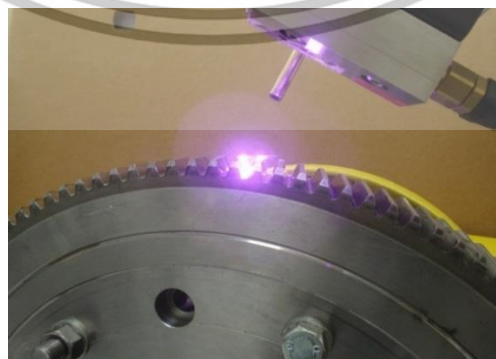
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ความหนาแน่นของกำลังของเลเซอร์กับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสำหรับสำหรับกระบวนการต่างๆของเลเซอร์ [1]

ตัวอย่างการใช้เลเซอร์ในงานอุตสาหกรรมมีดังนี้

- การทำให้ผิวแข็ง (Surface hardening) เป็นการประยุกต์เลเซอร์ที่มีกำลังสูงๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม อาทิ การทำให้ผิวของวัสดุเฟอร์รัส (Ferrous materials) แข็งนั้น ทำได้โดยการเผาให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) จากนั้นทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว (หรือที่เรียกว่าควENCHING) เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบทางกายภาพที่เกิดขึ้นพบว่า เมื่อเริ่มต้นให้ความร้อนจะทำให้มีการเปลี่ยนเฟสเป็นออสทีไนท์ (Austenite) ในกรณีเหล็กคาร์ไบด์ 4% ที่มีการเผาอย่างช้าๆ จะพบว่าเริ่มมีเฟสออสทีไนท์ที่อุณหภูมิ 723°C และเกิดการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนใหม่ทำให้เกิดสารละลายของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเมื่อทำให้มีการควENCHING อย่างรวดเร็ว (ใช้เวลาน้อยกว่า 1 วินาที) จะทำให้มีการเปลี่ยนเฟสเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ซึ่งจะทำให้ผิวมีความแข็งเพิ่มขึ้น [25] รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างการทำให้พื้นผิวมีความแข็งมากขึ้นโดยใช้เลเซอร์



รูปที่ 3.5 การทำให้ผิวแข็งด้วยเลเซอร์ [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเชื่อมด้วยเลเซอร์ (Laser welding) ได้แก่การนำโลหะสองชิ้น (อาจจะเป็นโลหะชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้) มาสัมผัสกัน ทำการเผาบริเวณที่สัมผัสกันให้ร้อนจนถึงจุดละลายแล้วเชื่อมจนติดกัน ฉะนั้นความร้อนที่ใช้จะต้องมากพอทำให้โลหะละลาย แต่ต้องไม่มากจนกระทั่งทำให้เกิดการระเหยกกลายเป็นไอ ซึ่งจะทำให้เกิดรอยเชื่อมเป็นรูพรุน โลหะส่วนมากมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดละลาย ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังให้มีการควบคุมปริมาณพลังของเลเซอร์ให้ดี โดยเฉพาะในกรณีที่เชื่อมโลหะต่างชนิดกันซึ่งมีจุดหลอมละลายต่างกันมากๆ โดยอาจมักทำให้เกิดการระเหยกเป็นไอได้ ตัวอย่างการเชื่อมด้วยเลเซอร์ แสดงในรูปที่ 3.6

การเชื่อมด้วยเลเซอร์อาจจะใช้แทนการเชื่อมด้วยประกายไฟ (Arc welding) การเชื่อมด้วยตัวต้านทาน (Resistance welding) และการเชื่อมด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam welding) แต่อย่างไรก็ดีพบว่า การเชื่อมด้วยเลเซอร์มีข้อดีหลายประการดังนี้

- (1) ไม่มีการสัมผัสกับอุปกรณ์ภายนอก
- (2) การเผาเกิดขึ้นเฉพาะที่
- (3) สามารถเชื่อมโลหะต่างชนิดกันได้
- (4) สามารถเชื่อมชิ้นงานที่ควบคุมอยู่ในเตาเผาที่ยอมให้แสงผ่านได้

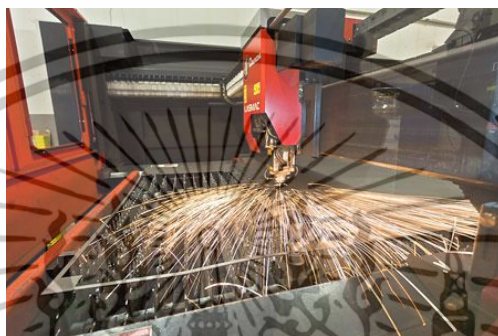


รูปที่ 3.6 การเชื่อมด้วยเลเซอร์ [34]

- การตัดด้วยเลเซอร์ (Laser cutting) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จุดประสงค์หลักของการตัดคือ การทำให้วัสดุระเหยกเป็นไอโดยเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่ทำลายชิ้นงานหรือมีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมที่ใช้วิธีการตัดด้วยเลเซอร์จะมีการใช้แก๊สช่วยฉีดเลี้ยงตามรอบๆลำแสงเช่นเดียวกันกับการเชื่อมด้วยเลเซอร์ ซึ่งแก๊สที่ใช้อาจเป็นแก๊สรีแอกทีฟ เช่น แก๊สออกซิเจน โดยความเร็วการตัดจะทวีสูงขึ้น เนื่องจากแก๊สออกซิเจนจะทำปฏิกิริยาคายความร้อนกับโลหะ รวมทั้งมีการดูดกลืนแสงของโลหะ และสถานการณ์แวดล้อมที่เหมาะสมเราอาจจะเพิ่มอัตราเร็วการตัดได้สูงขึ้นถึง 5 เท่าหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่านี้ นอกจากนี้แก๊สที่ใช้อย่างช่วยให้วัสดุที่หลอมละลายหลุดออกจากบริเวณที่ตัดด้วย อย่างไรก็ตามตามขอบของชิ้นงานที่ถูกตัดจะมีออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลเสียหากต้องการชิ้นงานไปเชื่อมในภายหลัง สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สช่วย แต่แก๊สเฉื่อยจะไม่ทำปฏิกิริยาด้วยความร้อนกับโลหะ เท่ากับว่าเลเซอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนที่ใช้ในการตัดเพียงแหล่งเดียว ส่วนกรณีวัสดุเป็นอโลหะ (ตัวอย่างเช่น เซรามิกส์ พลาสติก หรือไม้) การใช้แก๊สรีแอกทีฟเป็นแก๊สช่วย จะมีการเกิดออกซิเดชันที่น้อยกว่า [25]



รูปที่ 3.7 การตัดด้วยเลเซอร์ [35]

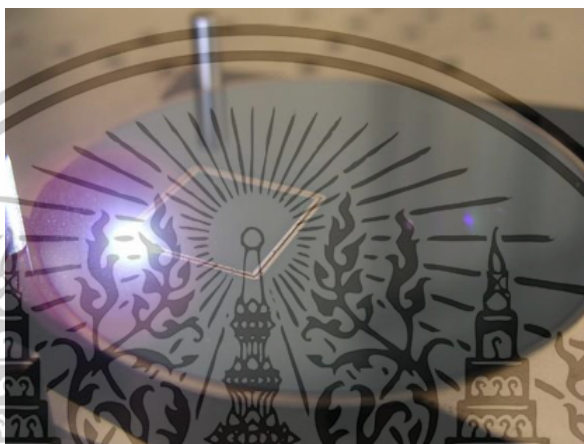
- การเจาะด้วยเลเซอร์ (Laser drilling) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 พบว่าเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulse) จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเลเซอร์แบบต่อเนื่อง (Continuous wave, CW) (โดยที่มีกำลังเท่ากัน) การเจาะรูในโลหะด้วยเลเซอร์ CO₂ ได้ประสบปัญหาที่สำคัญคือ การดูดกลืนพลังงานต่ำ จึงมักนิยมใช้ Nd:YAG เลเซอร์แทน ในกรณีวัสดุเป็นอโลหะ เช่น ยางหรือกระดาษ ซึ่งมีรูหรือหลุมอยู่แล้ว งานแบบนี้การเจาะด้วยเลเซอร์จะมีผลดีกว่าวิธีทางกลเพราะมีความแม่นยำมากกว่า ตัวอย่างได้แก่ การใช้เลเซอร์เจาะรูกระดาษมวนบุหรี่ กรณีที่ใช้เทคนิคทางกลเจาะรูจะได้รูที่มีความคลาดเคลื่อนสูงและติดกันมาก การใช้เลเซอร์ในการเจาะรูที่เห็นได้ว่าเป็นความสำเร็จอย่างมากได้แก่ การเจาะรูหัวนมของขวดนมทารกและการเจาะรูวาล์วของใบพัด [18]



รูปที่ 3.8 การเจาะด้วยเลเซอร์ [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การแกะสลักด้วยเลเซอร์ (Laser engraving) เป็นการขีดเส้นบางๆลงบนผิวของวัสดุโดยไม่ทำวัสดุแตกออกเป็นชิ้นๆตามแนวที่ขีด โดยในการประยุกต์การทำงานจรรวม (IC) พบว่าการใช้เลเซอร์สลักบนแผ่นซิลิกอนมีประโยชน์อย่างมาก โดยปกติวงจรไฟฟ้าจำนวนมากมักสร้างขึ้นอยู่บนแผ่นซับสเตรทซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งพบว่าการใช้เลเซอร์ให้ผลดีกว่าการใช้เทคนิคอื่นๆ ซึ่งอาจทำให้วงจรแตกออกเป็นเสี่ยงๆ หรืออาจจะเป็นรอยขีดไม่คม การใช้แสงเลเซอร์จะช่วยลดการสูญเสียวงจร และสามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ [18]



รูปที่ 3.9 การแกะสลักด้วยเลเซอร์ [37]

- การทำตราประทับด้วยแสงเลเซอร์ (Laser marking) คือ การทำให้วัสดุหลุดหายออกจากผิว จึงทำให้เห็นรอยของการทำตราประทับ กรณีดังกล่าวช่วยทำให้สามารถแกะสลักตัวเลขระบุเฉพาะหรือโลโก้ได้ การทำตราประทับนี้สามารถใช้ Nd:YAG เลเซอร์ชนิดพัลส์หรือ CO₂ เลเซอร์ที่ใช้ได้ทั้งชนิด CW หรือพัลส์ [18] รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างการทำตราประทับ

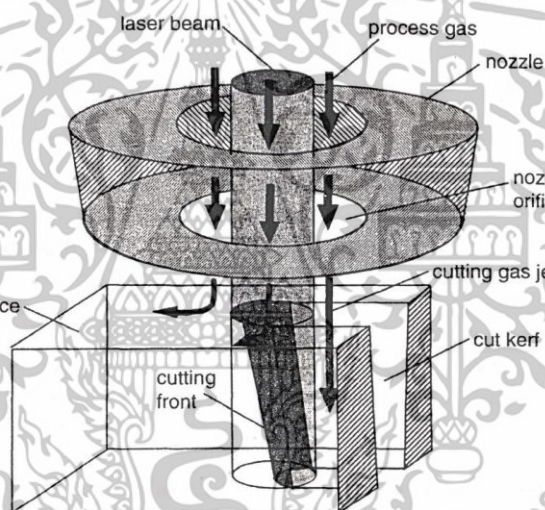


รูปที่ 3.10 การทำตราประทับด้วยเลเซอร์ [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 กลไกการตัดด้วยเลเซอร์

การตัดด้วยเลเซอร์นั้นเป็นกระบวนการตัดด้วยความร้อนชนิดหนึ่ง ซึ่งอาศัยความร้อนจากการแผ่รังสีของลำแสงเลเซอร์ที่ถ่ายเทไปยังวัตถุที่ต้องการตัด ลำแสงเลเซอร์นั้นสามารถรวมแสงให้เกิดจุดโฟกัสที่มีขนาดเล็กและมีความแม่นยำสูง ซึ่งในการรวมแสงนั้นจะทำให้มีการส่งพลังงานไปสู่ชิ้นงานที่ต้องการตัด โดยวัตถุนั้นจะดูดซับความร้อนจากลำแสงเลเซอร์ ทำให้ชิ้นงานเกิดความร้อนสูงขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลว และทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายไปตามเส้นทางที่ลำแสงเลเซอร์วิ่งผ่านไปยังชิ้นงาน จึงทำให้เกิดรอยตัดเป็นแนวยาว เราเรียกส่วนของรอยตัดว่า Cut kerf โดยปกติแล้วส่วนของโลหะที่หลอมละลายจะถูกเป่าออกไปโดยความดันของแก๊สช่วย (Assist gas) ดังรูปที่ 3.11 แสดงกลไกการตัดด้วยเลเซอร์



รูปที่ 3.11 กลไกในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์ [39]

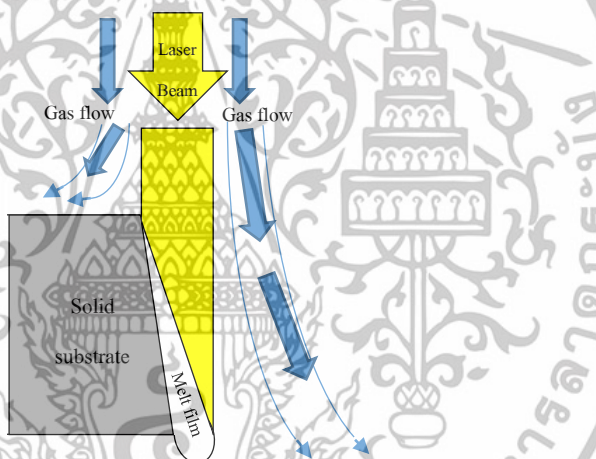
กลไกในการตัดด้วยเลเซอร์จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับโหมดในการตัดว่าเป็นแบบพัลส์หรือ แบบต่อเนื่อง (Continuous wave, CW) ระดับพลังงาน และการใช้ประโยชน์ของแก๊สช่วย ตัวอย่างเช่น การตัดแบบการกลายเป็นไอ (Vaporization cutting), การตัดแบบฟิวชัน (Fusion cutting), การตัดแบบออกซิเดชัน (Oxidation cutting), การแตกร้าวจากความเค้นทางความร้อน (Thermal stress cracking), การสลายตัวทางเคมี (Chemical degradation), การเซาะร่อง (Scribbing) และการตัดเย็น (Cold cutting) โดยในการเลือกวิธีการตัดที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการตัด ความหนาของชิ้นงาน และการเลือกชนิดของเลเซอร์ โดยวิธีในการตัดเลเซอร์ที่สำคัญมีดังนี้

1. การตัดแบบฟิวชัน (Laser fusion cutting)

ในการตัดแบบฟิวชันหรือสามารถเรียกได้อีกว่า การตัดความดันสูงหรือการตัดโดยใช้แก๊สเฉื่อย (High-pressure or inert gas cutting) เป็นการตัดโดยทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายแล้ว ส่วนชิ้นงานที่หลอมละลายนั้นจะถูกเป่าออกโดยแก๊สเฉื่อยที่มีความดันสูง (2 MPa ขึ้นไป) แก๊สเฉื่อยที่ใช้โดยทั่วไปจะใช้แก๊สไนโตรเจนหรืออาร์กอน ที่มีหน้าที่เป่าส่วนวัสดุที่หลอมละลายออกไปจากรอยตัด (Kerf) และยังช่วยรักษาอุณหภูมิของชิ้นงานในส่วนที่ต้องการตัดไม่ให้เกิดผลกระทบจากอากาศภายนอก รูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพการตัดแบบฟิวชัน ซึ่งในการตัดวิธีนี้สามารถนำไปใช้ได้กับวัสดุที่เป็นโลหะทุกชนิด โดยเฉพาะสแตนเลส เหล็กกล้าผสมสูง อลูมิเนียม และไททาเนียม รวมไปถึงเทอร์โมพลาสติก โพลีเมอร์ และเซรามิกบางชนิด [39]



รูปที่ 3.12 แผนภาพแสดงลักษณะของการตัดด้วยเลเซอร์แบบฟิวชัน

2. การตัดแบบออกซิเดชัน (Laser oxidation cutting)

การตัดแบบออกซิเดชันเป็นการใช้แก๊สช่วยที่เป็นรีแอคทีฟแก๊สหรือแก๊สที่ทำให้มีการเกิดปฏิกิริยา เช่น แก๊สออกซิเจน หรืออากาศ โดยจะมีกระบวนการที่ทำให้เกิดพลังงานเกิดขึ้นที่เรียกว่าปฏิกิริยาการคายความร้อน (Exothermic reaction) [39-41] โดยส่วนใหญ่มักจะใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย การตัดแบบนี้มักไปใช้กับวัสดุที่เป็นโลหะ โดยเฉพาะเหล็กเหนียว (Mild steel) และเหล็กกล้าผสมต่ำ (Low alloyed steel) ซึ่งจะทำให้มีความร้อนสูงขึ้นในกระบวนการตัด จึงสามารถเพิ่มความเร็วตัดได้มากกว่าการตัดแบบฟิวชัน [39] อย่างไรก็ตามผิวในรอยตัดจะเกิดการเผาไหม้ และมีคุณภาพของผิวในรอยตัดที่ต่ำกว่าการตัดแบบฟิวชัน สามารถอธิบายปฏิกิริยาการคายความร้อนตามทฤษฎีได้จากสมการที่ 3.1 ดังนี้ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

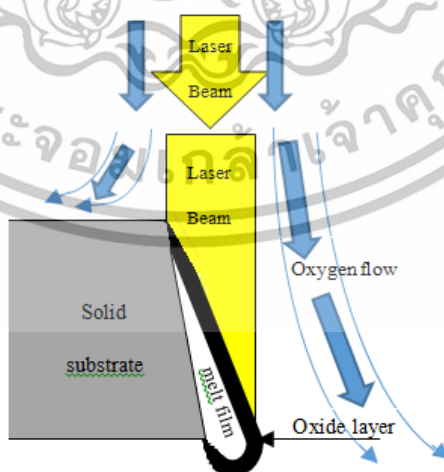


พลังงานความร้อนที่ได้มาจากปฏิกิริยาการคายความร้อนหรือปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ได้โลหะชนิดต่างๆ แสดงอยู่บนตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พลังงานความร้อนที่คายออกมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันสำหรับโลหะชนิดต่างๆ [1]

Material	Oxidation energy (kJ mol ⁻¹)
Iron	822
Aluminium	1670
Copper	160
Titanium	912
Nickel	244
Lead	276

โดยการตัดในวิธีนี้จะมีความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและมีชั้นออกไซด์ (Oxide layer) เกิดขึ้นอยู่ในผิวของรอยตัด ซึ่งเป็นการเพิ่มการดูดกลืนความร้อนจากการแผ่รังสีของเลเซอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเหล็กเหนียวและเหล็กกล้าผสมต่ำ การเกิดออกไซด์นี้เป็นการช่วยลดความหนืดและแรงตึงผิวของเหล็กที่หลอมละลาย ทำให้ง่ายต่อการขับโลหะเหลวนี้ออกจากรอยตัด (ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1900 K) รูปที่ 3.13 แสดงแผนภาพการตัดแบบออกซิเดชัน สิ่งสำคัญในการตัดด้วยวิธีนี้คือการใช้กำลังของเลเซอร์และตัวแปรอื่นๆให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดการไหม้ภายในรอยตัด

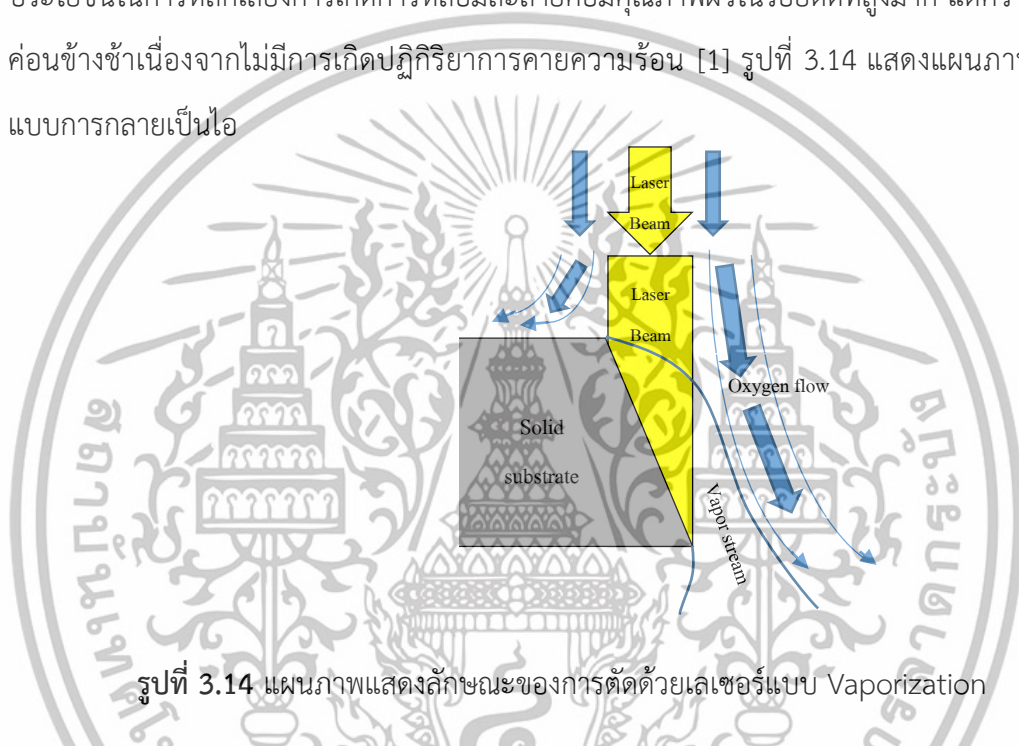


รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงลักษณะของการตัดด้วยเลเซอร์แบบออกซิเดชัน

3. การตัดแบบการกลายเป็นไอ (Laser vaporization cutting)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตัดวิธีนี้มักใช้ได้ทั้งเลเซอร์ชนิดพัลส์ และ CW โดยมักใช้ในกรณีที่วัสดุมีการหลอมละลายเป็นของเหลวยาก โดยวิธีนี้เป็นการใช้เลเซอร์กำลังสูง โดยความหนาแน่นของกำลังที่ใช้อยู่ในช่วง 10^6 W mm⁻² เทียบเท่าได้กับการตัดแบบฟิวชัน 100 ครั้ง ทำให้วัสดุได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้วัสดุกลายเป็นไอก่อนที่จะมีการหลอมละลายเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการนำความร้อน วัสดุที่ถูกขับออกมีทั้งไอและของเหลวซึ่งถูกขับออกโดยแก๊สเฉื่อย วัสดุที่มักถูกตัดด้วยวิธีนี้คือ ไม้บางชนิด โพลีเมอร์โพลีเมทิลเมทาไครเลตหรือพีเอ็มเอ็มเอ (Polymethylmethacrylate, PMMA) ซึ่งประโยชน์ในการหลีกเลี่ยงการเกิดการหลอมละลายคือมีคุณภาพผิวในรอยตัดที่สูงมาก แต่ความเร็วตัดค่อนข้างช้าเนื่องจากไม่มีการเกิดปฏิกิริยาการคายความร้อน [1] รูปที่ 3.14 แสดงแผนภาพการตัดแบบการกลายเป็นไอ



รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงลักษณะของการตัดด้วยเลเซอร์แบบ Vaporization

4. การสลายตัวทางเคมี (Chemical degradation)

การตัดเลเซอร์ด้วยวิธีการสลายตัวทางเคมีเป็นการใช้ลำแสงเลเซอร์เพื่อสลายพันธะเคมีของอะตอมและสร้างสารประกอบใหม่ การตัดเลเซอร์ด้วยวิธีนี้ใช้ในการตัดไม้ โพลีเมอร์ ยาง และวัสดุผสมบางชนิด โดยทั่วไปความเร็วในการตัดจะช้ากว่าการตัดแบบหลอมละลาย (แบบฟิวชันและออกซิเดชัน) และมีคุณภาพผิวรอยตัดสูง ถึงแม้ว่าอาจจะต้องทำความสะอาดส่วนที่หลงเหลืออยู่บ้าง

5. การเซาะร่อง (Scribing)

ในจุดประสงค์ของการ Scribing คือ การเซาะร่องหรือการเจาะรูที่ไม่ทะลุลงบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นการใช้พลังงานต่ำ ความหนาแน่นกำลังของการพัลส์สูง จึงทำให้ชิ้นงานกลายเป็นไอโดยที่ไม่มีบริเวณกระทบร้อนเกิดขึ้น (Heat affected zone, HAZ) ในการตัดด้วยวิธีนี้จะมีรอยบากเกิดขึ้นบนชิ้นงานส่งผลให้มีความเครียดเกิดขึ้น ซึ่งอาจทำให้วัสดุเกิดความเสียหายไปตามเส้นทางการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดและอาจเกิดการงอตัวได้ วิธีการตัดนี้ใช้กับเซรามิกบางชนิด อลูมินา รวมไปถึงแก้วและวัสดุผสมอื่นๆ

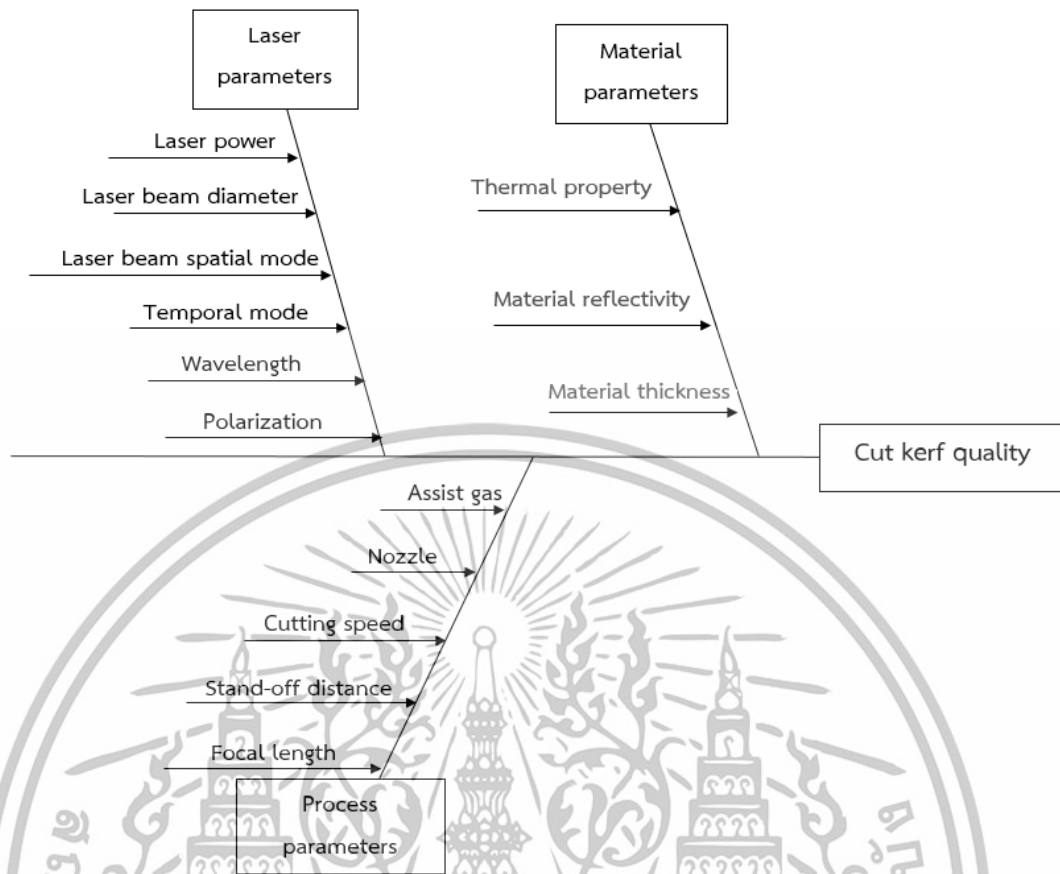
ในการตัดเลเซอร์ทั้งหมดที่กล่าวมา อาจสรุปการนำไปตัดสำหรับวัสดุต่างๆได้ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีการตัดเลเซอร์สำหรับวัสดุแบบต่างๆ [1]

Material	Inert gas melt shearing	Reactive gas melt shearing	Vaporization	Chemical degradation	Scribing
Ferrous alloys	✓	✓	-	-	-
Non-ferrous alloys	✓	✓(Ti)	-	-	-
Polymers	✓(Thermoplastics)	✓(Thermosets)	✓(PMMA)	(Thermosets)	-
Ceramics	✓	-	-	-	✓
Glasses	✓	-	-	-	✓
Elastomers	-	-	-	✓	-
Composites	✓	-	-	✓	✓

3.6 ตัวแปรที่มีผลต่อการตัดด้วยเลเซอร์

การตัดเลเซอร์เป็นกระบวนการตัดที่ต้องอาศัยตัวแปรหรือปัจจัยหลายอย่างในการตัด ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การตัดด้วยเลเซอร์สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือ ตัวแปรจากเลเซอร์ ตัวแปรจากวัสดุ และตัวแปรในกระบวนการตัด สามารถเขียนผังก้างปลา (Fish bone diagram) ได้ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ผังก้างปลาสำหรับตัวแปรที่มีผลต่อการตัดด้วยเลเซอร์

3.6.1 ตัวแปรจากเลเซอร์ (Laser parameters)

ตัวแปรจากเลเซอร์เป็นตัวแปรที่เกิดจากเครื่องกำเนิดเลเซอร์และคุณสมบัติของลำแสงเลเซอร์ ได้แก่ กำลังของเลเซอร์ เส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ โหมดเชิงพื้นที่ โหมดเชิงเวลาหรือโหมดที่ใช้ในการตัด ความยาวคลื่น และการโพลาไรซ์

1. กำลังของเลเซอร์ (Laser power)

กำลังของเลเซอร์เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการตัดเลเซอร์อย่างมาก ในการเพิ่มหรือลดกำลังของเลเซอร์จะพิจารณาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น เลเซอร์กำลังสูงจะเหมาะกับวัสดุที่ค่อนข้างหนา หรือในกรณีที่ต้องการเพิ่มความเร็วการตัด ส่วนเลเซอร์กำลังต่ำเหมาะกับการตัดแบบไม่ทะลุ นอกจากนี้กำลังของเลเซอร์ยังส่งผลต่อการหลอมละลายของวัสดุ ถ้าหากใช้กำลังที่สูงมากเกินไปจะทำให้รอยตัดมีความกว้างมาก เนื่องจากเกิดการเผาไหม้ภายในรอยตัด และยังส่งผลให้เกิดหยดโลหะที่แข็งตัวเกาะติดอยู่ภายใต้รอยตัดมากขึ้น ส่งผลให้คุณภาพของรอยตัดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ (Laser beam diameter)

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเลเซอร์เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อ การตัดวัสดุ โดยสำหรับการตัดด้วยเลเซอร์ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะถูกทำให้มีขนาดเล็ก แต่ใน ส่วนของการเจาะด้วยเลเซอร์ ความลึก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และรูปร่างของรูเจาะจะขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของกำลังของเลเซอร์ (Laser power density) ซึ่งได้นิยามไว้เป็นกำลังต่อขนาดของ พื้นที่หน้าตัดของลำแสงเลเซอร์ ดังสมการที่ 3.2 [27]

$$P_d = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

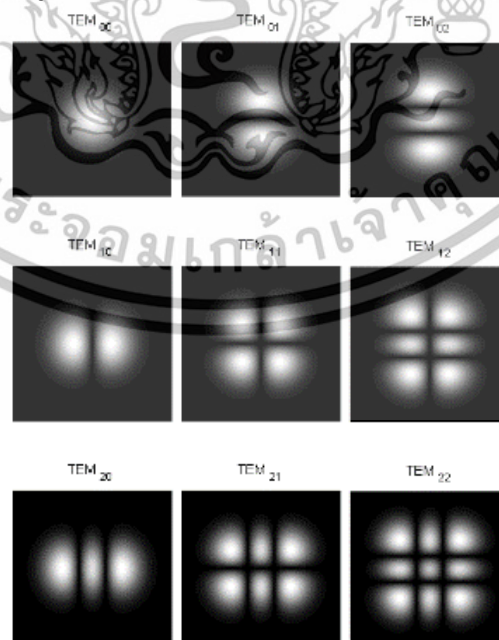
เมื่อ P_d คือ ความหนาแน่นของกำลัง, W/mm^2

P คือ กำลังของเลเซอร์, W

A คือ พื้นที่หน้าตัดของลำแสงเลเซอร์, mm

3. โหมดเชิงพื้นที่ของลำแสงเลเซอร์ (Laser beam spatial mode) หรือโหมดตามขวาง (Transverse mode)

โหมดเชิงพื้นที่เป็นลักษณะการกระจายตัวบนผิวของลำแสงเลเซอร์ ซึ่งมีหลายโหมดด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ในการตัดเลเซอร์จะใช้โหมด TEM_{00} โดยลำแสงเลเซอร์ในโหมดนี้สามารถรวมแสง ให้มีขนาดเล็กมากและมีความหนาแน่นของกำลังที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับโหมดชนิดอื่นๆทำให้มีรอยตัด แคมสามารถตัดที่ความเร็วตัดสูงและตัดชิ้นงานที่หนาได้โดยเกิดความหยาบในรอยตัดน้อย [1, 42]



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างลักษณะของโหมดตามขวางชนิดต่างๆของแสงเลเซอร์ [43]

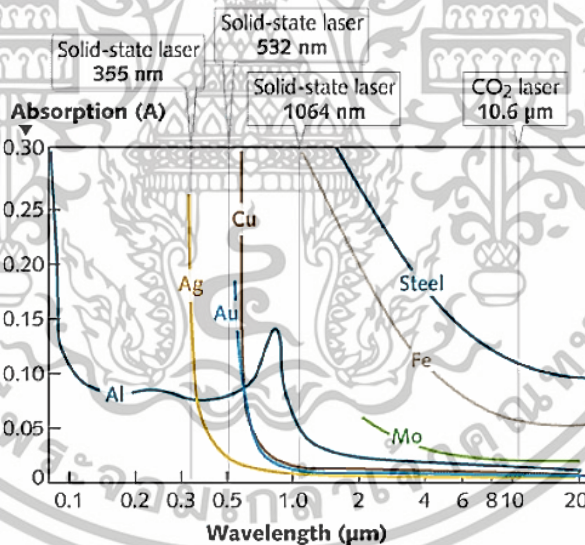
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. โหมดเชิงเวลา (Temporal mode)

ในการตัดเลเซอร์มีโหมดในการตัดสองแบบด้วยกันคือ CW และแบบพัลส์ โดยการตัดแบบต่อเนื่องมักจะใช้สำหรับการตัดที่ต้องการความเร็วการตัดสูง มีผิวในรอยตัดเรียบ และสามารถตัดกับชิ้นงานที่ค่อนข้างหนาได้ ส่วนแบบพัลส์ ในกรณีที่เป็นลำแสงที่มีกำลังต่ำ โดยทั่วไปจะใช้ในการตัดที่ต้องการความแม่นยำสูง ส่วนพัลส์ที่มีกำลังสูงมักใช้ในการตัดวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง และใช้ในการตัดชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน [1]

5. ความยาวคลื่น (Wavelength)

ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ชนิดหนึ่งๆนั้นเป็นสิ่งที่ไม่สามารถปรับได้ และเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการดูดกลืนแสงของวัสดุชนิดต่างๆ โดยวัสดุต่างชนิดกันจะมีค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นที่ต่างกัน [27] ในการตัดเลเซอร์จึงควรเลือกชนิดของลำแสงเลเซอร์ให้เหมาะสมกับวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยกำลังของเลเซอร์ที่สูงมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงอินฟราเรด [27] คือช่วง 700 nm ถึง 1 mm โดยเลเซอร์ชนิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ที่ 10.6 μm สามารถตัดวัสดุได้หลายชนิดทั้งวัสดุที่เป็นโลหะและไม่ใช่โลหะ เนื่องจากมีค่าการดูดกลืนที่สูง



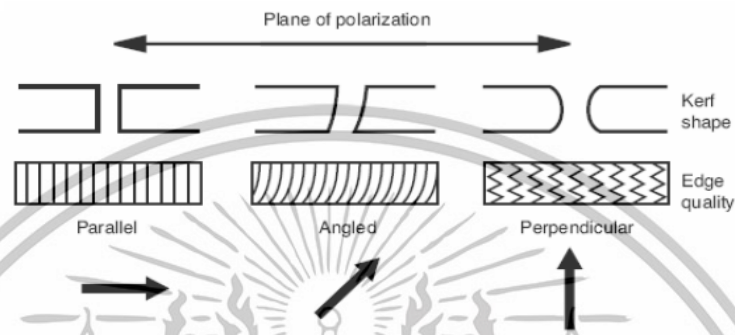
รูปที่ 3.17 การดูดกลืนแสงของวัสดุและความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดต่างๆ [44]

6. การโพลาไรซ์ (Polarization)

คลื่นแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยคลื่นแม่เหล็กและคลื่นไฟฟ้า แสงเลเซอร์อาจจะเป็นแสงที่โพลาไรซ์หรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของเลเซอร์ [27] ซึ่งการโพลาไรซ์เป็นการทำให้คลื่นแสงมีการสั่นในแกนเดียว ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการตัดเลเซอร์ โดยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเลเซอร์ที่มีลำแสงโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linearly polarized) ส่วนเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ Nd:YAG เป็นเลเซอร์ที่มีลำแสงไม่โพลาไรซ์ [1] ผลกระทบของการตัดเลเซอร์ด้วยแสงที่โพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเป็นไปตามรูปที่ 3.18 เมื่อลำแสงเลเซอร์เป็นลำแสงที่โพลาไรซ์ในทิศทางของการตัด ทำให้ได้คุณภาพรอยตัดที่ดี คือ รอยตัดแคบ มีสันที่คม และเป็นเส้นตรง ในขณะที่ระนาบการโพลาไรซ์ของเลเซอร์ที่แตกต่างออกไปจะทำให้การดูดกลืนพลังงานลดลง ส่งผลให้ต้องใช้ความเร็วตัดที่ลดลง มีความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้น มีความหยาบผิวในรอยตัดมากขึ้น และขอบของรอยตัดไม่ตั้งฉาก [31]



รูปที่ 3.18 ผลของระนาบของการโพลาไรซ์ของเลเซอร์กับคุณภาพการตัด [31]

3.6.2 ตัวแปรจากวัสดุ (Material parameters)

นอกจากตัวแปรที่เกิดจากแหล่งกำเนิด คือ ตัวแปรจากเลเซอร์ ที่ส่งผลต่อการตัดด้วยเลเซอร์ ยังมีตัวแปรจากวัสดุที่นำมาตัดหรือใช้เป็นชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป โดยคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุ คือ คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ค่าการสะท้อน (Reflectivity)

1. คุณสมบัติทางความร้อน

โดยทั่วไปในการแบ่งประเภทของวัสดุสามารถแบ่งเป็นสองกลุ่ม คือ โลหะ และ อโลหะ ในกลุ่มของโลหะจะมีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature) และการสะท้อนแสง (Optical reflectivity) ที่สูง จึงทำให้การตัดโลหะด้วยเลเซอร์จะยากกว่าการตัดอโลหะ เนื่องจากต้องใช้กำลังของเลเซอร์ที่สูงและต้องลดความเร็วตัดเพื่อให้โลหะเกิดการหลอมละลาย ซึ่งจะให้มีผลตามมาคือในการลดความเร็วตัดจะทำให้ผิวของรอยตัดมีคุณภาพต่ำ [1]

2. การสะท้อนแสง

ค่าการสะท้อนหรือค่าการดูดกลืนแสงของวัสดุเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการตัดเลเซอร์ การสะท้อนแสงจะแปรผันตามความยาวคลื่น มุมตกกระทบของแสงเลเซอร์ และพื้นผิวของวัสดุ [27] ตัวอย่างของการสะท้อนแสงของโลหะเช่น เมื่อความยาวคลื่นของเลเซอร์สั้นลงการสะท้อนแสงจะลดลงและการดูดกลืนแสงจะมากขึ้น ในโลหะที่มีการนำไฟฟ้าสูง เช่น อลูมิเนียม (Al) และทองแดง

(Cu) มีค่าการสะท้อนสูงมาก (ประมาณ 98%) สำหรับการตัดด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุจะช่วยลดการสะท้อนได้ [42]

ตัวอย่างการตัดด้วยเลเซอร์สำหรับวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้มากในอุตสาหกรรม มีดังนี้

● การตัดเลเซอร์ในโลหะ

โดยทั่วไปในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์มักจะใช้แก๊สช่วยในการตัด ลำแสงเลเซอร์จะถูกโฟกัสอยู่บนผิวของโลหะโดยการรวมแสงด้วยเลนส์นูนหรือบางครั้งอาจจะรวมแสงด้วยกระจกเว้า จะใช้กำลังของเลเซอร์ที่เพียงพอที่จะทำให้โลหะเกิดการหลอมละลายและมีแก๊สช่วยที่ถูกส่งผ่านออกมาทางหัวตัดเพื่อทำหน้าที่เป่าโลหะเหลวออกไป ในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์โดยปกติแล้วจะมีข้อจำกัดให้ตัดวัสดุบาง คือไม่เกิน 6 mm แต่ยังมีงานวิจัยสำหรับการตัดเลเซอร์ในโลหะที่มีความหนา 100 mm [39]

ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้เลเซอร์ชนิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการตัดโลหะ และแบ่งประเภทของโลหะไว้สามชนิดคือ เหล็กคาร์บอนต่ำ (Mild and low-alloy steels) สแตนเลส (Stainless steels) และกลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Nonferrous metals) ดังนี้

1. การตัดเหล็กคาร์บอนต่ำ หรือ เหล็กเหนียว ในการตัดเหล็กชนิดนี้จะใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแก๊สออกซิเจนกับเหล็กที่หลอมละลายทำให้เกิดความร้อนมากขึ้น และช่วยเพิ่มความเร็วในการตัด แต่ถ้าหากคุณภาพผิวของรอยตัดมีความสำคัญหรือต้องการคุณภาพผิวมากกว่าความเร็วในการตัดจะใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สช่วยในการตัด เช่น แก๊สไนโตรเจน แม้ว่าแก๊สไนโตรเจนจะไม่ใช้แก๊สเฉื่อยโดยสมบูรณ์เท่าแก๊สอาร์กอน แต่เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนมีราคาที่ถูกกว่าจึงมีการนำมาใช้มากกว่า ความดันของแก๊สในการใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สช่วยโดยปกติจะต้องมากกว่า 1 bar สำหรับในการตัดเหล็กคาร์บอนต่ำ [39]

2. การตัดสแตนเลส สแตนเลสทุกเกรดสามารถตัดเลเซอร์ด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถใช้ทั้งแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วย โดยทั่วไปมักใช้แก๊สไนโตรเจนเนื่องจากให้คุณภาพผิวตัดที่ดีกว่าแต่ความเร็วในการตัดจะน้อยกว่าในการตัดด้วยแก๊สออกซิเจนประมาณ 30 - 60% [39] โดยทั่วไปมักใช้แล้วสแตนเลสมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ (Low thermal conductivity) จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานในการตัดสูง หรือกล่าวได้ว่าขนาดความหนาของสแตนเลสจะขึ้นอยู่กับความร้อยหรือกำลังของเลเซอร์เป็นหลัก สำหรับการใช้ออกซิเจนเป็นแก๊ส

ช่วยในการตัดสแตนเลส นั้น เนื่องจากสแตนเลสมีส่วนประกอบของโครเมียมซึ่งสามารถทำให้เกิดออกไซด์ได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน จึงทำให้เกิดการผสมกับของโลหะเหลวที่ด้านบนของรอยตัด หรือถ้าใช้แก๊สออกซิเจนที่ความดันสูงก็จะทำให้เกิดหยดโลหะเหลว (Dross) เกาะติดอยู่บริเวณด้านล่างของรอยตัด และเกิดผิวรอยตัดที่หยาบ ดังนั้นในการตัดสแตนเลสด้วยแก๊สออกซิเจนจึงทำให้เกิดข้อบกพร่องต่อชิ้นงานได้มากกว่าในกรณีที่ใช้วัสดุเป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ ในการตัดสแตนเลสด้วยเลเซอร์โดยทั่วไปจะใช้แก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน เป็นแก๊สช่วย เนื่องจากให้คุณภาพผิวที่ดีกว่า ข้อควรระวังคือควรหลีกเลี่ยงการสูดดมไอของโครเมียมที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัด [1]

3. กลุ่มโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Nonferrous metals) โลหะที่ไม่ใช่กลุ่มเหล็กคือโลหะที่ไม่มีแร่เหล็กเป็นส่วนประกอบ เช่น อลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum alloys) ไททาเนียมอัลลอย (Titanium alloys) นิกเกิลอัลลอย (Nikel alloys) ทองแดง (Copper alloys)

อลูมิเนียมอัลลอย สามารถใช้เลเซอร์ประเภทคาร์บอนไดออกไซด์ในการตัดและสามารถใช้ได้ทั้งแก๊สเฉื่อยและแก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยความเร็วตัดและความหนาสูงสุดของอลูมิเนียมที่สามารถตัดได้จะน้อยกว่าโลหะหลายชนิด เช่น สแตนเลส เพราะว่า อลูมิเนียมมีค่าการสะท้อนสูง (High reflectivity) จึงจำเป็นต้องใช้กำลังของเลเซอร์ที่สูงในการตัด เนื่องจากอลูมิเนียมมีค่าการสะท้อนแสงสูง จึงมีข้อควรระวังสำหรับการตัดอลูมิเนียมอัลลอย คือต้องมีการปรับหัวตัดให้มีมุมเอียงเล็กน้อยเพื่อป้องกันไม่ให้ลำแสงเลเซอร์สะท้อนกลับเข้าไปในเลเซอร์ควิตี้เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ นอกจากนี้ในการตัดอลูมิเนียมจะมีชั้นออกไซด์ (Protective oxide layer) เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดความยากในการปรับตัวแปรตัดอยู่สองประการคือ ประการแรกการเปลี่ยนแปลงความหนาของออกไซด์ที่อยู่ตามเส้นแนวตัด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการดูดกลืนแสงของวัสดุ เมื่อค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไปจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการดูดกลืนความร้อน ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่ยากเมื่อต้องการปรับค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรความหนาของออกไซด์ ประการที่สองคือ ฟิล์มออกไซด์ของอลูมิเนียมที่หลอมเหลวจะขัดขวางกระบวนการคายความร้อนที่เกิดจากการตัดด้วยแก๊สออกซิเจนและยังทำให้เกิดอลูมิเนียมเหลวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผลที่ได้จากการตัดอลูมิเนียมด้วยแก๊สออกซิเจนคือจะมีผิวรอยตัดที่หยาบ แต่สามารถลดการเกิดหยดโลหะเหลวแข็งตัวได้จากการเพิ่มความดันแก๊สช่วย [1, 38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไททาเนียมอัลลอย สามารถตัดได้โดยใช้ทั้งแก๊สเฉื่อยและแก๊สออกซิเจนเช่นเดียวกับการตัดสแตนเลส แต่โดยทั่วไปมักไม่ใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ (Pure oxygen) ในการตัดไททาเนียม เนื่องจากแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับไททาเนียมและความร้อนจากเลเซอร์ทำให้รอยตัดมีขอบกร่อนมาก และมีความกว้างของรอยตัดมากกว่า 1 mm ดังนั้นจึงนิยมใช้อากาศเป็นแก๊สช่วยหากต้องการคุณภาพผิวของรอยตัดที่ดีกว่า ส่วนแก๊สเฉื่อยที่ใช้ในการตัดจะใช้ได้ทั้งแก๊สอาร์กอนและฮีเลียม แต่มักจะใช้อาร์กอนมากกว่า เนื่องจากอาร์กอนจะให้ผิวรอยตัดที่เรียบและสามารถเป่าหยดโลหะออกไปได้หมดถ้าความดันที่ใช้สูงเพียงพอ (ประมาณ 10 bar) ส่วนการใช้แก๊สไนโตรเจนจะทำให้เกิดการแตกหักของผิวขอบของรอยตัดอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี [1]

นิกเกิลอัลลอย นิกเกิลมีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ แต่การสะท้อนแสงสำหรับแสงเลเซอร์จากเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์สูง สามารถตัดได้โดยใช้ทั้งแก๊สเฉื่อยและออกซิเจนหรืออากาศเป็นแก๊สช่วย ในการตัดด้วยแก๊สออกซิเจนความดันต่ำหรือน้อยกว่า 6 bar จะเกิดหยดโลหะเหลวแข็งตัวเกาะติดอยู่ที่ผิวด้านล่าง และผิวรอยตัดจะเกิดออกไซด์ ส่วนการใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยในการตัดนิกเกิลอัลลอยมักใช้ที่ความดันสูง ทำให้ไม่มีรอยขรุขระและไม่มีเกิดออกไซด์เช่นเดียวกับการตัดสแตนเลส แต่ความเร็วตัดจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการตัดด้วยแก๊สออกซิเจน [1]

ทองแดง ทั้งในกรณีของการตัดทองแดงและอลูมิเนียมอัลลอยนั้นใช้ความเร็วในการตัดช้า เพราะที่โลหะทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงและการนำความร้อนที่สูง ซึ่งเป็นสิ่งที่ยากในการตัดแผ่นทองแดง โดยปกติความเร็วตัดในการตัดแผ่นทองแดงหนา 1 mm โดยใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยและกำลังเลเซอร์เท่ากับ 1,500 W จะอยู่ที่ 3 m/min ส่วนความเร็วในการตัดทองเหลืองที่หนาเท่ากันจะมีค่าเท่ากับ 5 m/min ในส่วนของผิวรอยตัดมีการเกาะติดของหยดโลหะเหลวแข็งตัวน้อย [38]

- **การตัดเลเซอร์ในอลูมิเนียม**

อลูมิเนียม หรือวัสดุที่ไม่ใช่โลหะเกือบทุกชนิดมีการดูดกลืนแสงจากความยาวคลื่นของเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์ และยังมีโลหะหลายชนิดที่ดูดกลืนแสงจากเลเซอร์ชนิด Nd:YAG ซึ่งเป็นสาเหตุที่อลูมิเนียมจำนวนมากสามารถตัดได้ด้วยเลเซอร์ ในกระบวนการตัดเลเซอร์ของอลูมิเนียมประกอบไปด้วยกลไก 3 รูปแบบคือ การตัดเฉือน (Melt shearing) การกลายเป็นไอ (Vaporization) และสลายตัวทางเคมี (Chemical degradation) [1] สามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตัดเฉือน เกิดจากการที่แสงเลเซอร์ทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายแล้วแก๊สช่วยจะมีหน้าที่ในการเป่าวัสดุที่หลอมละลายออกไป ตัวอย่างของวัสดุที่ถูกตัดโดยกลไกนี้ ประกอบไปด้วยเทอร์โมพลาสติก หรือ พอลิเมอร์ เช่น โพลีพร็อพไพลีน (Polypropylene) โพลีเอไมด์ (Polyamide) โพลีเอทิลีน (Polyethylene) และพลาสติก ABS เป็นต้น

การกลายเป็นไอ ในกรณีนี้วัสดุจะถูกทำให้กลายเป็นไอด้วยเลเซอร์ และไอของวัสดุจะถูกขับออกมาจากบริเวณการตัดโดยความดันของแก๊สช่วย ซึ่งวัสดุที่สามารถเกิดกลไกนี้ได้จะมีอุณหภูมิของการกลายเป็นไอใกล้เคียงกับอุณหภูมิจุดหลอมเหลว ในการตัดด้วยกลไกนี้ผิวของรอยตัดจะเรียบ มีความมันวาว และไม่มีวัสดุเหลวเกาะติดอยู่ด้านล่างของวัสดุ ตัวอย่างของวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่สามารถตัดด้วยกลไกนี้คือ อะคริลิก (Acrylic) เช่นกระจกอะคริลิก (Plexiglass หรือ perspex) และ โพลีออกซิเมทิลีน (Polyacetal หรือ polyoxymethylene: POM)

การสลายตัวทางเคมี โลหะที่สามารถตัดด้วยกลไกการสลายตัวทางเคมีได้คือวัสดุที่ไม่สามารถหลอมละลายได้ เช่น ไม้ เรซินประเภทเทอร์โมเซต (Thermoset resins) เป็นต้น ซึ่งวัสดุประเภทนี้จะถูกตัดด้วยเลเซอร์ได้โดยใช้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ และเกิดการสลายตัวไปเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่ต่างออกไป เช่น คาร์บอน และไอน้ำ เป็นต้น ส่วนเศษที่ไม่ต้องการจะถูกเป่าออกโดยแก๊สช่วย ในการตัดด้วยกลไกนี้ ผิวรอยตัดจะเรียบและถูกปกคลุมด้วยชั้นฝุ่นคาร์บอน

3.6.3 ตัวแปรในกระบวนการตัด (Process Parameters)

หลังจากทราบตัวแปรจากเลเซอร์ และตัวแปรจากวัสดุแล้ว สุดท้ายคือตัวแปรในกระบวนการตัด ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ง่าย ตัวแปรเหล่านี้ได้แก่ ชนิดและความดันของแก๊สช่วย (Assist gas) หัวตัด (Nozzle) ระยะระหว่างชิ้นงานกับหัวตัด (Stand-off) ความเร็วตัด (Cutting speed) ตำแหน่งโฟกัสและความยาวของโฟกัส (Focal plane position and focal length)

1. แก๊สช่วย (Assist gas)

การใช้แก๊สช่วยมีผลต่อกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์หลายประการ ได้แก่

- การขับหรือเป่าวัสดุที่หลอมเหลวออกไปจากรอยตัด ทำให้ไม่เกิดวัสดุแข็งตัวเกาะติดอยู่ที่ผิวใต้ชิ้นงาน
- การเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างแก๊สช่วยกับวัสดุ เช่นการใช้แก๊สออกซิเจนกับวัสดุที่เป็นโลหะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นและตัดได้เร็วขึ้น

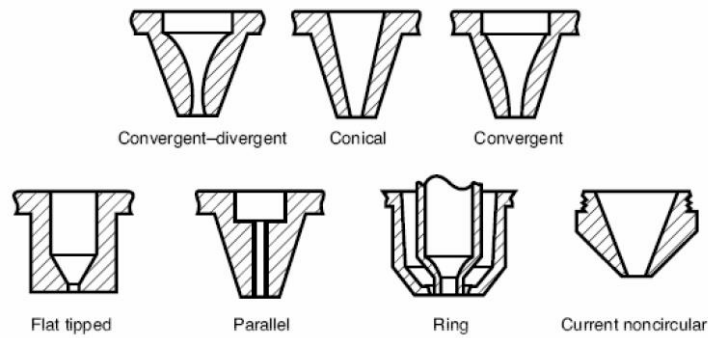
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การตัดวัสดุที่หนา จำเป็นต้องใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มสูงก่อให้เกิดพลาสมาได้ ในการใช้แก๊สช่วยจะเป็นการช่วยยับยั้งการเกิดพลาสมา
- การใช้แก๊สช่วยยังช่วยป้องกันเลนส์ที่ใช้ในการรวมแสง จากการกระเด็นของวัสดุที่หลอมละลาย
- การใช้แก๊สช่วยยังช่วยลดอุณหภูมิให้กับรอยตัด ทำให้ลดการเกิดบริเวณกระทบร้อนได้ (HAZ) แก๊สเฉื่อยที่นิยมใช้คือแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สที่มีราคาถูกมักนิยมนำมาใช้ตัดโลหะกลุ่มเหล็ก เช่น สเตนเลส และนิกเกิลอัลลอย แก๊สอาร์กอนนิยมนำมาตัดไททาเนียม ส่วนแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สที่ทำให้รอยตัดมีคุณภาพดีที่สุดแต่ยังมีราคาสูง อากาศมักใช้ในการตัดอะลูมิเนียม โพลีเมอร์ ไม้ วัสดุผสม อะลูมินา แก้ว เนื่องจากเป็นแก๊สที่หาได้ง่าย ส่วนแก๊สออกซิเจนมักถูกใช้เป็นแก๊สช่วย เมื่อความเร็วตัดเป็นสิ่งสำคัญที่สุด ส่วนคุณภาพรอยตัดมีความสำคัญรองลงมา การใช้แก๊สออกซิเจนจะใช้สำหรับตัดเหล็กเหนียว และสเตนเลส เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ในการใช้แก๊สแต่ละชนิด ถ้าหากความดันแก๊สต่ำมาก จะทำให้ส่วนของวัสดุที่หลอมละลายไม่สามารถถูกขับออกไปได้ทำให้ไม่สามารถตัดวัสดุได้

2. หัวตัด (Nozzle)

หัวตัดทำหน้าที่ 3 ประการ คือ ทำให้แก๊สช่วยที่ถูกขับออกมานั้นอยู่ในแนวแกนเดียวกับลำแสงเลเซอร์ ลดความดันเพื่อทำให้เลนส์มีการเคลื่อนไหวน้อยที่สุดหรือทำให้เลนส์ไม่เยื้องศูนย์ และช่วยให้ความดันแก๊สมีความเสถียรบนผิวของชิ้นงาน คือลดการเกิดความปั่นป่วนของแก๊ส โดยปกติเส้นผ่านศูนย์กลางหรือรูของหัวตัดอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 3 mm การเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูของหัวตัดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานที่ต้องการตัด หากหัวตัดมีรูที่เล็กเกินไปทำให้แก๊สที่ปล่อยออกมามีความเร็วสูง ส่งผลให้รอยตัดเกิดความขรุขระได้ ส่วนถ้าหากหัวตัดมีขนาดรูที่กว้างเกินไป ทำให้แก๊สที่ปล่อยออกมานั้นเป่าวัสดุในส่วนที่ไม่ต้องการซึ่งทำให้มีความสิ้นเปลืองแก๊สมาก และอาจทำให้แก๊สที่ปล่อยออกมาสู่รอยตัดมีความเร็วไม่เพียงพอในการเป่าวัสดุที่หลอมละลายให้ออกไปได้ ในการวางแนวให้หัวตัดและลำแสงเลเซอร์มีความตรงศูนย์ ส่งผลต่อคุณภาพของการตัด ส่วนถ้ามีการเยื้องศูนย์เกิดขึ้นทำให้แก๊สที่ถูกเป่าออกไปนั้นไม่ตรงกับบริเวณที่ต้องการตัด ทำให้เกิดการเผาไหม้เกิดขึ้นภายในรอยตัดและเกิดคุณภาพรอยตัดต่ำ ในงานอุตสาหกรรมมีการออกแบบหัวตัดที่แตกต่างกันในลักษณะงานที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 หัวตัดชนิดต่างๆสำหรับการตัดเลเซอร์ [31]

3. ระยะระหว่างชิ้นงานกับหัวตัด (Stand-off distance)

ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวตัดเป็นตัวแปรสำคัญในการตัดเลเซอร์ โดยระยะห่างนี้ส่งผลต่อรูปแบบการไหลของแก๊สช่วย ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการตัดและคุณภาพของรอยตัด ถ้าระยะห่างมีขนาดมากกว่า 1 mm จะทำให้ความดันแก๊สเกิดความแปรปรวน ปริมาณแก๊สที่มาทำปฏิกิริยากับโลหะไม่คงที่และยังทำให้ไม่สามารถควบคุมให้แก๊สช่วยเป่าโลหะเหลวออกไปได้ โดยปกติแล้วในการเลือกใช้ระยะห่างระหว่างหัวตัดและชิ้นงาน ควรเลือกใช้ช่วงที่เหมือนกันกับเส้นผ่านศูนย์กลางรูของหัวตัดที่ใช้ คือระหว่าง 0.5 ถึง 1.5 mm [1] เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความปั่นป่วนของแก๊ส การใช้ระยะห่างระหว่างหัวตัดและชิ้นงานที่น้อยทำให้การตัดมีความเสถียร แต่ก็มีความเสี่ยงที่เลนส์จะเกิดความเสียหายจากเศษโลหะที่กระเด็นเพิ่มมากขึ้น

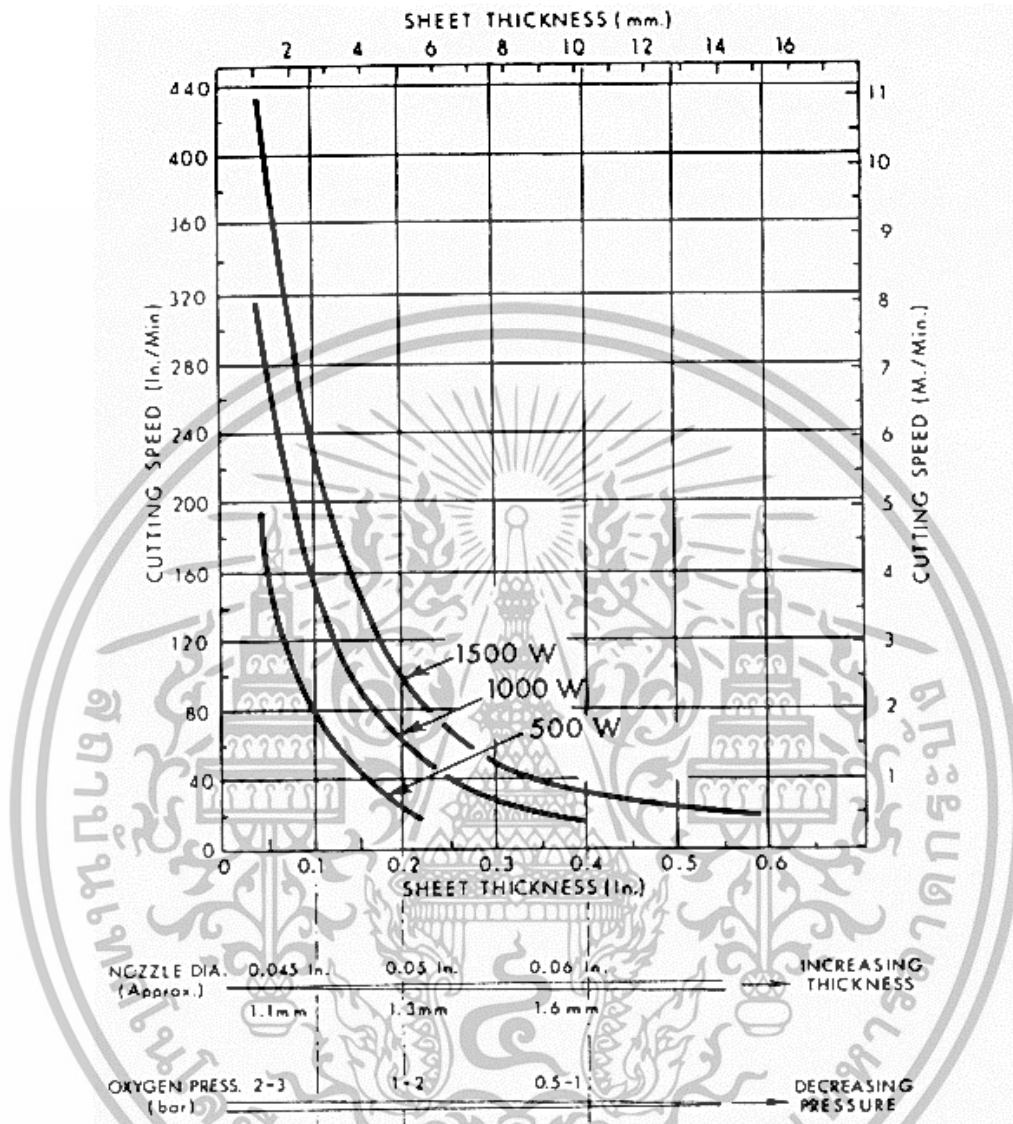
4. ความเร็วตัด (Cutting speed)

ในการตัดเลเซอร์ จำเป็นต้องมีการเคลื่อนที่ของหัวตัดหรือชิ้นงานที่ต้องการตัด ชิ้นงานจึงสามารถถูกตัดออกให้เกิดรอยตัดเป็นแนวยาวหรือเป็นเส้นทางที่ต้องการได้ การตัดเลเซอร์จะมีการเคลื่อนที่ของหัวตัดหรือชิ้นงานในอัตราเร็วที่แตกต่างกันออกไป ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.20 สามารถอธิบายเงื่อนไขสำหรับความเร็วตัดที่สำคัญ 3 ประการดังนี้

- ความเร็วตัดขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน โดยความเร็วจะลดลงเมื่อชิ้นงานมีความหนามากขึ้น สำหรับการตัดด้วย CO₂ Laser จะสามารถตัดเหล็กที่หนาได้
- ความเร็วตัดสัมพันธ์กับกำลังของเลเซอร์ โดยความเร็วตัดสามารถเพิ่มขึ้นได้ เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น
- เมื่อมีการเพิ่มความหนาของชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูของหัวตัดจะต้องเพิ่มขึ้น และความดันแก๊สออกซิเจนจะต้องลดลง เนื่องจากต้องการให้มีการไหลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สออกซิเจนที่เพียงพอต่อบริเวณที่ต้องการตัด ถ้าหากความดันมากเกินไปจะทำให้ผิวของรอยตัดเกิดการเผาไหม้ได้ [39]



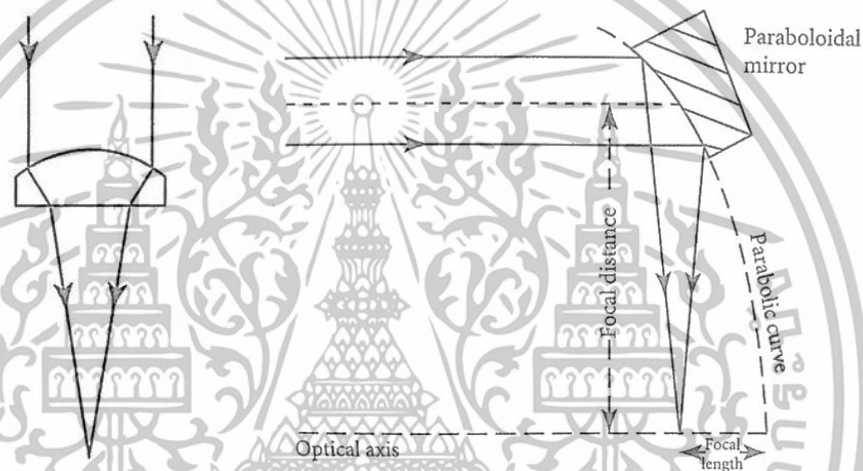
รูปที่ 3.20 ความเร็วตัดสำหรับเหล็กเหนียวที่กำลังของเลเซอร์ค่าต่างๆและแนวทางสำหรับการเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูของหัวตัดและความดันแก๊สออกซิเจน [45]

5. ตำแหน่งโฟกัสและความยาวของโฟกัส (Focal plane position and focal length)

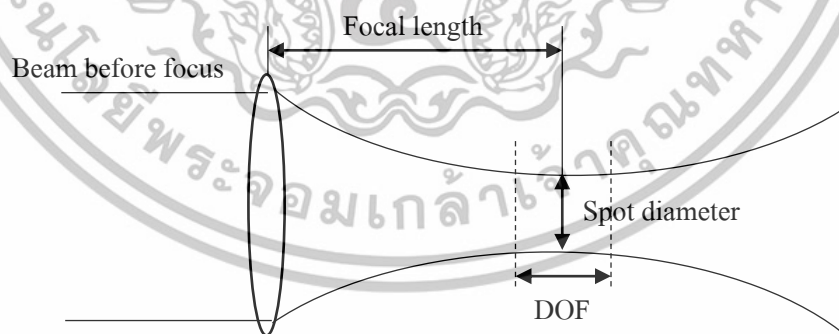
ในการตัดเลเซอร์จำเป็นต้องให้ลำแสงเลเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุด โดยสามารถใช้ได้ทั้งเลนส์นูนหรือกระจกเว้าในการรวมแสงได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 แต่โดยทั่วไปในการตัดเลเซอร์มักใช้เลนส์มากกว่า เนื่องจากใช้ระดับพลังงานที่ค่อนข้างต่ำ [40] การรวมแสงของลำแสงเลเซอร์จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.22 เมื่อลำแสงเลเซอร์ได้ผ่านการรวมแสงจากเลนส์นูนจะเกิดตำแหน่งที่เส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงที่แคบที่สุด เรียกว่าเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางลำแสง (Beam

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

spot diameter) ซึ่งจะอยู่ในช่วงความลึกของโฟกัส (Depth of focus: DOF) โดย DOF คือระยะที่ เลเซอร์โฟกัสไปบนผิวของชิ้นงานแล้วได้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเลเซอร์ที่น้อยที่สุดที่สามารถ ยอมรับได้ หรือกล่าวได้ว่าเป็นช่วงระยะโฟกัสของลำแสงเลเซอร์ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลง ของรัศมีของลำแสงเลเซอร์ โดยระยะห่างจากตำแหน่งนี้ถึงเลนส์ เรียกว่า ระยะโฟกัส (Focal length) การใช้ DOF ที่ยาวนานั้นเหมาะสำหรับการตัดด้วยเลเซอร์เนื่องจากจะได้รอยตัดด้านข้างที่มีความขนาน กันมากที่สุด ตัวอย่างสำหรับเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ laser) ซึ่งใช้โหมด TEM₀₀ จะให้ ลำแสงเลเซอร์ที่เป็นจุด (Spot) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.15 mm มีความยาวโฟกัสอยู่ที่ 127 mm และช่วงความลึกของการโฟกัส (DOF) ประมาณ 1 mm



รูปที่ 3.21 การรวมแสงของเลเซอร์ด้วยเลนส์นูนและกระจกเว้า [1]



รูปที่ 3.22 แผนภาพการรวมแสงของเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ลักษณะเฉพาะในรอยตัดที่เกิดจากการตัดเลเซอร์

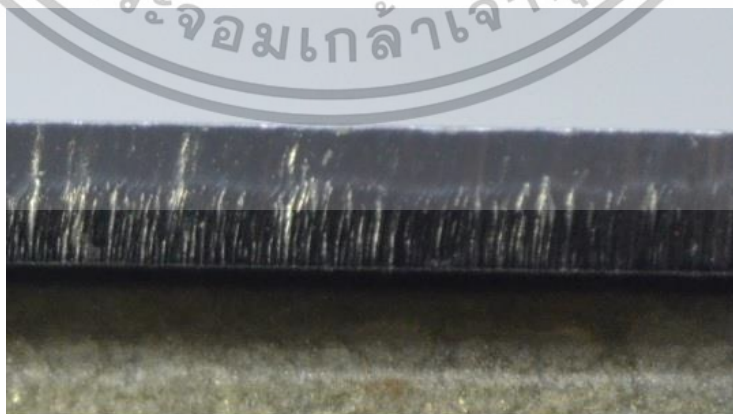
คุณภาพของรอยตัดสามารถประเมินได้จากลักษณะต่างๆที่เกิดจากการตัดด้วยเลเซอร์ เช่น ระยะความกว้างของรอยตัด (Kerf width) ความหยาบในรอยตัด (Surface roughness) หยดโลหะที่แข็งตัว (Dross) และบริเวณกระทบร้อน (Heat-affected zone, HAZ)

3.7.1 ระยะความกว้างของรอยตัด (Kerf width)

ความกว้างของรอยตัดที่เกิดจากการตัดด้วยเลเซอร์มีระยะตั้งแต่ 0.05 ถึง 1 mm โดยแปรผันตามความหนาของชิ้นงาน เช่นในการตัดวัสดุที่หนา การที่จะทำให้ความกว้างของรอยตัดแคบนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในการตัดวัสดุหนาจะทำให้มีความกว้างของรอยตัดมากกว่า ในการตัดที่เหมาะสม ความกว้างของรอยตัดนี้จะมีขนาดที่กว้างกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ที่จุดโฟกัส นอกจากนี้ความกว้างของรอยตัดยังขึ้นอยู่กับความดันของแก๊สช่วย โดยทั่วไปในการตัดเลเซอร์จะต้องการระยะความกว้างของรอยตัดที่แคบที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะความต้องการให้มีการสูญเสียวัสดุที่น้อยที่สุด

3.7.2 ความหยาบในรอยตัด (Surface roughness)

แถบริ้วในรอยตัดเป็นสิ่งที่สามารถเกิดขึ้นในผิวของรอยตัดโดยการตัดด้วยเลเซอร์ ซึ่งส่งผลต่อความหยาบในผิวของรอยตัด แสดงดังรูปที่ 3.23 การเกิดขึ้นของแถบริ้วในรอยตัดเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น การสั่นของอุปกรณ์ ความไม่เสถียรของกำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และการไหลของโลหะเหลว [31] ในการตัดเลเซอร์ต้องการคุณภาพของผิวที่ดี ดังนั้นควรปรับค่าตัวแปรต่างๆให้เหมาะสมในการตัดเลเซอร์เพื่อให้ความหยาบในรอยตัดน้อยที่สุด

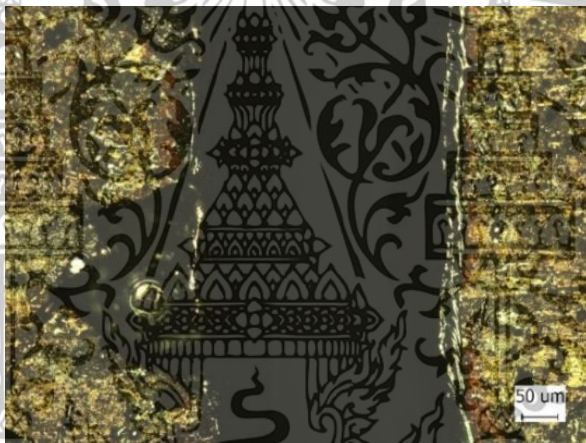


รูปที่ 3.23 แถบริ้วในรอยตัด (Striation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 หยตวัสดุที่แข็งตัว (Dross)

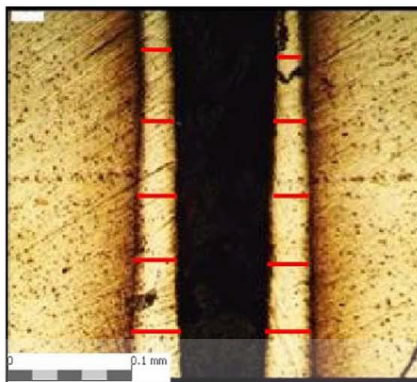
หยตวัสดุที่แข็งตัวที่เกาะติดอยู่ด้านล่างของรอยตัด ดังแสดงในรูปที่ 3.24 เกิดจากแก๊สช่วยที่เป่าโลหะเหลวลงมาสู่ด้านล่างของชิ้นงานในขณะที่ตัด และหยตวัสดุเหล่านั้นเกิดการแข็งตัวและเกาะติดอยู่กับชิ้นงาน ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในการตัดชิ้นงาน การเกิดขึ้นของหยตวัสดุที่แข็งตัวนี้เกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น ในการตัดเหล็กด้วยแก๊สออกซิเจน หยตโลหะที่แข็งตัวจะเกิดขึ้นจากระยะโพกัสที่ไม่ถูกต้อง ความดันของแก๊สช่วยต่ำเกินไป หรือความเร็วในการตัดสูงเกินไป ส่วนในการตัดสแตนเลสด้วยแก๊สเฉื่อยก็สามารถเกิดหยตวัสดุที่แข็งตัวได้ ซึ่งในการขจัดหยตวัสดุที่แข็งตัวในกรณีนี้ทำได้โดยการเพิ่มความดันแก๊สหรือเพิ่มความกว้างของรอยตัด นอกจากนี้การเคลือบผิววัสดุเพื่อป้องกันการกระเด็นของวัสดุเหลว (Antispatter coatings) ด้วยแกรไฟท์ หรือแมกนีเซียมคาร์บอเนต ก็ยังช่วยลดการเกิดหยตวัสดุที่แข็งตัวที่จะไปติดอยู่ที่ผิวของวัสดุที่เราต้องการในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์ได้อีกด้วย [39]



รูปที่ 3.24 หยตวัสดุที่แข็งตัว (Dross)

3.7.4 บริเวณกระทบร้อน (Heat-affected zone)

เนื่องจากการตัดด้วยเลเซอร์เป็นกระบวนการทางความร้อน จึงอาจเกิดบริเวณกระทบร้อนอยู่ในผิวของรอยตัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ในการตัดเหล็กคาร์บอนต่ำ การเกิด HAZ จะเพิ่มความแข็งให้กับชิ้นงานได้ ส่วนในการตัดเหล็กที่มีคาร์บอนปานกลางหรือสูง จะทำให้ผิวในรอยตัดมีความแข็งมาก ซึ่งเป็นข้อเสียคือชิ้นงานอาจจะเกิดการงอได้ ส่วนในการตัดเหล็กที่มีคาร์บอนสูงมาก จะทำให้เกิดความร้อนสูงและรุนแรงจนอาจทำให้เกิดรอยแตกหรือร้าวได้ [39]

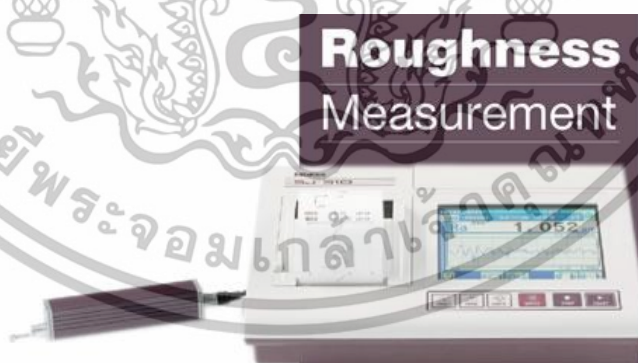


รูปที่ 3.25 บริเวณกระทบร้อน (Heat-affected zone: HAZ) [46]

3.8 การวัดความหยาบของพื้นผิว

ความหยาบผิว (Surface Roughness) หมายถึงขนาดความขรุขระของผิว หากมีความขรุขระมาก แสดงว่ามีความหยาบมาก หากมีความขรุขระน้อยก็แสดงว่ามีความหยาบน้อย ความขรุขระหรือความหยาบจะใช้กับผิวของวัสดุ ความหยาบผิวจัดเป็นสมบัติทางโลหะวิทยาอย่างหนึ่ง ในการวัดความหยาบผิวจะใช้เครื่องวัดความหยาบผิว [47]

โดยในหัวข้อนี้จะนำเครื่องมือวัดความหยาบผิว Mitutoyo Surftest SJ-310 แสดงดังรูปที่ 3.26 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดรุ่นที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมทั่วไป มาเป็นตัวอ้างอิงเพื่อให้เข้าใจวิธีการวัดที่ถูกต้องและเพื่อให้ได้ผลการวัดที่แม่นยำและมีความน่าเชื่อถือสูง [30]



รูปที่ 3.26 เครื่องวัดความหยาบรุ่น Mitutoyo Surftest SJ-310 [30]

เครื่องมือวัดความหยาบมีความแตกต่างจากเครื่องมือวัดทั่วไป ซึ่งสิ่งสำคัญประการหนึ่งคือมาตรฐานอุตสาหกรรมของเครื่องมือวัดซึ่งบ่งบอกว่าเครื่องมือวัดความหยาบผิวรุ่นนั้นๆ สามารถวัดความหยาบผิวของชิ้นงานตามข้อกำหนดของมาตรฐานใดบ้าง เช่น ISO 4287:1997 (ยุโรป), ANSI/ASME

B 46.1-1995 (อเมริกา), JIS B 0601-1994 (ญี่ปุ่น) เป็นต้น สิ่งสำคัญที่ควรระวังคือหากหมายเลขปีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของมาตรฐานที่ระบุในข้อกำหนดของงานเป็นปีปัจจุบันหมายเลขปีมากกว่าที่ปรากฏในเครื่องมือ ก็จะไม่สามารถใช้ได้นอกจากนี้แต่ละเครื่องยังใช้สัญลักษณ์การวัดที่แตกต่างกันตามมาตรฐานที่เครื่องนั้นๆ ใช้ เช่น Ra, Rq, Rz, Rz (JIS), Ry, Ry (DIN), Rc, Rpi, Rp, Rpm, Rv, Rvmax, Rti, Rt, R3zi, R3z, R3y, S, Pc (Ppi), Sm และ HSC เป็นต้น

มาตรวิทยาการวัดความหยาบผิว

โดยทั่วไปการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานสามารถวัดออกมาในสามแบบคือ

1) แสดงค่าสถิติ (Statistical descriptors) เช่นความหยาบผิวเฉลี่ย (Average roughness, Ra) Ra ความหยาบผิวรากกำลังสองเฉลี่ย (The root mean square roughness, Rq) หรือ ความสูงกลางของลักษณะความหยาบ (The mean height of the roughness, Rc) เป็นต้น

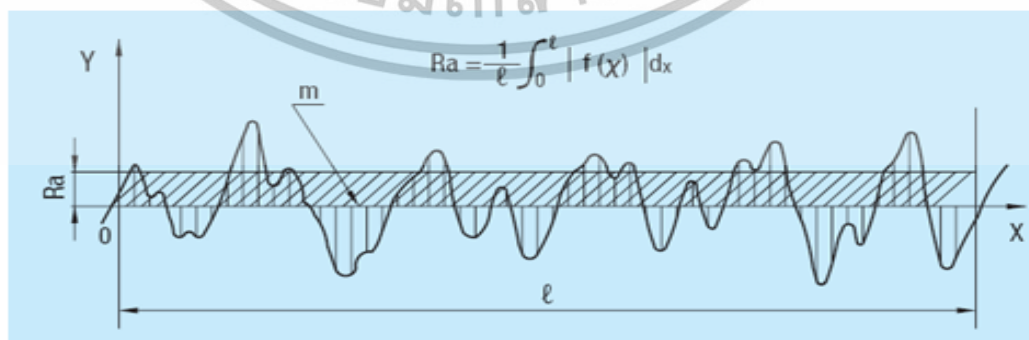
2) แสดงค่าสูงสุดต่ำสุด (Extreme value descriptors) ซึ่งในบางลักษณะงานอาจต้องการแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของความหยาบผิว เช่น จุดสูงสุด (The maximum peak height, Rp) จุดต่ำสุด (The maximum valley height, Rv)

3) แสดงค่าลักษณะพื้นผิว (Texture descriptors) คือการอธิบายรูปแบบของพื้นผิว โดยทั้งหมดนี้ ค่าสถิติ Ra เป็นค่าที่ดีที่สุดและได้รับการยอมรับในงานด้านวิศวกรรมมากที่สุด [48] ตัวอย่างของการวัดค่าความหยาบตามมาตรฐานต่างๆ สามารถแบ่งได้ดังนี้ [29]

3.8.1 ค่าความหยาบของผิวงานตามมาตรฐานของ ISO 4287

1. ความหยาบเฉลี่ย (Average roughness, Ra)

ค่าเฉลี่ยนี้วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ระยะค่าเฉลี่ยนี้จะอยู่บนกราฟตามแนวแกน X ของเส้นอ้างอิง และแนวแกน Y จะเป็นขนาดความหยาบผิว ค่า Ra หาได้จากสมการที่แสดงบนรูปที่ 3.27 มีหน่วยเป็นไมครอน (μm) เมื่อ $Y = f(X)$



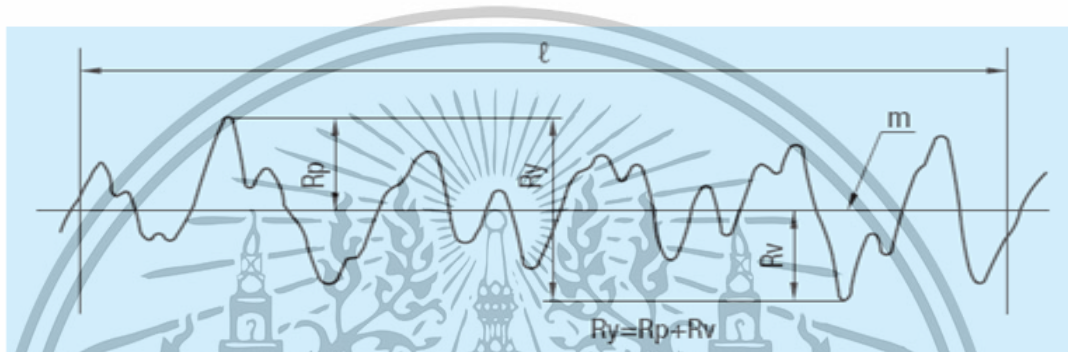
รูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่างในการหาค่าความหยาบเฉลี่ย (Ra) [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าความหยาบสูงสุด (Maximum height, Ry)

ค่าความหยาบสูงสุด (Ry) นี้ เกิดจากการรวมกันของจุดสูงสุด (The maximum peak height, Rp) และจุดต่ำสุด (The maximum valley height, Rv) โดยวัดจากเส้นอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 3.28 มีหน่วยเป็นไมครอน (μm)

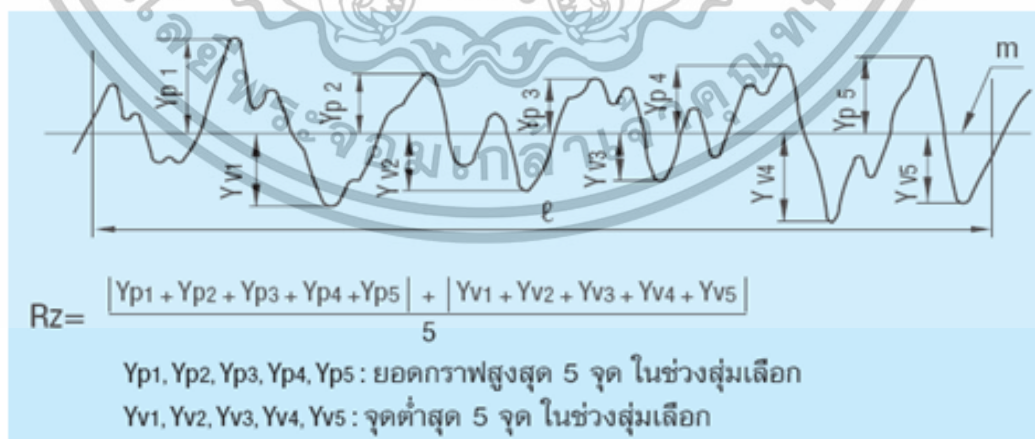
หมายเหตุ : การหาค่า Ry ควรเลือกบริเวณที่มีกราฟความหยาบปกติไม่ควรวัดบริเวณที่มีค่ากราฟสูงหรือต่ำผิดปกติ



รูปที่ 3.28 แสดงตัวอย่างในการหาค่าความหยาบสูงสุด (Ry) [47]

3. ค่าเฉลี่ยความหยาบของพื้นผิวแบบสิบจุด (Ten-spot average roughness, Rz)

ค่าเฉลี่ยนี้วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง โดยคำนวณจากความสูงของยอดกราฟ 5 จุดบน และความสูงของยอดกราฟ 5 จุดล่างมารวมกันและหาค่าเฉลี่ย มีหน่วยเป็นไมครอน (μm) วิธีคำนวณได้จากสูตรแสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 แสดงตัวอย่างในการหาค่าความหยาบของพื้นผิวแบบสิบจุด (Rz) [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

โดยทั่วไป ตัวแปรต่างๆจะมีความสัมพันธ์กัน เช่นรายจ่ายสัมพันธ์กับรายได้ เวลาในการเรียนกับคะแนนจากการทำข้อสอบ หรือ ความเร็วในการตัดเลเซอร์กับคุณภาพผิวของรอยตัด ดังนั้นเมื่อตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปย่อมเกิดผลกระทบต่อตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กัน การศึกษาความสัมพันธ์แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป

3.9.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว จะให้เทคนิคในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ โดยวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์ มีดังนี้ (ถ้าให้ตัวแปรต้นเป็น X และตัวแปรตามเป็น Y) [49]

- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ถ้า X และ Y มีความสัมพันธ์กันมาก แสดงว่า ถ้า X มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อค่าของ Y มาก
- ใช้ความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้มาประมาณค่าหรือพยากรณ์ค่า Y ในอนาคต เมื่อกำหนดค่า X

1. การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (Simple regression)

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น (Independent variable) กับตัวแปรตาม (Dependent variable) จะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ถ้าศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว เรียกว่า การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นเชิงเดียวหรือการวิเคราะห์เชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) ถ้าตัวแปรอิสระมีมากกว่าหนึ่งตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง เป็นการศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่สองตัวแปรขึ้นไป เมื่อกำหนดตัวแปรที่สนใจเป็นตัวแปรตามและตัวแปรอื่นเป็นตัวแปรอิสระ ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์การถดถอย คือ พิจารณาว่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันในลักษณะใดจากแผนภาพการกระจาย จากลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างสมการถดถอย จากรูปแบบการถดถอยที่กำหนดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สมการถดถอยที่สร้างขึ้นเป็นสมการที่เหมาะสมหรือไม่ พิจารณาได้จากค่าสถิติและการทดสอบสมมติฐาน ค่าสถิติที่ใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมของรูปแบบมีหลายค่า เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแล้ว (Adjusted coefficient of

determination, R_a^2) ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum of squares error, SSE) ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Mean of squares error, MSE) เป็นต้น [50]

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้นดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.1)$$

โดยที่ Y = ตัวแปรตาม (Dependent variable)

X = ตัวแปรอิสระ (Independent variable)

β_0 = ส่วนตัดแกน Y หรือค่าของ Y เมื่อค่า X มีค่าเป็นศูนย์

e = ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม (random error)

β_1 = ความชัน (slope) ของเส้นตรง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนไป 1 หน่วย และจะเรียก β_1 ว่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Regression coefficient) ค่าของ β_1 สามารถเป็นได้ดังนี้

- $\beta_1 > 0$; แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทางเดียวกัน คือ ถ้า X เพิ่มขึ้น Y จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้า X ลดลง Y จะลดลงด้วย

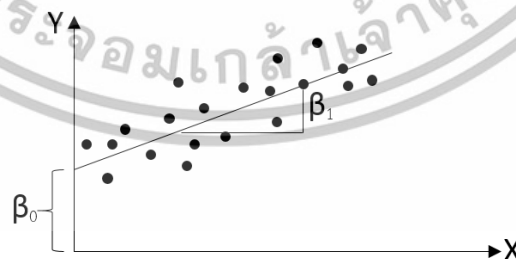
- $\beta_1 < 0$; แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้าม คือ ถ้า X เพิ่มขึ้น Y ลดลง แต่ถ้า X ลดลง Y จะเพิ่มขึ้น

- β_1 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าค่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

- $\beta_1 = 0$ แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กัน

หน่วยของ β_0 และ β_1 มีหน่วยเดียวกับหน่วยของ Y

แสดงกราฟการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 แสดงค่า β_1 เมื่อตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) มีความสัมพันธ์ในรูปแบบเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination : R^2)

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ หมายถึง สัดส่วนที่ตัวแปร X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร Y ได้ ดังนั้นถ้า R^2 มีค่ามากแสดงว่า Y และ X มีความสัมพันธ์กันมาก หรือ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า Y ได้มาก

$$\text{โดยที่ } R^2 = \frac{\text{ความแปรปรวนของ } Y \text{ ที่เกิดจาก } X}{\text{ความแปรปรวนของ } Y \text{ ทั้งหมด}}$$

คุณสมบัติของ R^2

1. ไม่มีหน่วย
2. ถ้า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระ (X) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (Y) มีค่ามาก หรือ X และ Y มีความสัมพันธ์กันมาก ถ้า R^2 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าเปอร์เซ็นต์ที่ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y มีค่าน้อย

2. การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

- สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r)

จากการวิเคราะห์ความถดถอย เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปร X และ Y และเป็นการทดสอบว่า X และ Y สัมพันธ์กันหรือไม่ ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อย

สำหรับสถิติที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ว่ามากหรือน้อยจะเรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ซึ่งในกรณีที่ค่าของขึ้นอยู่กับ X เพียงตัวเดียวจะเรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple correlation coefficient) โดยที่สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะไม่มีหน่วย จึงสามารถใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X ได้ว่ามีความสัมพันธ์มากหรือน้อยเพียงใด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งหากมีค่าใกล้ 1 หมายความว่าตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันโดยตรงอย่างมาก และหากค่าใกล้ศูนย์ หมายความว่า ตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันน้อย ส่วนถ้าหากว่าค่า r เป็น + หมายความว่าตัวแปรต้นกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่า r เป็น - หมายความว่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์ในทิศทางข้ามกัน [49]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรในการคำนวณค่า r เป็นได้ตามสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.2)$$

เมื่อ

x_i คือ ตัวแปรต้นแต่ละตัว

y_i คือ ตัวแปรตามแต่ละตัว

\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ย

\bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม

3.9.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรมากกว่า 2 ตัว

โดยส่วนมากในการหาความสัมพันธ์อาจจะมีตัวแปรอิสระที่มากกว่า 1 ตัวแปร ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม เช่น ยอดขายรถยนต์อาจมีความสัมพันธ์กับราคาขาย ยี่ห้อ สมรรถภาพ ค่าโฆษณา ราคาขาย และสภาพเศรษฐกิจ ในตัวอย่างนี้ยอดขายรถยนต์จะเป็นตัวแปรตาม (Y) ส่วนตัวแปรอื่นๆ เป็นตัวแปรอิสระ (X) ดังนั้นจึงต้องใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์

1. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression)

ถ้ามีตัวแปรอิสระ k ตัว ($X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_k$) ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y โดยที่ความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น จะได้สมการความถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ $X_1 + X_2 + \dots + X_k$ ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e_i \quad (3.3)$$

โดยที่ β_0 = ส่วนตัดแกน Y เมื่อกำหนดให้ $X_1 = X_2 = \dots = X_k = 0$

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ เป็นสัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (Partial regression coefficient)

เงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

ลักษณะข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้นพหุคูณได้นั้นจะมีเงื่อนไขดังนี้ [49]

- ความคลาดเคลื่อน e เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ $E(e) = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า $V(e) = \sigma_e^2$
- e_i และ e_j เป็นอิสระต่อกัน ; $i \neq j$
- ตัวแปรอิสระ X_i และ Y_i ต้องเป็นอิสระต่อกัน

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการความถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

จากสมการความถดถอยพหุคูณ ซึ่งมีพารามิเตอร์ $k+1$ ตัว คือ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ การประมาณค่า $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ จะต้องใช้ข้อมูลตัวอย่างของตัวแปร $Y_0, X_1, X_2, \dots, X_k$ โดยใช้ตัวอย่างขนาด n จากสมการความถดถอยเชิงซ้อน

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + e_i \quad (3.4)$$

จะประมาณค่า Y หรือประมาณสมการที่ (3.4) ด้วยสมการที่ (3.5)

$$\hat{Y}_i = a + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + \dots + b_k X_{ki} \quad (3.5)$$

โดยที่ $\hat{\beta}_0 = a, \hat{\beta}_1 = b_1, \hat{\beta}_2 = b_2, \dots, \hat{\beta}_k = b_k$

ค่า β_0 และ β_1 ในสมการที่ 3.4 เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของประชากร (Population regression coefficient) โดยปกติจะไม่ทราบค่า จะประมาณด้วยสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวอย่างและสร้างสมการพยากรณ์ได้ดังสมการที่ 3.5 ดังนั้นจึงต้องประมาณค่า Y_i ด้วย \hat{Y}_i คือ $Y_i - \hat{Y}_i = e_i$ หรือเรียกว่า Residual และประมาณค่า $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_k$ ด้วยค่า a, b_1, b_2, \dots, b_k ตามลำดับ เนื่องจาก e_i เป็นไปได้ทั้งค่าบวกและลบ เมื่อหาค่า a, b_1, b_2, \dots, b_k ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) จะทำให้ $\sum_{i=1}^n e_i = 0$ ดังนั้นจึงใช้

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \text{ เป็นค่าวัดความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า}$$

ความหมายของสัมประสิทธิ์ความถดถอยพหุคูณ

ถ้ามีตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Y) 3 ตัว คือ X_1, X_2 และ X_3 สมการความถดถอยเชิงซ้อนคือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + e_i$$

ค่าประมาณของ Y คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{Y}_i = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) พารามิเตอร์คือ a , b_1 , b_2 และ b_3 โดยความหมายของสัมประสิทธิ์แต่ละตัวมีดังนี้

a คือ ระยะเวลาตัดแกน Y ซึ่งหมายถึงเมื่อกำหนดให้ $X_1 = X_2 = X_3 = 0$

b_1 , b_2 และ b_3 เป็นค่าประมาณของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงส่วน ซึ่งมีหน่วยเหมือน Y และมีความหมายดังนี้

b_1 เป็นค่าซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X_1 หมายถึง ถ้า X_1 เพิ่มขึ้น 1 หน่วย จะทำให้ Y เปลี่ยนไป b_1 หน่วย (ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ b_1) โดยที่กำหนดให้ตัวแปรอิสระอื่นๆมีค่าคงที่

b_2 เป็นค่าซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X_2 หมายถึง ถ้า X_2 เพิ่มขึ้น 1 หน่วย จะทำให้ Y เปลี่ยนไป b_2 หน่วย โดยกำหนดให้ตัวแปรอิสระอื่นๆมีค่าคงที่ คือ X_1 และ X_3

ในทำนองเดียวกัน b_3 จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ X_3 โดยที่ถ้า X_3 เพิ่มขึ้น 1 หน่วยจะทำให้ Y เปลี่ยนไป b_3 หน่วย โดยกำหนดให้ X_1 และ X_2 มีค่าคงที่

การทดสอบสมการความถดถอยพหุคูณโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรตามคือการทดสอบว่าค่า $\beta = 0$ หรือไม่ สมการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว โดยการแบ่งความผันแปรทั้งหมด (Total variations) ออกเป็น 2 ส่วนคือ ความผันแปรที่อธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ (Regression variation) และความผันแปรของความคลาดเคลื่อน (Error variation) มีรายละเอียดดังนี้

1. ความผันแปรทั้งหมด เป็นค่าที่แสดงความเบี่ยงเบนระหว่าง Y_i กับ \bar{Y} หรือผลรวมของความผันแปรที่อธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระกับความผันแปรของความคลาดเคลื่อน
2. ความผันแปรที่อธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ เป็นค่าที่แสดงความเบี่ยงเบนระหว่าง \hat{Y}_i กับ \bar{Y} ถ้าค่าดังกล่าวมีค่าสูง แสดงว่าตัวแปรอิสระสามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้สูง
3. ความผันแปรของความคลาดเคลื่อน เป็นค่าที่แสดงความเบี่ยงเบนระหว่าง Y_i กับ \bar{Y} หรือเรียกว่า ค่าความคลาดเคลื่อน

สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$(Y_i - \bar{Y}) = (\hat{Y}_i - \bar{Y}) + (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (3.7)$$

รายละเอียดในการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แหล่งของความผันแปร (Source of variation) ในรูปแบบของผลบวกกำลังสอง (Sum of squares) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3.8)$$

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของผลบวกกำลังสองได้ดังนี้

$$SST = SSR + SSE \quad (3.9)$$

โดยที่แต่ละเทอมสามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

$SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$ เรียกว่า ผลบวกกำลังสองทั้งหมด หรือ ค่าแปรปรวนทั้งหมด (Total sum of squares)

$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$ เรียกว่า ผลบวกกำลังสองของการถดถอย หรือ ค่าแปรปรวนของ Y เนื่องจากอิทธิพลของ X_1, \dots, X_k (Sum of square residuals)

$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ เรียกว่า ผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน หรือ ค่าแปรปรวนของ Y เนื่องจากอิทธิพลอื่นๆ (Error sum of squares)

2. องศาแห่งความเป็นอิสระ (Degree of freedom, df) ประกอบด้วย องศาแห่งความเป็นอิสระของการถดถอยหรือ $df_R = 1$ องศาแห่งความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อนหรือ $df_E = n - 2$ และองศาแห่งความเป็นอิสระทั้งหมดหรือ $df_T = n - 1$ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$df_T = df_R + df_E \quad (3.10)$$

โดยที่

df_T คือ องศาแห่งความเป็นอิสระทั้งหมด ($df_T = n - 1$)

df_R คือ องศาแห่งความเป็นอิสระของการถดถอย ($df_R = 1$)

df_E คือ องศาแห่งความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อน ($df_E = n - 2$)

3. ค่ากำลังสองเฉลี่ย (Mean square, MS) คือ อัตราส่วนระหว่างผลบวกกำลังสองกับ องศาแห่งความเป็นอิสระ ซึ่งเป็นการวัดความผันแปรต่อหนึ่งหน่วย โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11 และ 3.12

$$MSR = \frac{SSR}{df_R} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$MSE = \frac{SSE}{df_E} \quad (3.12)$$

โดย

MSR คือ ค่ากำลังสองเฉลี่ยของการถดถอย (Mean square of regression)

MSE คือ ค่ากำลังสองเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (Mean square of error)

ซึ่ง MSE คือค่าประมาณความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (σ^2) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ S^2 หรือ $S^2_{y/x}$ เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือหรือความแม่นยำของสมการถดถอยที่สร้างขึ้น ถ้า MSE มีค่าน้อย แสดงว่าสมการถดถอยสามารถอธิบายตัวแปร Y ได้มาก และถ้า MSE มีค่ามาก แสดงว่าสมการถดถอยสามารถอธิบายตัวแปร Y ได้น้อย

4. ตัวสถิติสำหรับการทดสอบสมมติฐานอาศัยการแจกแจงเอฟ (F-distribution) ซึ่งเป็นการแจกแจงแบบเบ้ขวา สมการคำนวณได้ดังสมการที่ 3.13

$$F = \frac{MSR}{MSE} \quad (3.13)$$

ในการวิเคราะห์การถดถอยมีค่าสถิติจำนวนมากที่ต้องคำนวณ การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติจึงมีความจำเป็น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณจำนวนมาก ได้แก่ SPSS SAS MINITAB เป็นต้น

3.9.3 การใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน

สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปจะใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ความหมายของค่าสถิติที่ควรทราบของผลลัพธ์ที่ได้จาก SPSS

1. Correlation จะแสดงเมตริกซ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
2. Multiple R คือค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่นำเข้ามาสมการกับตัวแปรตาม
3. R Square (R^2) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ซึ่งจะแสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตาม
4. Adjusted R Square คือค่า R Square ที่มีการปรับแก้ให้เหมาะสม เมื่อข้อมูลที่ให้มีจำนวนน้อยและตัวแปรอิสระมีจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. **Standard Error** คือค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระ
6. **ANOVA** คือตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับใช้ในการทดสอบว่าจะสามารถใช้ตัวแปรอิสระที่คัดเลือกเข้าสมการนี้มาพยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ ถ้ามีนัยสำคัญคือใช้พยากรณ์ได้
7. **B** คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปรพร้อมทั้งค่าคงที่เพื่อนำมาใช้ในการสร้างสมการพยากรณ์
8. **SE (Standard error)** คือค่าประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับแต่ละตัวแปร
9. **SEE (Standard error of estimate)** คือค่าที่บอกถึงความคลาดเคลื่อนของ Y ที่แตกต่างไปจาก \hat{Y}
10. **Beta** คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยในแบบค่าแนนมาตรฐาน สำหรับสร้างสมการพยากรณ์ในรูปของคะแนนมาตรฐาน จากค่า Beta สามารถบอกได้ว่าตัวแปรอิสระได้มีผลหรืออิทธิพลต่อตัวแปรตามมากหรือน้อยกว่ากัน ถ้า Beta ของตัวแปรอิสระตัวใดมีค่ามาก (ไม่คิดเครื่องหมาย) แสดงว่าตัวแปรอิสระนั้นจะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมาก
11. **T และ Sig T** คือค่าสถิติและค่าความน่าจะเป็นของการทดสอบ T สำหรับทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดควรนำไปใช้ในสมการได้บ้าง ถ้าค่า T สูงอย่างมีนัยสำคัญแสดงว่าสามารถนำไปใช้ในสมการได้

3.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) หรือเรียกอย่างย่อว่า ANOVA เป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรมากกว่าสองกลุ่มขึ้นไปพร้อมๆ กัน กล่าวคือ ถ้าเป็นการเปรียบเทียบกับประชากรกลุ่มเดียว ส่วนใหญ่จะเป็นการเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าที่กำหนดขึ้น ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างประชากรสองกลุ่ม จะเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างประชากรทั้งสองกลุ่มตามสมมติฐานที่กำหนดไว้ ในกรณีที่มีประชากรมากกว่าสองกลุ่มหรือมีสิ่งที่ต้องการศึกษามากกว่าสองสิ่ง ความแตกต่างระหว่างกลุ่มจะถูกวัดในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือความแปรปรวนหรือค่าเฉลี่ยของความแปรผัน (Mean squares) โดยที่ความแปรผันเกิดจากผลรวมยกกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าแต่ละค่าของค่าเฉลี่ย การวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มกับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันในกลุ่ม ในกรณีที่ประชากรมีมากกว่าสองกลุ่มในลักษณะของความแปรผัน โดยมีเงื่อนไขว่าข้อมูลที่ได้จากกลุ่มประชากรที่นำมาทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยข้อมูลของแต่ละกลุ่มจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติเท่านั้น

ในการทดสอบสมมติฐานโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ตัวแปรที่ศึกษาอาจมีเพียงตัวแปรเดียวหรือหลายตัวแปร โดยตัวแปรที่ต้องการศึกษาจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น อาจมีเพียงตัวเดียวหรือมากกว่าหนึ่งตัว แต่ตัวแปรตามต้องมีเพียงตัวเดียวเท่านั้น
2. ลักษณะของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจจำแนกออกเป็นระดับต่างๆ หรือจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆ เช่นระดับความเข้มข้นของกำลังเลเซอร์ จำแนกออกเป็นสูง ปานกลาง และต่ำ เป็นต้น
3. ลักษณะของตัวแปรตามต้องมีค่าต่อเนื่อง เช่น คะแนน น้ำหนัก ความเร็ว เป็นต้น

การวิเคราะห์ความแปรปรวน จำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA)

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว เนื่องจากเป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประชากรตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป โดยมีตัวแปรอิสระ 1 ตัวแปร

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว หรือ One-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวเดียวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative variable) ที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ ส่วนตัวแปรตามอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative variable) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้ [55]

กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนคือ การทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งสำหรับข้อมูลที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นหลายตัวแปรกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวคือ การแบ่งความผันแปรทั้งหมด (Total variations) ออกเป็น 2 ส่วนคือ ความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Between variation) และ ความผันแปรภายในกลุ่ม (Within variation) มีรายละเอียดดังนี้

1. ความผันแปรทั้งหมด เป็นค่าที่แสดงความเบี่ยงเบนระหว่างค่าสังเกตกับค่าเฉลี่ยทั้งหมด (Grand mean) หรือผลรวมของความผันแปรระหว่างกลุ่มกับความผันแปรภายในกลุ่ม
2. ความผันแปรระหว่างกลุ่ม เป็นค่าที่แสดงความเบี่ยงเบนระหว่างค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่มกับค่าเฉลี่ยทั้งหมด ถ้าค่าดังกล่าวมีค่าสูง แสดงว่าค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่มมีแนวโน้มต่างกัน
3. ความผันแปรภายในกลุ่ม เป็นค่าที่แสดงความเบี่ยงเบนระหว่างค่าสังเกตกับค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่มหรือเรียกว่า ค่าความคลาดเคลื่อน

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแสดงแหล่งของความผันแปร (Source of variation) ในรูปแบบของผลบวกกำลังสอง (Sum of square) ได้ดังนี้

1. การวัดความผันแปรทั้งหมด

สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของตัวแปรที่ต้องการศึกษา จะต้องทำการวิเคราะห์ผลรวมของกำลังสองของความเบี่ยงเบนของค่าต่างๆที่เกี่ยวข้อง หรือเรียกว่า ผลบวกกำลังสอง (Sum of square) ของการแปรผันทั้งหมด โดยกำหนดให้

$$SST = SSB + SSW \quad (3.14)$$

โดยในแต่ละเทอมสามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X})^2 \text{ เรียกว่า ผลบวกกำลังสองทั้งหมด (Total sum of square)}$$

$$SSB = \sum_{i=1}^k (\bar{X}_i - \bar{X})^2 \text{ เรียกว่า ผลบวกกำลังสองระหว่างกลุ่ม (Between group sum of square)}$$

$$SSW = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2 \text{ เรียกว่า ผลบวกกำลังสองภายในกลุ่ม (Within group sum of square)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{X}_i)^2 \quad (3.15)$$

โดย

x_{ij} = ค่าสังเกตของกลุ่มที่ i และหน่วยที่ j ซึ่ง $i = 1, 2, \dots, k$ และ $j = 1, 2, \dots, n_i$

X_{ij} = ค่าที่ศึกษาในตัวแปรตาม

\bar{X} = ค่าเฉลี่ยของค่าที่ศึกษาในตัวแปรตามทั้งหมด

\bar{X}_i = ค่าเฉลี่ยของค่าที่ศึกษาในตัวแปรตามในกลุ่มที่ i

k = จำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด

n_i = จำนวนสมาชิกของกลุ่มตัวอย่างในกลุ่มที่ i

n = จำนวนสมาชิกของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด หรือ $n = \sum_{i=1}^k n_i$

จากสูตร $SST = SSB + SSW$ จะเห็นว่าค่าของผลบวกกำลังสองทั้งหมดหรือความแปรผันรวมทั้งหมด (SST) เกิดจากผลบวกกำลังสองระหว่างกลุ่ม (SSB) บวกกับผลบวกกำลังสองภายในกลุ่ม (SSW)

2. องศาแห่งความเป็นอิสระ (Degree of freedom, df) ประกอบด้วยองศาแห่งความเป็นอิสระระหว่างกลุ่ม หรือ $df_B = k - 1$ องศาแห่งความเป็นอิสระภายในกลุ่ม หรือ $df_w = n - k$ และองศาแห่งความเป็นอิสระทั้งหมด $df_T = n - 1$ หรือ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$df_T = df_B + df_w \quad (3.16)$$

3. ค่ากำลังสองเฉลี่ย (Mean square, MS) คืออัตราส่วนระหว่างผลบวกกำลังสองกับองศาแห่งความเป็นอิสระ ซึ่งเป็นการวัดความผันแปรต่อหนึ่งหน่วย โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$MSB = \frac{SSB}{df_B} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$MSW = \frac{SSW}{df_w} \quad (3.18)$$

โดย MSB คือค่ากำลังสองเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม (Mean square for between groups)

MSW คือค่ากำลังสองเฉลี่ยภายในกลุ่ม (Mean square for within groups)

4. ตัวสถิติสำหรับการทดสอบสมมติฐานอาศัยการแจกแจงเอฟ (F-distribution) ซึ่งมีการแจกแจงแบบเบ้ขวา สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$F = \frac{MSB}{MSW} \quad (3.19)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานได้ดังนี้

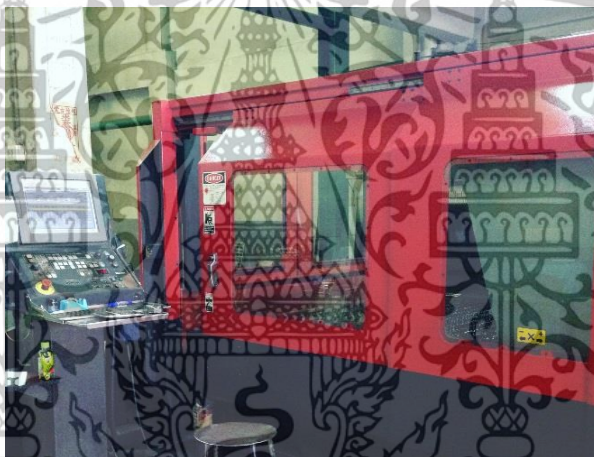
1. กำหนดสมมติฐานเป็นกลาง (H_0) และสมมติฐานตรงข้าม (H_1) ของการวิจัย
2. กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) เช่น 0.05, 0.01 หรือ 0.001 ตามความต้องการของผู้วิจัย
3. คำนวณหาค่า F จากสูตรโดยพิจารณาเลือกใช้สูตรตามเงื่อนไขของสูตรที่กำหนดไว้
4. เปิดตาราง F เพื่อหาค่าวิกฤตของ F ตามระดับนัยสำคัญ
5. เปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการเปิดตาราง ถ้าค่า F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าวิกฤตที่ได้จากการเปิดตาราง คือค่า F มีนัยสำคัญทางสถิติจะปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1
6. สรุปผลที่ได้

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การเตรียมชิ้นงาน

ใช้เหล็กเหนียว (SS400 mild steel) โดยมีขนาด $100 \times 100 \text{ mm}^2$ และมีความหนา 3 mm ใช้เครื่องตัดเลเซอร์รุ่น FANUC C4000 แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งให้ลำแสงเลเซอร์แบบต่อเนื่อง และกำลังสูงสุดอยู่ที่ 4000 W โดยลำแสงเลเซอร์สามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน x และ y ได้โดยใช้ระบบ CNC (AMADA FO-3015NT) และใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพของการตัดเลเซอร์



รูปที่ 4.1 เครื่องตัดเลเซอร์ FANUC C4000

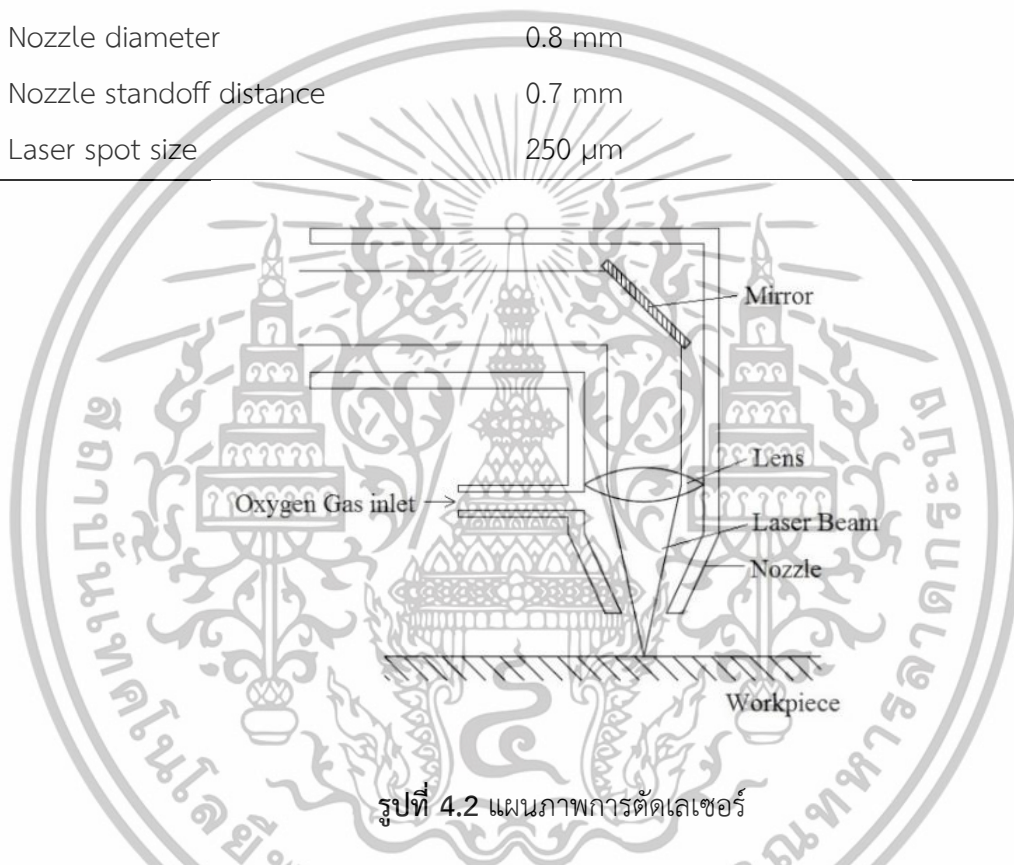
4.2 การดำเนินการตัด

ในการทดลองจะทำการตัดแผ่นเหล็กเป็นเส้นตรง โดยปรับค่าพารามิเตอร์ตามสมการที่ 2.4 คือ กำลังของเลเซอร์ ความดันของแก๊สช่วย และความเร็วในการตัด ซึ่งตัวแปรทั้งสามเป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยตัด โดยจะปรับค่าตัวแปรทั้งสามอย่างละ 3 ค่า จะได้เงื่อนไขในการทดลองทั้งหมด 27 ตัวอย่าง ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขในการทดลองทั้งหมด สำหรับแต่ละเงื่อนไขการตัดจะทำการตัดทั้งหมด 3 เส้นบนชิ้นงาน 1 แผ่น บนโลหะหนึ่งแผ่น โดยตัดเป็นระยะ 50 mm แต่ละรอยตัดห่างกัน 25 mm และเพื่อหลีกเลี่ยงการเจาะนำจึงได้เริ่มทำการตัดที่นอกขอบของแผ่นโลหะ ดังรูปที่ 4.3 ฝั่งซ้ายแสดงการกำหนดขนาดและระยะในการตัด ส่วนฝั่งขวาคือชิ้นงานจริงที่ตัดแล้ว

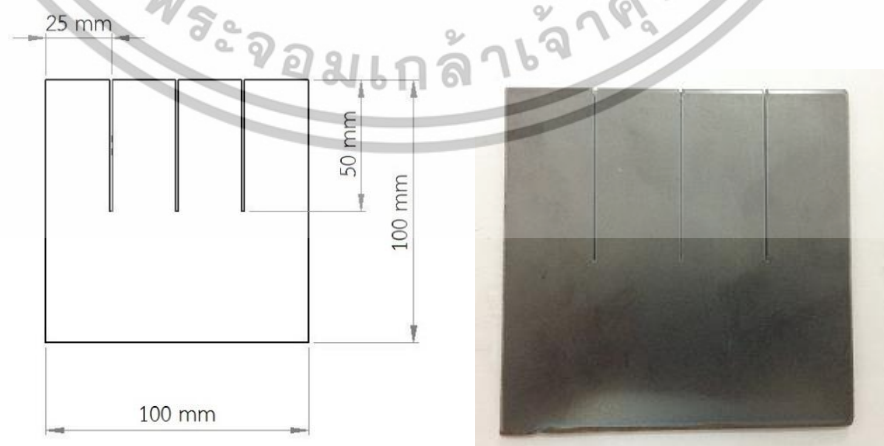
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวแปรต่างๆในการทดลองตัดด้วยเลเซอร์

Parameters	Values
Material	Mild steel
Thickness	3 mm
Laser power	2000, 2200, 2400 W
Gas type / pressure	O ₂ /0.07, 0.12, 0.17 MPa
Cutting speed	3100, 3400, 3700 mm/min
Nozzle diameter	0.8 mm
Nozzle standoff distance	0.7 mm
Laser spot size	250 μm



รูปที่ 4.2 แผนภาพการตัดเลเซอร์

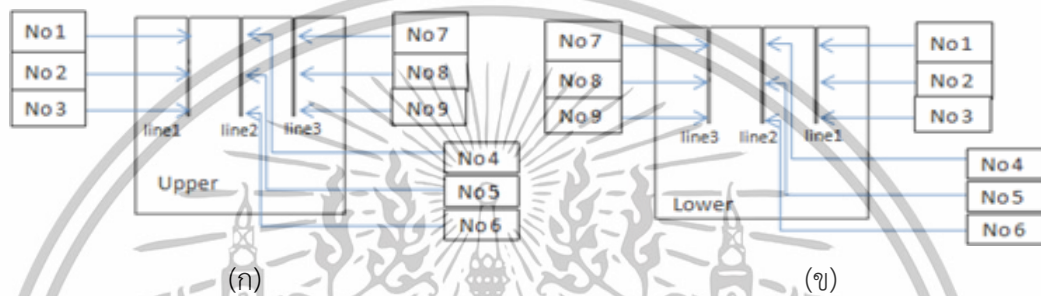


รูปที่ 4.3 ชิ้นงานตัวอย่าง

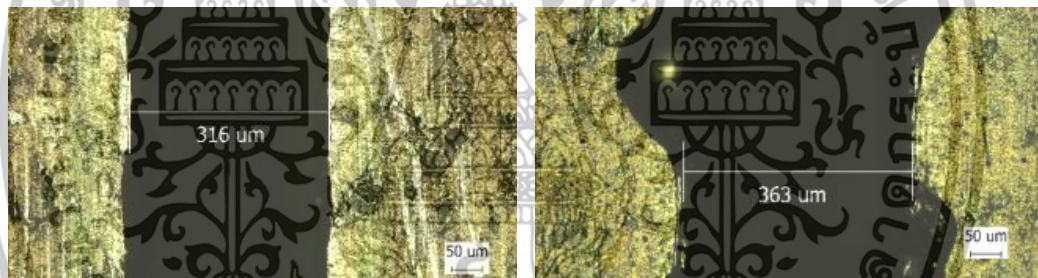
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตรวจสอบความกว้างของรอยตัด

ในการวัดระยะความกว้างของรอยตัด ทำการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) (Olympus U-TV1X-2) ใช้กำลังขยายขนาด 50x ทำการวัดขนาดความกว้างของรอยตัดทั้งด้านบน และด้านล่างของชิ้นงาน โดยวัดระยะสามตำแหน่งต่อหนึ่งรอยตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ส่วนรูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายทั้งด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์ หลังจากทำการวัดขนาดระยะความกว้างของรอยตัดทั้งหมดแล้วจะนำมาเฉลี่ยเป็นค่าเฉลี่ยของความกว้างรอยตัดต่อหนึ่งชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการวัดความกว้างรอยตัด (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง



(ก)

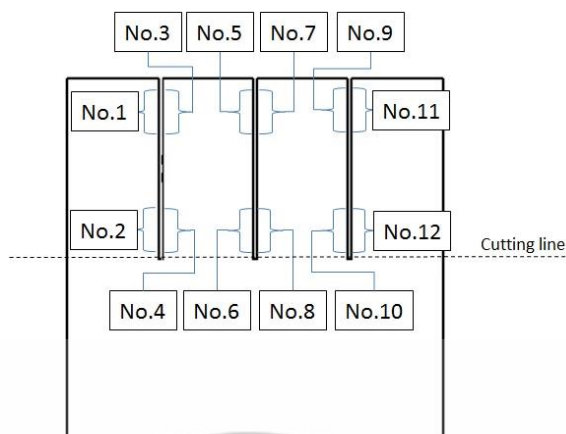
(ข)

รูปที่ 4.5 รูปถ่ายความกว้างรอยตัดจากกล้องจุลทรรศน์ (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง

4.4 การตรวจสอบความหยาบผิวของรอยตัด

หลังจากที่ได้ทำการวัดระยะความกว้างของรอยตัดเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นงานมาตัดออกและพิจารณาลักษณะความหยาบของผิวรวมๆ และวัดค่าความหยาบบนผิวด้านข้างของรอยตัด โดยค่าความหยาบจะใช้ค่าเฉลี่ยของความหยาบ R_a ทำการวัดความหยาบทั้งหมด 12 ตำแหน่งต่อหนึ่งชิ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ส่วนรูปที่ 4.7 แสดงผิวรอยตัดที่ได้หลังจากการทดลองตัด โดยรูปด้านบนและด้านล่างคือพื้นผิวของรอยตัดที่มีความหยาบต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ สำหรับการวัดความหยาบผิวจะใช้เครื่องวัดความหยาบ Mitutoyo SJ-310 ในการตรวจสอบ โดยวัดความหยาบที่กึ่งกลางของผิวรอยตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการวัดความหยابบนรอยตัด



รูปที่ 4.7 ความขรุขระบนพื้นผิวของรอยตัด

4.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ

ในการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นพหุคูณนี้เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ในงานวิจัยนี้ตัวแปรต้นคือ กำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วดัด ส่วนตัวแปรตามคือความกว้างของรอยตัดและความหยابผิวในรอยตัด จะวิเคราะห์ความสัมพันธ์เป็นสองกรณีคือ กรณีที่ตัวแปรตามคือความกว้างรอยตัดและกรณีที่ตัวแปรตามคือความหยابในผิวของรอยตัด เพื่อวิเคราะห์ว่าตัวแปรต้นตัวใดส่งผลต่อตัวแปรตามมากที่สุดและตัวแปรต้นแต่ละตัวส่งผลต่อตัวแปรตามไปในทิศทางใด ในการวิเคราะห์นี้จะใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ โดยขั้นตอนในการวิเคราะห์ความถดถอยมีดังนี้

1. กำหนดสมมติฐานทางสถิติ คือ สมมติฐานเป็นกลาง (H_0) และสมมติฐานตรงข้าม (H_1) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ตัวแปรตามคือความกว้างรอยตัด

H_0 : ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วตัด ร่วมกันอธิบายความผันแปรของระยะความกว้างของรอยตัด

H_1 : ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วตัด ไม่ได้ร่วมกันอธิบายความผันแปรของระยะความกว้างของรอยตัด

ในกรณีที่ตัวแปรตามคือความหยابผิวในรอยตัด

H_0 : ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วตัด ร่วมกันอธิบายความผันแปรของความหยابในรอยตัด

H_1 : ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วตัด ไม่ได้ร่วมกันอธิบายความผันแปรของความหยابในรอยตัด

2. ระบุสถิติทดสอบ (Test statistics) สถิติทดสอบคือ $t_{(n-2)} = \frac{r}{SE_r} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$
3. กำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างและระดับนัยสำคัญทางสถิติ (α) ตามกฎทั่วไป ระดับนัยสำคัญเชิงสถิติ (Statistical significance, α) มักจะตั้งไว้ที่ 0.05 หรือ p-value < 0.05
4. เลือกกลุ่มและรวบรวมข้อมูล
5. วิเคราะห์ข้อมูลและจัดทำตารางแสดงเมทริกซ์สหสัมพันธ์ (Correlation matrix) และดำเนินการทดสอบสมมติฐาน ตัดสินใจปฏิเสธหรือไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก โดยใช้เกณฑ์การตัดสินใจจากค่า p ดังนี้
 - ผลการทดสอบพบว่า $p < \alpha$ ให้ตัดสินใจปฏิเสธ (reject) สมมติฐานหลัก
 - ผลการทดสอบพบว่า $p \geq \alpha$ ให้ตัดสินใจไม่ปฏิเสธ (do not reject) สมมติฐานหลัก
 ในการวิเคราะห์นี้สำหรับการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของความกว้างรอยตัดนี้ได้ $p = 0.01$ และการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของความหยابได้ $p = 0.00$ ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญเชิงสถิติที่ 0.05 ดังนั้นจึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก
6. วิเคราะห์การถดถอย โดยทดสอบสหสัมพันธ์พหุคูณและทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2
7. จะได้ค่าขนาดอิทธิพลของตัวแปรต้นที่ส่งผลต่อตัวแปรตามแต่ละตัว (Beta)
8. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในการทดสอบสมมติฐานการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ในการทดสอบตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นแต่ละตัวว่ามีอิทธิพลต่อความแปรปรวนของตัวแปรตามหรือไม่ โดยที่ตัวแปรต้นคือ กำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วตัด ในการทดสอบนี้จะแบ่งเป็นสองกรณีคือ กรณีที่ตัวแปรตามคือความกว้างรอยตัดและกรณีที่ตัวแปรตามคือความหยาบในผิวของรอยตัด โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีดังนี้

1. กำหนดสมมติฐานเป็นกลาง (H_0) และสมมติฐานตรงข้าม (H_1) ของการวิจัย ดังนี้

ในกรณีที่ตัวแปรตามคือความกว้างรอยตัด

H_0 : ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วการตัดที่แตกต่างกันส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดแตกต่างกัน

H_1 : ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วการตัดที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดแตกต่างกัน

ในกรณีที่ตัวแปรตามคือความหยาบผิวในรอยตัด

H_0 : ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วการตัดที่แตกต่างกันส่งผลให้ความหยาบในรอยตัดแตกต่างกัน

H_1 : ค่ากำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วการตัดที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้ความหยาบในรอยตัดแตกต่างกัน

2. กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) ตามกฎทั่วไป ระดับนัยสำคัญเชิงสถิติ (Statistical significance, α) มักจะตั้งไว้ที่ 0.05 หรือ $p\text{-value} < 0.05$
3. คำนวณค่า F จากสูตรโดยพิจารณาเลือกใช้สูตรตามเงื่อนไขของสูตรที่กำหนดไว้ จากสมการที่ 3.19
4. เปิดตาราง F เพื่อหาค่าวิกฤตของ F ตามระดับนัยสำคัญ
5. เปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการเปิดตาราง ถ้าค่า F ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าวิกฤตที่ได้จากการเปิดตาราง คือค่า F มีนัยสำคัญทางสถิติจะปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1
6. สรุปผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

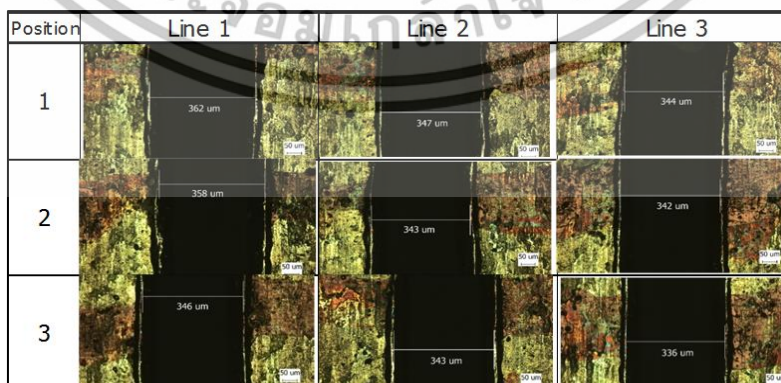
5.1 ผลการทดลอง

5.1.1 ความกว้างของรอยตัด

การทดลองตัดเหล็กเหนียวที่มีความหนา 3 mm ด้วยเลเซอร์ที่ค่าพารามิเตอร์ต่างกันคือ กำลังเลเซอร์ ที่ 2000, 2200 และ 2400 W ความเร็วตัดที่ 3100, 3400 และ 3700 mm/min และความดันของแก๊สช่วย 0.07, 0.12 และ 0.17 MPa ทั้งหมดต้องใช้ชิ้นงานตัวอย่างจำนวน 27 แผ่นในการทดลอง โดยชิ้นงานตัวอย่างแต่ละแผ่นได้ทำการตัดด้วยเลเซอร์จำนวน 3 รอยตัด โดยหนึ่งรอยตัดได้วัดค่าความกว้างของรอยตัดทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ทั้งด้านบนและด้านล่าง แสดงดังรูปที่ 5.1 และได้นำผลที่ได้จากการวัดทั้งหมดมาเฉลี่ยเป็นค่าความกว้างเฉลี่ยในแต่ละค่าพารามิเตอร์หรือแต่ละชิ้นงานตัวอย่าง



(ก)

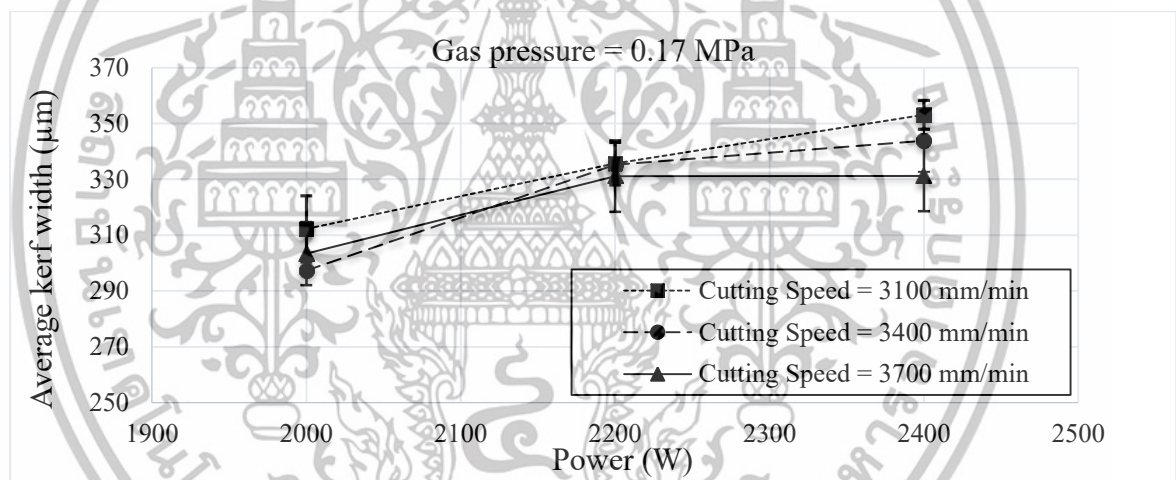


(ข)

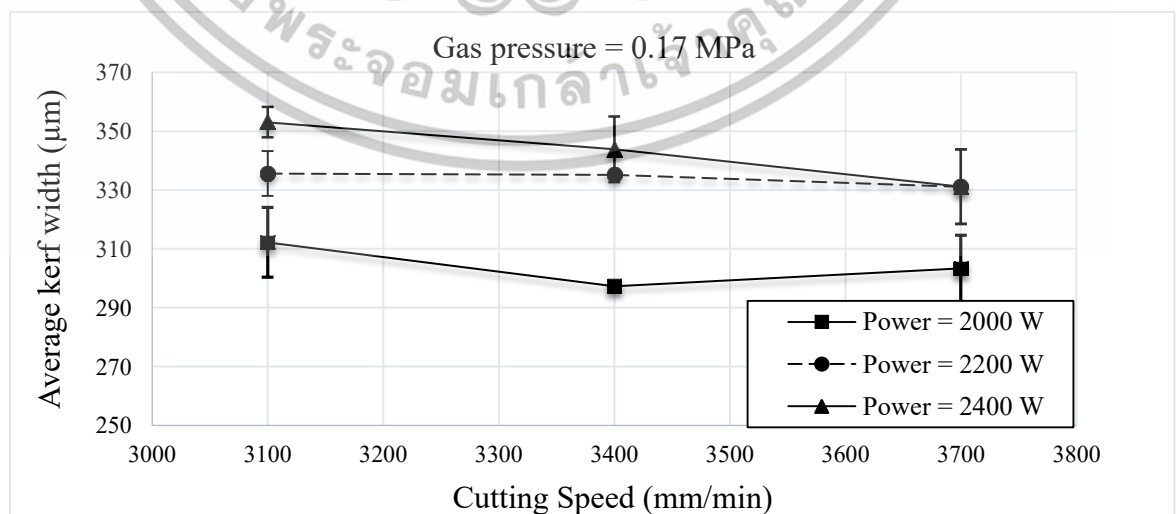
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างแสดงการวัดความกว้างรอยตัดที่ได้จากการทดลอง (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเลเซอร์กับความกว้างรอยตัดเฉลี่ย ในกรณีความดันแก๊สช่วยเท่ากับ 0.17 MPa คงที่ กำลังเลเซอร์ถูกปรับที่ 2000, 2200 และ 2400 W อธิบายได้ว่าความกว้างของรอยตัดจะเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากกำลังของเลเซอร์ที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนไปสู่โลหะได้มาก จึงทำให้อัตราการตัดมีความกว้างเพิ่มขึ้น ผลที่ได้เหมือนกับผลของงานวิจัยอื่นๆ [5, 10, 11-12, 33, 34, 51-54]

รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดกับความกว้างรอยตัดเฉลี่ย ในกรณีความดันแก๊สช่วยเท่ากับ 0.17 MPa คงที่ โดยความเร็วการตัดถูกปรับที่ 3100, 3400 และ 3700 mm/min สังเกตได้ว่าความกว้างของรอยตัดจะลดลงเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่า ที่ความเร็วการตัดต่ำๆจะมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างเลเซอร์กับแผ่นโลหะได้นานกว่าที่ความเร็วตัดสูง ดังนั้นที่ความเร็วต่ำจะทำให้โลหะมีการหลอมละลายมากกว่าและส่งผลให้ระยะความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้น



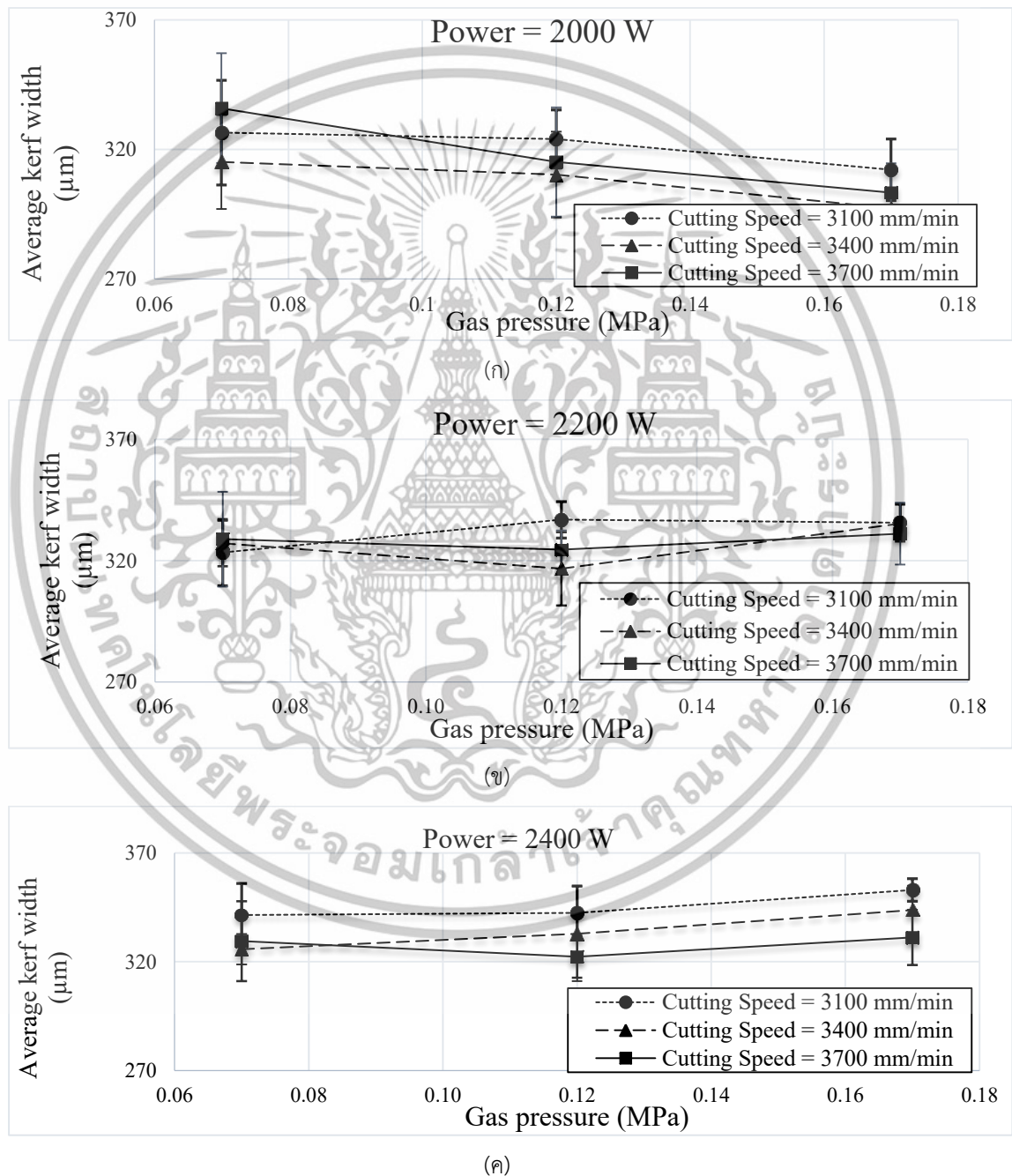
รูปที่ 5.2 ผลของความกว้างรอยตัดเนื่องจากกำลังของเลเซอร์ (ความดันแก๊สออกซิเจน = 0.17 MPa)



รูปที่ 5.3 ผลของความกว้างรอยตัดเนื่องจากความเร็วตัด (ความดันแก๊สออกซิเจน = 0.17 MPa)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4 แสดงผลของความกว้างของรอยตัดที่ได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วการตัดและความดันของแก๊สช่วย สำหรับที่กำลังเลเซอร์เท่ากับ 2000, 2200 และ 2400 W สังเกตได้ว่าสำหรับในกรณีที่กำลังเลเซอร์เท่ากับ 2200 และ 2400 W ความกว้างของรอยตัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันของแก๊สช่วยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าที่ความดันแก๊สสูงๆ จะทำให้มีแก๊สออกซิเจนถูกปล่อยออกมาและทำปฏิกิริยากับโลหะ นั่นก็คือมีปฏิกิริยาทางความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะและส่วนที่หลอมละลายจะถูกเป่าออกไป ส่งผลให้รอยตัดมีขนาดความกว้างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.4 ผลของความดันแก๊สออกซิเจนที่มีต่อความกว้างรอยตัด (ก) กำลังเลเซอร์ = 2000 W, (ข)

กำลังเลเซอร์ = 2200 W และ (ค) กำลังเลเซอร์ = 2400 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ความหยาบรอยตัด

รูปที่ 5.5 แสดงผลของความเร็วดัดที่มีต่อความหยาบบนผิวของรอยตัด ในกรณีที่กำลังเลเซอร์คองที่ 2000, 2200 และ 2400 W แสดงในรูป (ก) รูป (ข) และรูป (ค) ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าความหยาบลดลงเมื่อความเร็วการตัดเพิ่มขึ้นในทุกๆค่าของกำลังเลเซอร์ เพราะเมื่อมีความเร็วการตัดที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาที่ลำแสงเลเซอร์ทำปฏิกิริยากับโลหะน้อยลง เกิดความร้อนน้อยและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันน้อยกว่าในกรณีที่ใช้ความเร็วการตัดต่ำ ทำให้มีการเกิดขึ้นของชั้นออกไซด์น้อย การเกิดชั้นออกไซด์น้อยจะส่งผลทำให้มีความหยาบในผิวของรอยตัดที่น้อย เนื่องจากชั้นออกไซด์จะถูกเป่าออกโดยแก๊สช่วยและถูกสร้างขึ้นใหม่โดยความร้อนเป็นวัฏจักร ส่งผลให้เกิดเป็นแถบริ้วในรอยตัด ดังนั้นเมื่อชั้นออกไซด์น้อยจะส่งผลทำให้ความหยาบผิวในรอยตัดน้อย [5-8] และที่ความเร็วการตัดสูงๆ ค่าความหยาบจะลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ที่ประมาณ $2 \mu\text{m}$ และสังเกตได้อีกว่าความหยาบจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันแก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากในขณะโลหะเกิดการหลอมละลายจากความร้อนของลำแสงเลเซอร์ โลหะที่หลอมละลายนั้นจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ทำให้โลหะมีการหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น หากมีความดันแก๊สสูงก็จะทำให้ปริมาณของแก๊สออกซิเจนที่ทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมละลายที่มากขึ้นนั้นส่งผลให้มีชั้นออกไซด์ที่มากขึ้นเมื่อชั้นออกไซด์นั้นถูกเป่าออกโดยแก๊สออกซิเจนก็จะมีการเพิ่มขึ้นของชั้นออกไซด์ขึ้นมาแล้วถูกเป่าออกไปเป็นวัฏจักร ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ [3, 8]

รูปที่ 5.6 แสดงผลของกำลังที่มีต่อความหยาบบนผิวของรอยตัด เมื่อความเร็วการตัดคองที่ 3100, 3400 และ 3700 mm/min แสดงในรูปบน รูปกลาง และรูปล่างตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลที่ได้ค่อนข้างแตกต่างกันสำหรับแต่ละค่าความเร็วการตัด โดยความเร็วตัดที่ 3100 mm/min ที่ความดันสูง (0.17 MPa) ความหยาบผิวรอยตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อกำลังเลเซอร์เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ค่าความดันที่ต่ำลงมา (0.07 และ 0.12 MPa) ค่าความหยาบจะค่อนข้างคงที่ อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วการตัดสูงขึ้นค่าความหยาบจะมีแนวโน้มลดลง อธิบายได้ว่าในกรณีที่ความเร็วการตัดต่ำ (3100 และ 3400 mm/min) เมื่อความดันแก๊สมีค่ามากส่งผลให้เกิดค่าความหยาบที่มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากที่ความดันของแก๊สออกซิเจนมากจะส่งผลให้มีอัตราการหลอมเหลวของโลหะเป็นจำนวนมากซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดขึ้นของโลหะเหลวหรือชั้นออกไซด์เกาะติดอยู่ เมื่อถูกความดันแก๊สเป่าออกทำให้เกิดเป็นริ้วบนผิวของรอยตัด ซึ่งจะทำให้เกิดความหยาบที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามการใช้ค่าความดันแก๊สต่ำจะทำให้เกิดความหยาบในรอยตัดน้อย ส่วนในกรณีที่ความเร็วตัดสูง (3400 mm/min) จะเห็นว่าความหยาบในรอยตัดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างลำแสงเลเซอร์กับโลหะมีน้อย ทำให้โลหะในส่วนนั้นมีการหลอมละลายน้อยกว่า เกิดชั้นออกไซด์ที่น้อยกว่า ส่งผลให้ความหยาบในรอยตัดน้อย

รูปที่ 5.7 ผลของความดันแก๊สออกซิเจนที่มีต่อความหยาบของรอยตัด จะเห็นได้ว่าความหยาบผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันแก๊สเพิ่มขึ้นสำหรับทุกค่าของกำลังเลเซอร์ ที่ความดันแก๊สต่ำนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการคายความร้อน (Exothermic reaction) ที่ต่ำ ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะน้อย ดังนั้นความลึกของแถบรีวจึงน้อย ทำให้ผิวของรอยตัดที่ได้มีความหยาบน้อย นอกจากนี้ในรูปที่ 5.10 (ก) ในกรณีที่ใช้กำลังเลเซอร์ต่ำสุด ที่ความเร็วการตัด 3100 mm/min อธิบายได้ว่า ที่ความเร็วการตัดต่ำๆ จะมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาถ่ายเทความร้อนระหว่าง ความร้อนจากลำแสงเลเซอร์กับแผ่นโลหะที่นานกว่า ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดชั้นของโลหะหลอมเหลวที่เกาะติดอยู่มาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความดันแก๊สต่ำมากๆ จะทำให้ส่วนของโลหะเหลวที่เกาะติดอยู่นั้นไม่สามารถถูกเป่าออกไปจากรอยตัดได้ จึงทำให้ผนังของรอยตัดนั้นเกิดเป็นรีวมากขึ้น

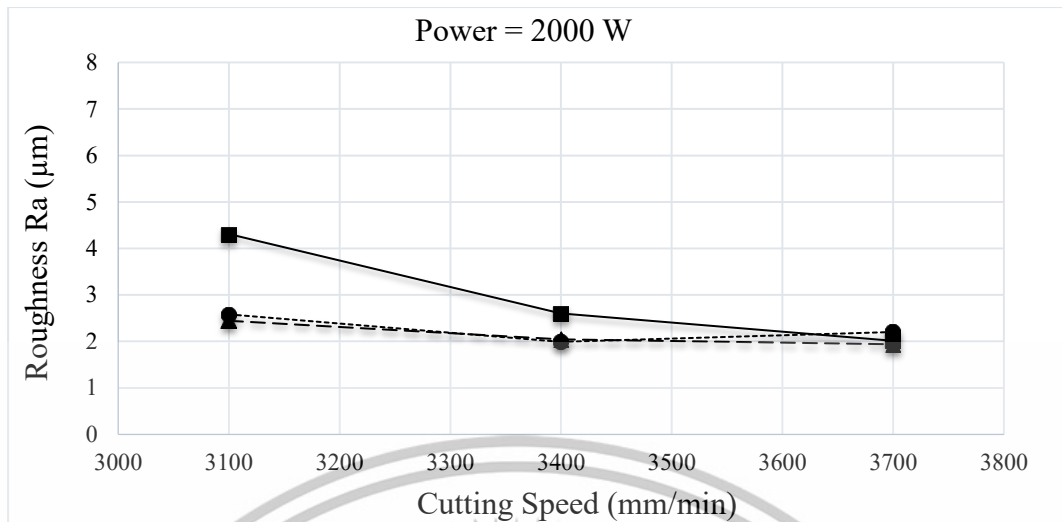
จากตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองในการปรับตัวแปรการตัดที่แตกต่างกันทั้งหมด 27 เงื่อนไข จะได้ค่าความหยาบเฉลี่ยบนผิวของรอยตัด (R_a) ที่ต่ำที่สุดสามค่าดังนี้ คือ 1.701, 1.736 และ 1.792 μm ตามลำดับ ซึ่งมีเงื่อนไขสำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ในการตัดเลเซอร์ ดังนี้คือ

- 1.701 ไมครอน ที่กำลังเลเซอร์ 2200 W ความเร็วตัด 3400 mm/min และความดันแก๊ส 0.07 MPa
- 1.736 ไมครอน ที่กำลังเลเซอร์ 2400 W ความเร็วตัด 3400 mm/min และความดันแก๊ส 0.07 MPa
- 1.792 ไมครอน ที่กำลังเลเซอร์ 2400 W ความเร็วตัด 3700 mm/min และความดันแก๊ส 0.12 MPa

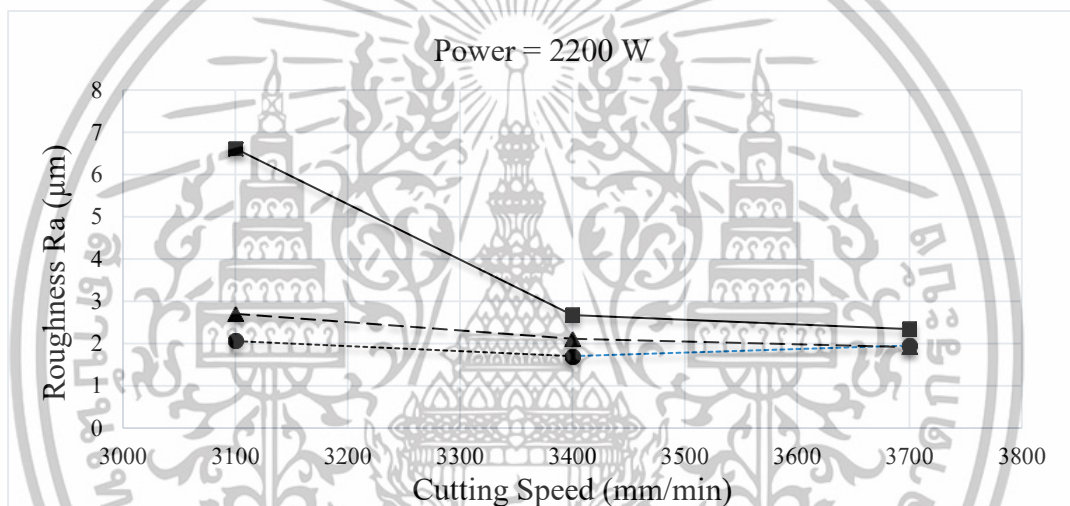
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลอง

No	Power (W)	Gas pressure (MPa)	Cutting speed (mm/min)	Avg. kerf width (μm)	Roughness (μm)
1	2000	0.07	3100	327	2.584
2	2000	0.07	3400	315	1.990
3	2000	0.07	3700	336	2.205
4	2000	0.12	3100	324	2.445
5	2000	0.12	3400	310	2.047
6	2000	0.12	3700	315	1.938
7	2000	0.17	3100	312	4.310
8	2000	0.17	3400	297	2.604
9	2000	0.17	3700	303	2.013
10	2200	0.07	3100	323	2.057
11	2200	0.07	3400	327	1.701
12	2200	0.07	3700	329	1.955
13	2200	0.12	3100	337	2.700
14	2200	0.12	3400	317	2.109
15	2200	0.12	3700	325	1.916
16	2200	0.17	3100	336	6.612
17	2200	0.17	3400	335	2.675
18	2200	0.17	3700	331	2.341
19	2400	0.07	3100	342	2.173
20	2400	0.07	3400	326	1.736
21	2400	0.07	3700	330	1.882
22	2400	0.12	3100	342	3.113
23	2400	0.12	3400	333	1.939
24	2400	0.12	3700	322	1.792
25	2400	0.17	3100	353	7.359
26	2400	0.17	3400	344	4.479
27	2400	0.17	3700	331	2.048

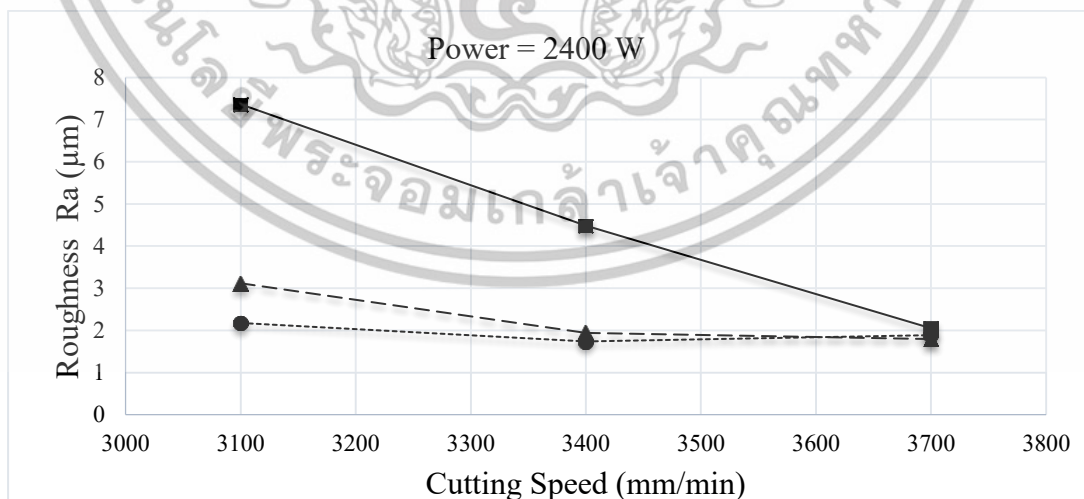
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

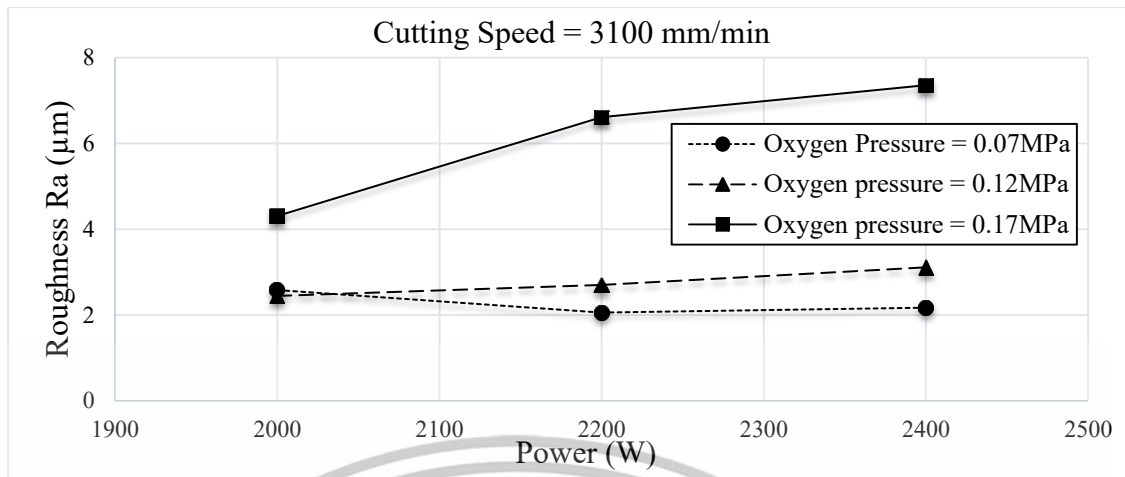


(ค)

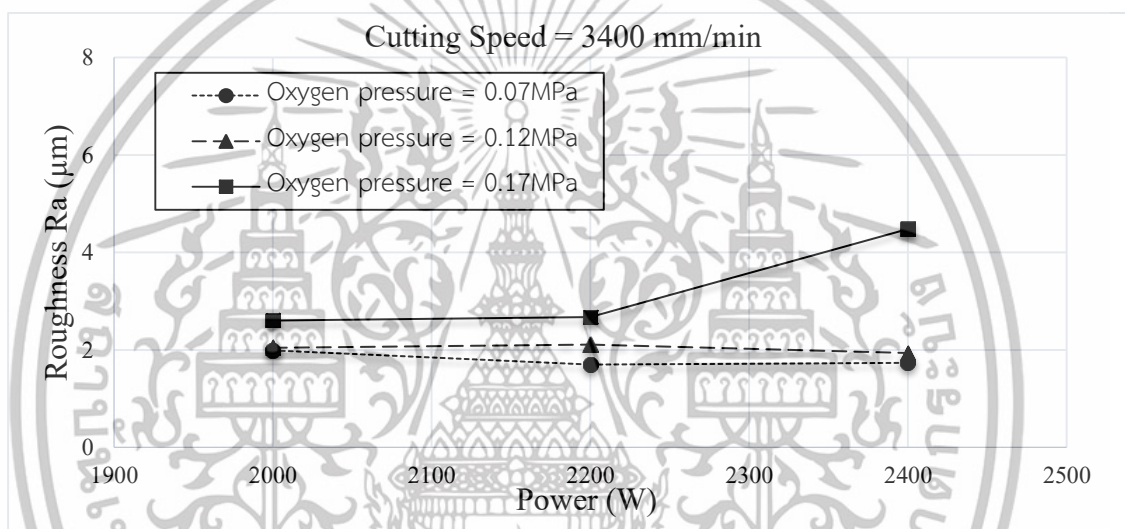
รูปที่ 5.5 ผลของความเร็วดัดที่มีต่อความหยาบของรอยตัด (ก) กำลังเลเซอร์ = 2000 W, (ข) กำลัง

เลเซอร์ = 2200 W และ (ค) กำลังเลเซอร์ = 2400 W

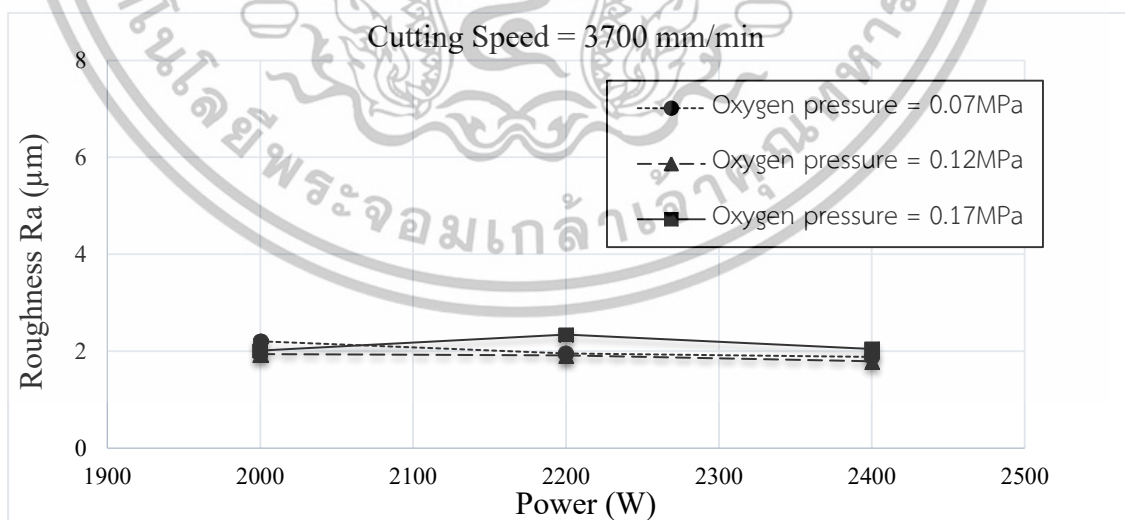
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

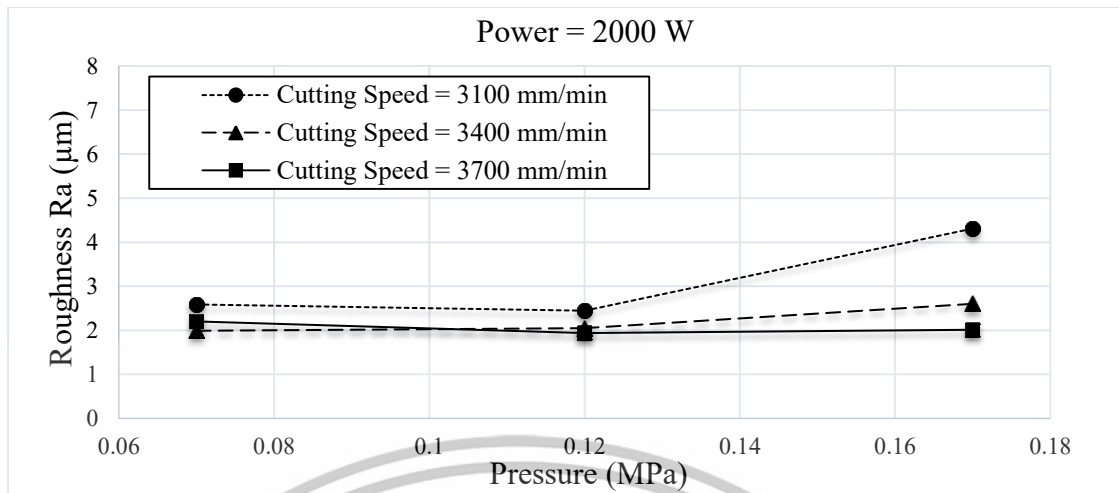


(ค)

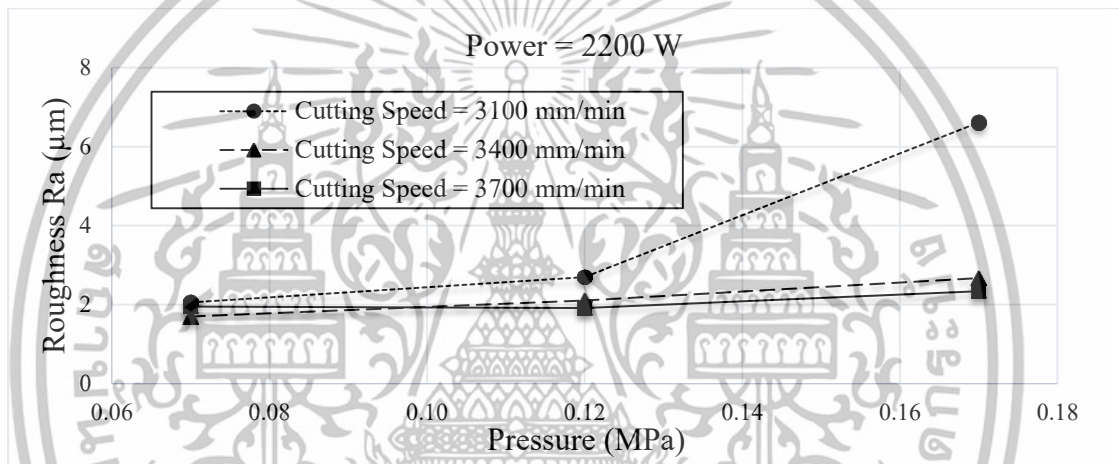
รูปที่ 5.6 ผลของกำลังของเลเซอร์ที่มีต่อความหยาบของรอยตัด (ก) ความเร็วตัด = 3100 mm/min,

(ข) ความเร็วตัด = 3400 mm/min และ (ค) ความเร็วตัด = 3700 mm/min

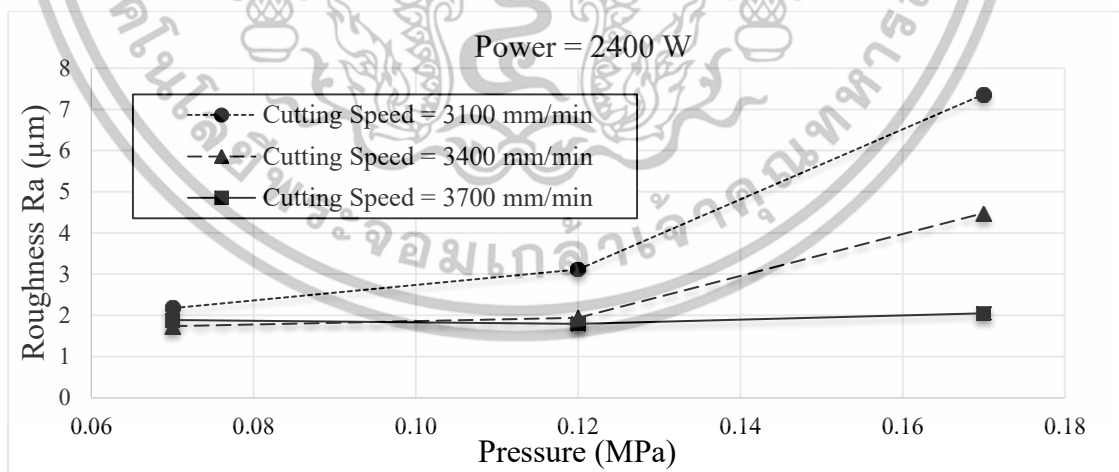
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.7 ผลของความดันแก๊สออกซิเจนที่มีต่อความหยาบของรอยตัด (ก) กำลังเลเซอร์ = 2000 W, (ข) กำลังเลเซอร์ = 2200 W และ (ค) กำลังเลเซอร์ = 2400 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของระยะความกว้างและความหยาบของรอยตัด

ในการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (Independent Variable) กับตัวแปรตาม (Dependent Variable) โดยที่ตัวแปรต้นนั้นมีมากกว่าหนึ่งตัวแปร ในการทดลองนี้ตัวแปรต้นคือ กำลังของเลเซอร์ ความดันของแก๊สช่วย และความเร็วตัด ส่วนตัวแปรตามที่พิจารณามีสองส่วนคือ ระยะความกว้างของรอยตัด และความหยาบในรอยตัด

ในการวิเคราะห์ถดถอยนี้จะทำการนำเข้าข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ทั้งตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม โดยใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผลที่ได้จะแบ่งพิจารณาเป็นสองส่วน ดังนี้

1. การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของความกว้างของรอยตัด

ตารางที่ 5.2 การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของความกว้างของรอยตัด

ตัวแปร	B	S.E.	Beta
กำลังของเลเซอร์ (W)	0.051	0.011	0.664
ความดันแก๊ส (MPa)	-12.160	44.258	-0.040
ความเร็วตัด (mm/min)	-0.014	0.007	-0.268
$R^2 = 0.451$ $SEE = 9.388$ $F = 8.130$ $sig = .001$			

จากตารางที่ 5.2 แสดงผลการวิเคราะห์สถิติถดถอยพหุคูณพบว่า ตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัว คือ กำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วตัด ร่วมกันอธิบายความผันแปรของระยะความกว้างของรอยตัดได้ร้อยละ 45.1 หรืออิทธิพลของตัวแปรต้นที่มีต่อตัวแปรตามเท่ากับร้อยละ 45.1 อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าระดับนัยสำคัญ (Significant, sig) ที่ได้มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือที่ระดับ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระที่มีผลต่อระยะความกว้างของรอยตัดได้ดีที่สุดจากค่า Beta คือ กำลังของเลเซอร์ ความเร็วตัด และความดันแก๊ส ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาเครื่องหมายของ Beta พบว่ากำลังของเลเซอร์จะส่งผลต่อความกว้างรอยตัดในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อกำลังเพิ่ม ความกว้างรอยตัดจะเพิ่ม ส่วนค่าความดันแก๊สและความเร็ว

ตัดจะส่งผลต่อความกว้างรอยตัดในทิศทางตรงข้ามคือ เมื่อความเร็วของรอยตัดและความดันแก๊สเพิ่ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างรอยตัดจะลดลง ในที่นี้ค่า Beta ของความดันแก๊สเข้าใกล้ศูนย์ทำให้ค่าความดันแก๊สส่งผลต่อความกว้างรอยตัดน้อยมาก

2. การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของความหยาบของรอยตัด

ตารางที่ 5.3 การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของความหยาบในรอยตัด

ตัวแปร	B	S.E.	Beta
กำลังของเลเซอร์ (W)	0.001	0.001	0.143
ความดันแก๊ส (MPa)	17.953	4.765	0.528
ความเร็วตัด (mm/min)	-0.003	0.001	-0.499
$R^2 = 0.489$ $SEE = 1.011$ $F = 9.304$ $sig = .000$			

จากตารางที่ 5.3 แสดงผลการวิเคราะห์สถิติถดถอยพหุคูณพบว่า ตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัว คือ กำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วตัด ร่วมกันอธิบายความผันแปรของระยะความกว้างของรอยตัดได้ร้อยละ 48.9 หรืออิทธิพลของตัวแปรต้นที่มีต่อตัวแปรตามเท่ากับร้อยละ 48.9 อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าระดับนัยสำคัญ (Significant, sig) ที่ได้มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือที่ระดับ 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าความหยาบภายในรอยตัดได้ดีที่สุดจากค่า Beta คือ ความดันแก๊ส ความเร็วตัด และกำลังของเลเซอร์ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาเครื่องหมายของ Beta พบว่าความดันแก๊สและกำลังของเลเซอร์จะส่งผลต่อความหยาบผิวในรอยตัดไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อความดันแก๊สและกำลังของเลเซอร์เพิ่ม ความหยาบในรอยตัดจะเพิ่ม ส่วนความเร็วตัดจะส่งผลต่อความหยาบผิวในรอยตัดในทิศทางตรงข้ามคือเมื่อความเร็วของรอยตัดเพิ่ม ความหยาบในรอยตัดจะลดลง

5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของระยะความกว้างและความหยาบของรอยตัด

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) คือ การวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความกว้างของรอยตัดหรือค่าความหยาบในผิวของรอยตัด โดยปัจจัยที่นำมาพิจารณาคือ กำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วตัด ผลที่ได้จะแบ่งพิจารณาเป็นสองส่วนดังนี้

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของระยะความกว้างของรอยตัด

1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของระยะความกว้างรอยตัดกับกำลังของเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความกว้างรอยตัดกับกำลังของเลเซอร์

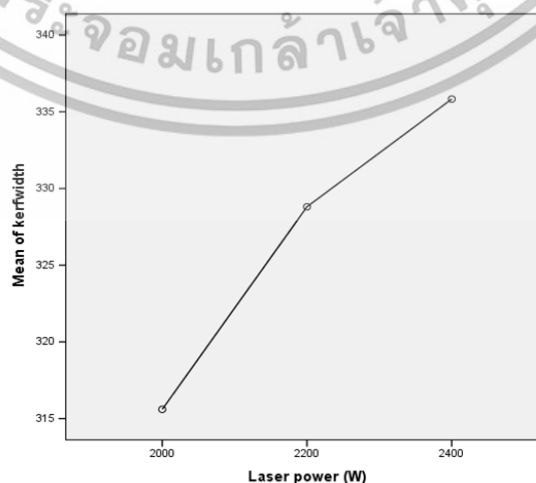
แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างกลุ่ม	1899.855	2	949.927	10.012	.001
ภายในกลุ่ม	2277.147	24	94.881		
รวม	4177.002	26			

จากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยสถิติ ANOVA พบว่า กำลังของเลเซอร์ที่แตกต่างกันมีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดอย่างน้อย 1 คู่ อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าระดับนัยสำคัญ (sig) ที่ได้มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือที่ระดับ 0.05 จึงเป็นการยอมรับสมมติฐานที่ตั้งไว้คือ ค่ากำลังของเลเซอร์ ที่แตกต่างกันส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดแตกต่างกัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.4 ดังนั้นต้องทำการเปรียบเทียบรายคู่ว่า ค่ากำลังของเลเซอร์ค่าใดบ้างที่ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดแตกต่างกัน โดยการเปรียบเทียบรายคู่จะแสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของความกว้างรอยตัดกับกำลังของเลเซอร์

	Power = 2000 W	Power = 2200 W	Power = 2400 W
Power = 2000 W	-	-13.210*	-20.235*
Power = 2200 W	-13.210*	-	7.025*
Power = 2400 W	-20.235*	7.025*	-

* $p < 0.05$



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลของกำลังของเลเซอร์ต่อความกว้างของรอยตัดเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 พบว่าค่ากำลังของเลเซอร์ทุกคู่คือ 2000 กับ 2200 W 2000 กับ 2400 W และ 2200 กับ 2400 W จะส่งผลให้เกิดความกว้างรอยตัดที่แตกต่างกัน โดยทุกค่านั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่ากำลังของเลเซอร์จะมีผลต่อความกว้างของรอยตัดอย่างชัดเจน โดยความกว้างของรอยตัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อกำลังของเลเซอร์มีค่ามากขึ้น

1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความกว้างรอยตัดกับความดันของแก๊สช่วย

ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความกว้างรอยตัดกับความดันของแก๊สช่วย

แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างกลุ่ม	46.124	2	23.062	.134	.875
ภายในกลุ่ม	4130.878	24	172.120		
รวม	4177.002	26			

จากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยสถิติ ANOVA พบว่า ความดันของแก๊สช่วยที่แตกต่างกันไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัด เนื่องจากมีนัยสำคัญทางสถิติที่มากกว่า 0.05 ดังตารางที่ 5.6 จึงเป็นการปฏิเสธสมมติฐานที่ตั้งไว้

1.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความกว้างรอยตัดกับความเร็วตัด

ตารางที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความกว้างรอยตัดกับความเร็วตัด

แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างกลุ่ม	520.597	2	260.299	1.709	.202
ภายในกลุ่ม	3656.405	24	152.350		
รวม	4177.002	26			

จากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยสถิติ ANOVA พบว่า ค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกันไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัด เนื่องจากมีนัยสำคัญทางสถิติที่มากกว่า 0.05 ดังตารางที่ 5.7 จึงเป็นการปฏิเสธสมมติฐานที่ตั้งไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิวในรอยตัด

2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิวในรอยตัดกับกำลังของเลเซอร์

ตารางที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความหยาบผิวในรอยตัดกับกำลังของเลเซอร์

แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างกลุ่ม	1.074	2	.537	.253	.779
ภายในกลุ่ม	50.946	24	2.123		
รวม	52.019	26			

จากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยสถิติ ANOVA พบว่า ค่ากำลังของเลเซอร์ที่แตกต่างกันไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหยาบผิวในรอยตัด เนื่องจากมีนัยสำคัญทางสถิติที่มากกว่า 0.05 ดังตารางที่ 5.8 จึงเป็นการปฏิเสธสมมติฐานที่ตั้งไว้

2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิวในรอยตัดกับความดันของแก๊สช่วย

ตารางที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความหยาบผิวในรอยตัดกับความดันของแก๊สช่วย

แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างกลุ่ม	17.503	2	8.752	6.085	.007
ภายในกลุ่ม	34.516	24	1.438		
รวม	52.019	26			

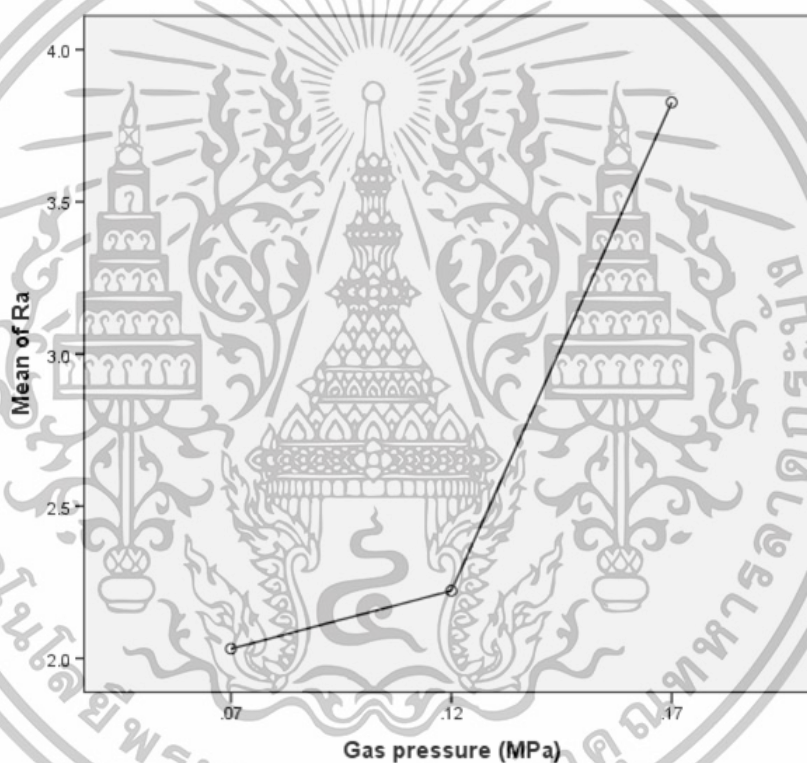
จากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยสถิติ ANOVA พบว่า ความดันของแก๊สช่วยที่แตกต่างกันมีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหยาบผิวในรอยตัดอย่างน้อย 1 คู่ และมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่าระดับนัยสำคัญ (sig) ที่ได้มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือที่ระดับ 0.05 จึงเป็นการยอมรับสมมติฐานที่ตั้งไว้คือ ค่าความดันของแก๊สช่วยที่แตกต่างกันส่งผลให้ความหยาบผิวในรอยตัดแตกต่างกัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.9 ดังนั้นต้องทำการเปรียบเทียบรายคู่ว่า ค่าความดันของแก๊สช่วยค่าใดบ้างที่ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดแตกต่างกัน โดยการเปรียบเทียบรายคู่จะแสดงดังตารางที่ 5.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 ผลความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของความหยابในรอยตัดกับความดันของแก๊สช่วย

	Gas pressure = 0.07 MPa	Gas pressure = 0.12 MPa	Gas pressure = 0.17 MPa
Gas pressure = 0.07 MPa	-	-1.191	-1.795*
Gas pressure = 0.12 MPa	-1.191	-	-1.605*
Gas pressure = 0.17 MPa	-1.795*	-1.605*	-

*p<0.05



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงผลของความดันแก๊สช่วยต่อความหยابผิวในรอยตัดเฉลี่ย

ตารางที่ 5.10 พบว่ามีค่าความดันของแก๊สช่วยสองคู่คือ 0.07 กับ 0.17 MPa และ 0.12 กับ 0.17 MPa จะส่งผลให้เกิดความหยابผิวในรอยตัดที่แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าความดันของแก๊สช่วยมีผลต่อความหยابผิวในรอยตัด โดยความหยابในรอยตัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันของแก๊สช่วยมีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิวในรอยตัดกับความเร็วตัด

ตารางที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความกว้างรอยตัดกับความเร็วตัด

แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างกลุ่ม	14.408	2	7.204	4.597	.020
ภายในกลุ่ม	37.612	24	1.567		
รวม	52.019	26			

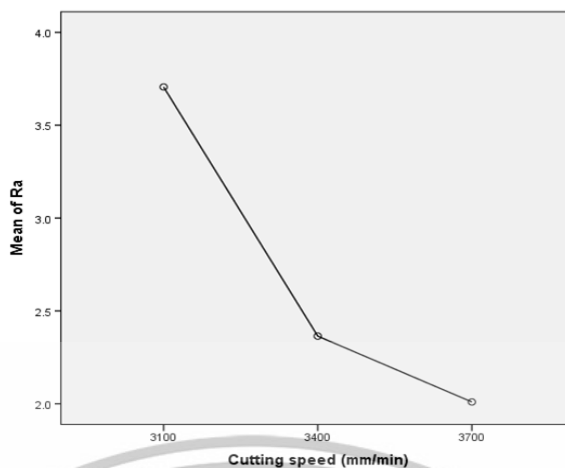
จากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยสถิติ ANOVA พบว่า ความเร็วตัดที่แตกต่างกันมีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหยาบผิวในรอยตัดอย่างน้อย 1 คู่ และมีนัยสำคัญทางสถิติเนื่องจากค่าระดับนัยสำคัญ (sig) ที่ได้มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือที่ระดับ 0.05 จึงเป็นการยอมรับสมมติฐานที่ตั้งไว้คือ ค่าความเร็วตัดที่แตกต่างกันส่งผลให้ความหยาบในรอยตัดแตกต่างกัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.11 ดังนั้นต้องทำการเปรียบเทียบรายคู่ว่า ค่าความดันของแก๊สช่วยค่าใดบ้างที่ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดแตกต่างกัน โดยการเปรียบเทียบรายคู่จะแสดงดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.12 ผลความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวในรอยตัดกับความเร็วตัด

	Cutting speed = 3100 mm/min	Cutting speed = 3400 mm/min	Cutting speed = 3700 mm/min
Cutting speed = 3100 mm/min	-	1.342*	1.696*
Cutting speed = 3400 mm/min	1.342*	-	-.355
Cutting speed = 3700 mm/min	1.696*	-.355	-

* $p < 0.05$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงผลของความดันแก๊สช่วยต่อความหยาบผิวในรอยตัดเฉลี่ย

ตารางที่ 5.12 พบว่ามีค่าความเร็วตัดสองคู่คือ 3100 กับ 3400 mm/min และ 3100 กับ 3700 mm/min จะส่งผลให้เกิดความหยาบผิวในรอยตัดที่แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากรูปที่ 5.10 จะเห็นได้ว่าความเร็วตัดมีผลต่อความหยาบผิวในรอยตัด โดยความหยาบในผิวของรอยตัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วตัดมีค่าลดลง

5.4 การสร้างสมการสหสัมพันธ์

ในการสร้างสมการสหสัมพันธ์เป็นสร้างสมการจากการเลือกกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้ ซึ่งข้อมูลที่ได้ทั้งในกรณีของความกว้างของรอยตัด และความหยาบในรอยตัดนั้นเป็นกราฟในลักษณะของพื้นผิว (Surface) โดยมีตัวแปรอิสระสองค่าและตัวแปรตามหนึ่งค่า ซึ่งได้สมการออกมาทั้งในกรณีของความกว้างและความหยาบในรอยตัด ดังนี้

5.4.1 การสร้างสมการสหสัมพันธ์ของความกว้างของรอยตัด

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามในกรณีตัวแปรตามคือความกว้างของรอยตัด โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณในหัวข้อที่ 5.1 พบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อความกว้างของรอยตัดน้อยที่สุดคือ ความดันของแก๊สช่วย ดังนั้นในการทำ surface fitting จะทำการแบ่งสมการเป็น 3 กรณี ตามค่าของความดันแก๊สช่วย ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.11

ข้อมูลที่ได้จากสมการที่สร้างขึ้นมากับข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองของระยะความกว้างของรอยตัด ในแต่ละกรณีของค่าความดันแก๊สคือ ที่ค่าความดันแก๊ส 0.07 0.12 และ 0.17 MPa มีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean absolute percentage error: MAPE) เท่ากับ 0.89 0.74 และ 0.89 % ตามลำดับ โดยค่า MAPE นี้ได้มาจากการเทียบผลระหว่างค่าความกว้างรอยตัดจากสมการที่ได้มาจากการสร้างสมการสหสัมพันธ์เทียบกับค่าความกว้างรอยตัดที่ได้จากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองในทุกค่าความดัน และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ได้มาจากความแตกต่างระหว่างสมการที่ได้มาจากสมการสหสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการทดลองในแต่ละค่าความดันแก๊ส คือ 0.9166 0.7404 และ 0.9620 ตามลำดับ สมการที่สร้างขึ้นเป็นสมการโพลีโนเมียลลำดับที่สอง ดังนี้

Gas Pressure	Equation	R^2	MAPE (%)
0.07 MPa	$w_{k@0.07MPa} = 764.1 + 0.3579P - 0.4952v - 3.611 \times 10^{-5} P^2 - 4.676 \times 10^{-5} Pv + 8.457 \times 10^{-5} v^2$	0.9166	0.89
0.12 MPa	$w_{k@0.12MPa} = 993.4 + 0.02833P - 0.4258v - 6.62 \times 10^{-5} P^2 - 8.935 \times 10^{-5} Pv + 9.177 \times 10^{-5} v^2$	0.7404	0.74
0.17 MPa	$w_{k@0.17MPa} = -1192 + 1.434P - 0.07339v - 2.62 \times 10^{-4} P^2 - 5.44 \times 10^{-5} Pv + 2.551 \times 10^{-5} v^2$	0.9620	0.89

โดย w_k คือ ระยะความกว้างของรอยตัด (Kerf Width, μm)

P คือ กำลังของเลเซอร์ (Laser Power, W)

v คือ ความเร็วตัด (Cutting Speed, mm/min)

สมการที่ได้มาจากการสร้างสหสัมพันธ์ข้างต้น ในที่นี้แนะนำให้ใช้สมการที่ได้ในกรณีที่มีความดันแก๊สเป็น 0.17 MPa ซึ่งได้นำไปเขียนใหม่ดังสมการที่ 5.1

$$w_k = -1192 + 1.434P - 0.07339v - 2.62 \times 10^{-4} P^2 - 5.44 \times 10^{-5} Pv + 2.551 \times 10^{-5} v^2 \quad (5.1)$$

เนื่องจากค่า R^2 เป็นค่าที่บอกถึงคุณภาพของสมการและค่า R^2 ที่ได้ค่อนข้างสูงคือ 0.9620 หรือ 96.2% และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่อนข้างน้อยคือ 0.89% ถึงแม้ว่าสมการในกรณีที่มีความดัน 0.12 MPa จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า แต่ค่าของ R^2 ยังมีค่าน้อยคือ 0.7404 หรือ 74.04% จึงไม่สามารถยอมรับได้ว่าสมการที่ได้มานั้นเป็นสมการที่ดี และสมการที่ได้มานั้นจะต้องใช้กับค่าพารามิเตอร์ของเลเซอร์ที่กำลังของเลเซอร์ 2000 – 2400W ความเร็วตัด 3100 – 3700 mm/min และความดันแก๊ส 0.07 - 0.17 MPa หากนำสมการดังกล่าวไปใช้ทำนายการตัดเลเซอร์ที่ค่าของตัวแปรอยู่นอกช่วงนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น

5.4.2 การสร้างสมการสหสัมพันธ์ของความหยาบในรอยตัด

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามในกรณีตัวแปรตามคือความหยาบในรอยตัด โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณในหัวข้อที่ 5.1 พบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อความหยาบภายในรอยตัดน้อยที่สุดคือ กำลังของเลเซอร์ ดังนั้นในการ surface fitting จะทำการแบ่งสมการเป็น 3 กรณี ตามค่าของกำลังเลเซอร์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลที่ได้จากสมการที่สร้างขึ้นมากับข้อมูลที่ได้จากการทดลองของความหยาบ ในแต่ละกรณีของค่ากำลังเลเซอร์คือ ที่ 2000 2200 และ 2400 วัตต์ มีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เท่ากับ 6.46 15.45 และ 10.56 % ตามลำดับ โดยค่า MAPE นี้ได้มาจากการเทียบผลระหว่างค่าความหยาบในรอยตัดจากสมการที่ได้มาจากการสร้างสมการสหสัมพันธ์เทียบกับค่าความหยาบในรอยตัดที่ได้จากการทดลองในทุกค่ากำลังของเลเซอร์ และค่า R^2 ได้มาจากความแตกต่างระหว่างสมการที่ได้มาจากการสร้างสหสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการทดลองในแต่ละค่ากำลังของเลเซอร์ คือ 0.9343 0.9060 และ 0.9680 ตามลำดับ โดยสมการที่สร้างขึ้นมาเป็นสมการโพลีโนเมียลลำดับที่สอง ดังนี้

Laser Power	Equation	R^2	MAPE (%)
2000 W	$Ra_{@2000W} = 44.14 + 70.27P_g - 0.02581v - 189.7P_g^2 - 0.03195P_g v + 4.099 \times 10^{-6}v^2$	0.9343	6.46
2200 W	$Ra_{@2200W} = 83.21 + 193.7P_g - 0.0526v - 259.5P_g^2 - 0.06949P_g v + 8.54 \times 10^{-6}v^2$	0.9060	15.45
2400 W	$Ra_{@2400W} = 24.47 + 214.7P_g - 0.01963v - 402.7P_g^2 - 0.08364P_g v + 3.794 \times 10^{-6}v^2$	0.9680	10.56

โดย Ra คือ ความหยาบผิวในรอยตัด (Surface roughness, μm)

P_g คือ ความดันของแก๊สช่วย (Gas Pressure, MPa)

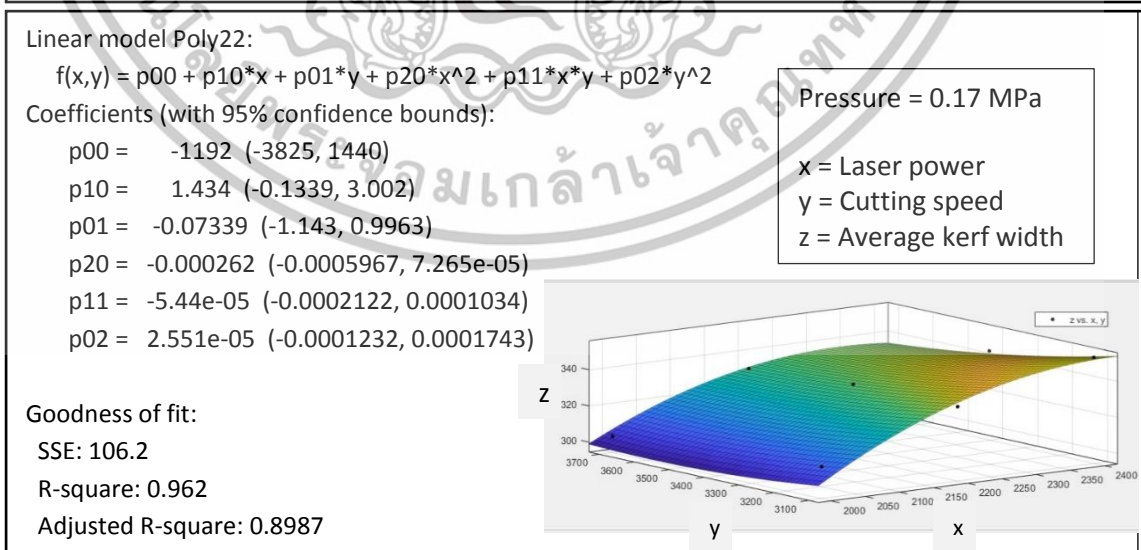
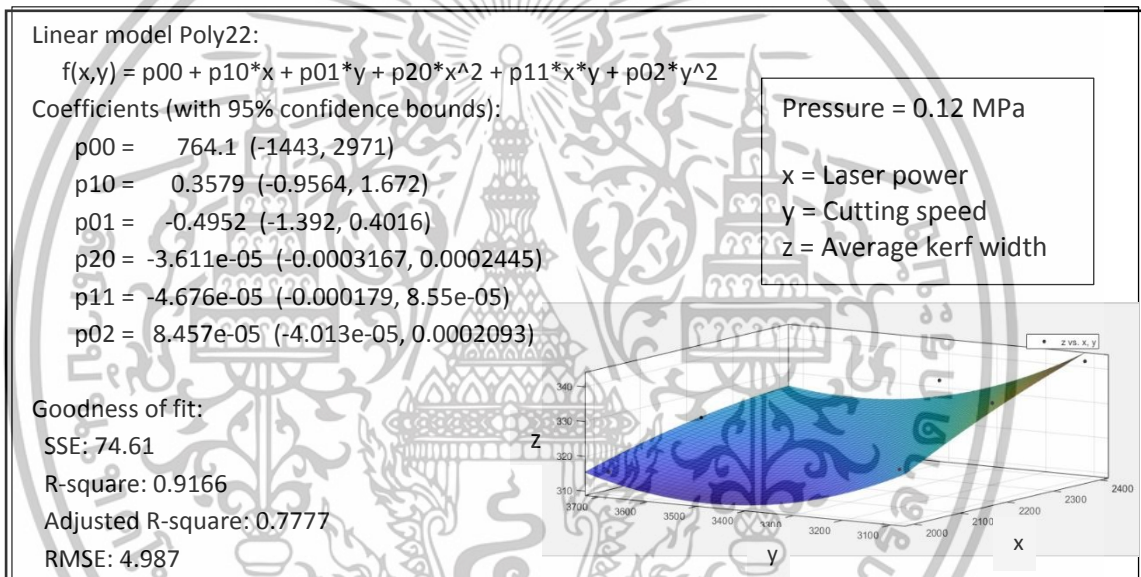
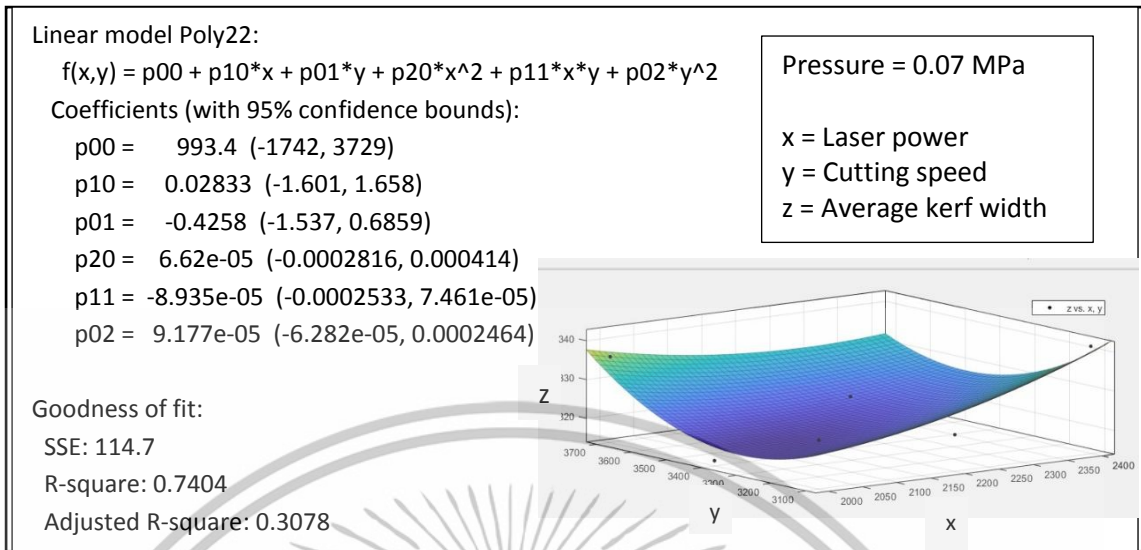
v คือ ความเร็วตัด (Cutting Speed, mm/min)

สมการที่ได้มาจากการสร้างสหสัมพันธ์ข้างต้น ในที่นี้แนะนำให้ใช้สมการที่ได้ในกรณีกำลังของเลเซอร์เป็น 2000W ซึ่งได้นำไปเขียนใหม่ดังสมการที่ 5.2

$$Ra = 44.14 + 70.27P_g - 0.02581v - 189.7P_g^2 - 0.03195P_g v + 4.099 \times 10^{-6}v^2 \quad (5.2)$$

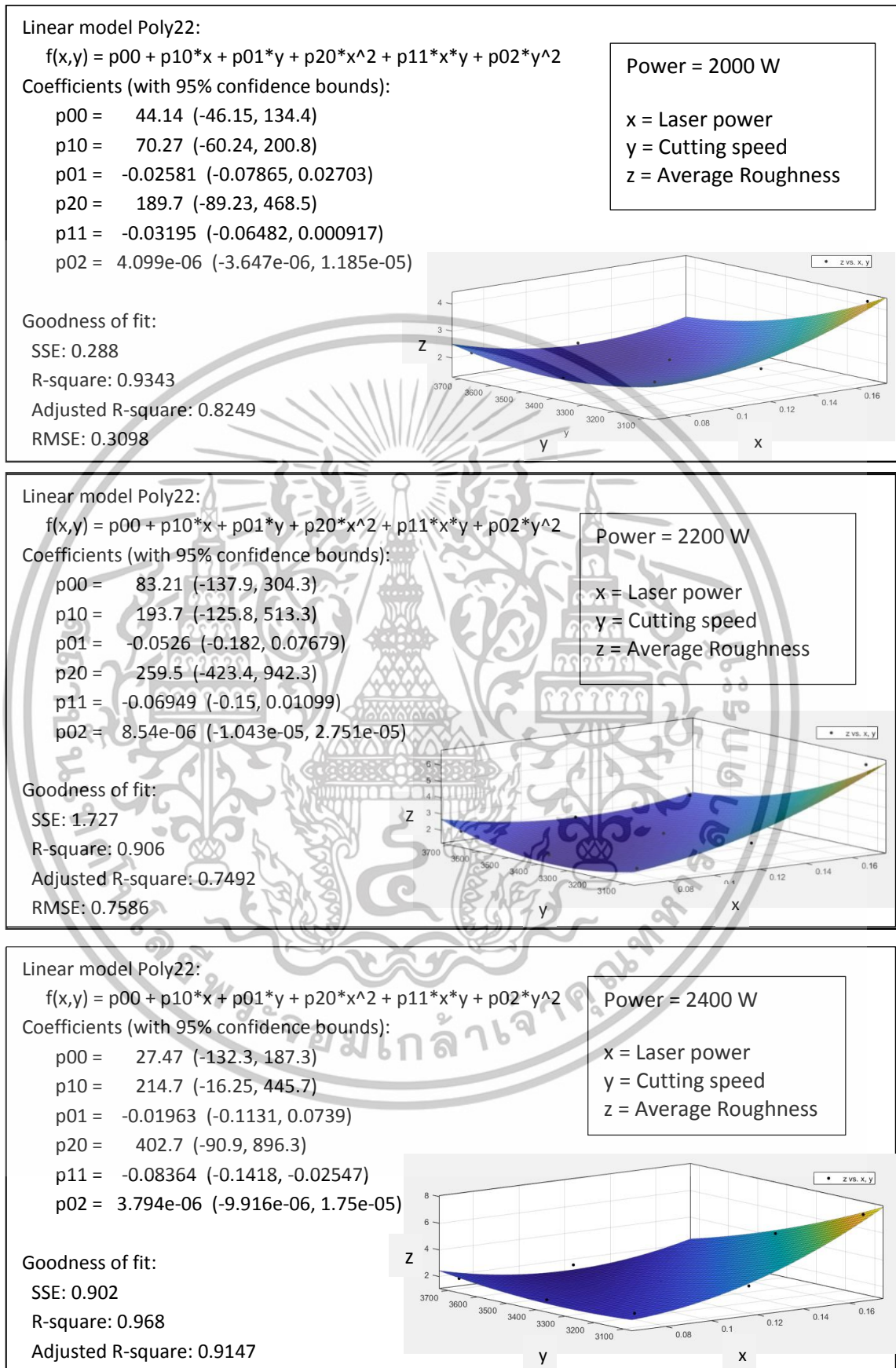
ถึงแม้ว่าค่า R^2 ของทั้งสมการข้างต้นในทุกกรณีของค่ากำลังเลเซอร์จะมีค่ามากและยอมรับได้ แต่เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในกรณีที่กำลังของเลเซอร์เท่ากับ 2000W มีค่าน้อยกว่าในกรณีอื่นจึงเลือกใช้สมการในกรณีที่กำลังของเลเซอร์ที่ 2000 W ดังสมการที่ 5.2 และสมการที่ได้มานั้นจะต้องใช้กับค่าพารามิเตอร์ของเลเซอร์ที่กำลังของเลเซอร์ 2000 – 2400W ความเร็วตัด 3100 – 3700 mm/min และความดันแก๊ส 0.07-0.17 MPa หากนำสมการดังกล่าวไปใช้ทำนายการตัดเลเซอร์ที่ค่าของตัวแปรอยู่นอกช่วงนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แสดงการสร้างสมการสหสัมพันธ์ของความกว้างของรอยตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แสดงการสร้างสมการสหสัมพันธ์ของความหยาบในรอยตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองตัดเหล็กเหนียวที่มีความหนา 3 mm ด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการปรับค่าตัวแปรของเครื่องเลเซอร์ คือ กำลังของเลเซอร์ ความเร็วตัด และความดันแก๊ส ที่ส่งผลต่อความกว้างของรอยตัดและความหยابในผิวของรอยตัด หลังจากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมถึงการวิเคราะห์ถดถอย การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการสร้างสมการสหสัมพันธ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการทดลอง

ผลจากการปรับค่าตัวแปรของกำลังเลเซอร์ ความดันแก๊สช่วย และความเร็วการตัด ส่งผลต่อความกว้างของรอยตัดและความหยابบนผิวของรอยตัด จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ระยะเวลาความกว้างของรอยตัดมีขนาดลดลง เมื่อลดกำลังเลเซอร์และเพิ่มความเร็วการตัด ในกรณีที่กำลังเลเซอร์ต่ำ (2000 W) เมื่อเพิ่มความดันแก๊สจะทำให้ความกว้างของรอยตัดลดลง แต่เมื่อกำลังของแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความดันแก๊สจะทำให้รอยตัดกว้างขึ้น
2. ความหยابบนผิวรอยตัดลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วการตัด และลดความดันแก๊สช่วย

6.2 สรุปผลจากการวิเคราะห์ถดถอย การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการสร้างสมการสหสัมพันธ์

จากการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) ทั้งในกรณีของความกว้างของรอยตัดและความหยابผิวในรอยตัด สรุปได้ดังนี้

1. กรณีความกว้างของรอยตัด ตัวแปรที่ส่งผลต่อความกว้างของรอยตัดมากที่สุดคือ กำลังของเลเซอร์ ความเร็วตัด และความดันแก๊ส ตามลำดับ
2. กรณีความหยابผิวในรอยตัด ตัวแปรที่ส่งผลต่อความหยابในรอยตัดมากที่สุดคือ ความดันแก๊ส ความเร็วตัด และกำลังของเลเซอร์ ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในกรณีของความกว้างรอยตัดและความหยابผิวในรอยตัด สรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กรณีความกว้างของรอยตัด พบว่ากำลังของเลเซอร์มีอิทธิพลต่อความกว้างของรอยตัด คือ เมื่อค่ากำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความกว้างรอยตัดเพิ่มขึ้น ส่วนความดันของแก๊สช่วยและความเร็วตัดนั้นยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่ามีอิทธิพลต่อความกว้างรอยตัด
2. กรณีความหนาผิวในรอยตัด พบว่าทั้งความดันของแก๊สช่วยกับความเร็วดัดมีอิทธิพลต่อความหนาผิวในรอยตัด คือ เมื่อความดันของแก๊สช่วยเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาผิวในรอยตัดเพิ่มขึ้น ส่วนความเร็วตัด เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาผิวในรอยตัดลดลง

สมการสหสัมพันธ์สร้างขึ้นมาจากผลการทดลองจริง โดยมีขอบเขตในการทดลองคือสำหรับการตัดเหล็กเหนียวที่มีความหนา 3 mm ด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย โดยมีค่ากำลังของเลเซอร์อยู่ที่ 2000 2200 และ 2400 W มีค่าความเร็วตัดอยู่ที่ 3100 3400 และ 3700 mm/min และค่าความดันแก๊สอยู่ที่ 0.07 0.12 และ 0.17 MPa

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้

ในการนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการตัดเหล็กเหนียวที่มีความหนา 3 mm ด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีค่าพารามิเตอร์ของการตัดแนะนำ คือ กำลังของเลเซอร์ 2200 W ความดันแก๊สซึ่งใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย 0.12 MPa และความเร็วตัด 3400 mm/min สรุปได้ดังนี้

1. หากต้องการชิ้นงานที่มีคุณภาพของผิวที่ดีหรือมีความหนาของรอยตัดน้อย ในการใช้ความเร็วตัดสูงขึ้นเล็กน้อย (3700 mm/min) หรือลดความดันแก๊สลง (0.07 MPa) จะทำให้ความกว้างรอยตัดแคบลงและผิวของรอยตัดมีหยาบลดลง
2. การใช้กำลังของเลเซอร์ที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองวัสดุมากขึ้น

สมการสหสัมพันธ์ที่ใช้สำหรับทำนายความกว้างและความหนาของรอยตัดจากหัวข้อ 5.4 จะเลือกใช้สมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สามารถยอมรับได้ (>0.9) และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ที่น้อย จะได้สมการแนะนำสำหรับทำนายความกว้างและความหนาของรอยตัดได้ดังสมการที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

สมการที่เสนอมานี้ได้มาจากผลการทดลองในช่วงค่ากำลังของเลเซอร์ระหว่าง 2000 – 2400 W ค่าความเร็วตัดอยู่ระหว่าง 3100 – 3400 mm/min และความดันแก๊สอยู่ระหว่าง 0.07 – 0.17 MPa ดังนั้นหากนำสมการดังกล่าวไปใช้ทำนายการตัดเลเซอร์ที่ค่าของตัวแปรอยู่นอกช่วงนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามในการตัดเลเซอร์นั้นยังมีตัวแปรอื่นๆที่มีผลต่อคุณภาพของรอยตัด เช่น ระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน การเลือกใช้ชนิดของหัวตัด รวมไปถึงเลนส์ ซึ่งเลนส์จะมีอายุการใช้งาน โดยการดูดกลืนแสงเลเซอร์ที่ผิวเลนส์จะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งาน เนื่องจากผิวเลนส์ด้านหน้าจะเกิดการสะสมของไอโลหะ เศษโลหะที่หลอมเหลวที่กระเด็นมาติด และควันหรือสิ่งสกปรกอื่นๆ เมื่อมีการดูดกลืนความร้อนสูงขึ้นจะเกิดความร้อนสะสมอยู่บนเลนส์จะขยายไปสู่เนื้อเลนส์ ส่งผลให้เลนส์เกิดการขยายตัวแบบไม่สมมาตร ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและคุณภาพของจุดรวมแสง หรือแสงเลเซอร์ที่ออกมาไม่เสถียรภาพ จึงควรเปลี่ยนอย่างสม่ำเสมอเมื่อคุณภาพรอยตัดแยกลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] John C. Ion. **Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application**. Elsevier Inc. March 2005.
- [2] Chen S.L. "The effects of gas composition on the CO₂ laser cutting of mildsteel.", **Journal of Materials Processing Technology**., vol. 73, 1998. pp. 147-159
- [3] Yilbas B.S. "Laser cutting of thick sheet metals: Effects of cutting parameters on kerf size variations.", **Journal of Materials Processing Technology**., vol. 201, 2008. pp. 285-290
- [4] Chen S.L. "The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting.", **Journal of Materials Processing Technology**., vol. 88(1999), pp. 57- 66
- [5] Thomas DJ. "Optimising laser cut-edge durability for steel structures in high stress applications.", **Journal of Constructional Steel Research**., vol. 121 (2016), pp. 40-49
- [6] Cekic A. and Begic-Hajdarevic D. "Definition of Mathematical Models of High-alloyed Steel 1.4828 in CO₂ Laser Cutting.", **Procedia Engineering**., vol. 100, 2015. pp. 435-444
- [7] Chen K. and Yao L. "Numerical Simulation of Oxidation Effects in Laser Cutting of Mild Steels.", **Laser Materials Processing Conference**., vol. 83, 1997. pp. 31-45
- [8] Chen K. and Yao L. "Striation Formation and Melt Removal in the Laser Cutting Process.", **Journal of Manufacturing Processes**., vol. 1, 1999. pp. 43-53
- [9] Wee L.M. and Lin L. "An analytical model for striation formation in laser cutting.", **Applied Surface Science**., vol. 247, 2005. pp. 277-284
- [10] Powell J., Al-Mashikhi S.O., Kaplan A.F.H. and Voisey K.T. "Fibre laser cutting of thin section mild steel: An explanation of the 'striation free' effect.", **Optics and Lasers in Engineering**., vol. 49, 2011. pp. 1069-1075
- [11] Rajaram N., Sheikh-Ahmad J. and Cheraghi S.H. "CO₂ laser cut quality of 4130 steel.", **International Journal of Machine Tools and Manufacture**., vol. 43, 2003. pp. 351-358
- [12] Lamikiz A., Lacalle L.N., Sánchez J.A., Pozo D.d., Etayo J.M. and López J.M. "CO₂ laser cutting of advanced high strength steels (AHSS).", **Applied Surface Science**., vol. 242, 2005. pp. 362-368

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Kar A., Rothenflue J.A. and Latham W.P. "Scaling laws for thick-section cutting with a chemical oxygen-iodine laser.", **Journal of Laser Applications.**, vol. 9, 1997. pp. 279-286
- [14] Yilbas B.S. "Effect of process parameters on the kerf width during the laser cutting process.", **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.**, vol. 215 Part B, 2001. pp. 1357-1365
- [15] สารานุกรมเสรี วิกีพีเดีย. "เลเซอร์" [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://th.wikipedia.org/wiki/เลเซอร์>. 2560.
- [16] Wikipedia the free encyclopedia. "Maser." [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Maser>. 2018.
- [17] Kenichi Iga. **Fundamentals of laser optics**. Kogelnik H, editor. New York: Plenum Press. 1994.
- [18] Theodore H. Maiman. "Stimulated optical radiation in ruby.", **Nature.**, vol. 187, 1960. pp. 493-494
- [19] Javan A., Bennett W.R. and Herriott D.R. "Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture.", **Physical Review Letters**. vol. 6, 1961. pp. 106-110
- [20] สำนักงานวิจัยและพัฒนาการทหารกลาโหม. **เลเซอร์และการประยุกต์ใช้**. กรุงเทพฯ. 2537.
- [21] Hall R.N., Fenner G.E., Kingsley J.D., Soltys T.J. and Carlson R.O. "Coherent light emission from GaAs junctions.", **Physical Review Letters**. vol. 9, 1962. pp. 366-368
- [22] Nathan M.I., Dumke W.P., Burns G., Dill, F.H. Jr and Lasher G. "Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions.", **Applied Physics Letters**. vol. 1, 1962. pp. 62-64
- [23] Quist T.M., Rediker R.H., Keyes R.J., Krag W.E., Lax B. McWhorter A.L. and Zeigler H.J. "Semiconductor maser of GaAs.", **Applied Physics Letters**. vol. 1, 1962. pp. 91-92
- [24] Patel C.K.N. "Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO₂.", **Physical Review**. vol. 136, 1964. pp. 1187-1193
- [25] ดุสิต เครื่องาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ – ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน – เล่ม 2**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [26] Wilson J. and Hawkes J.F.B. **Lasers Principles and Applications**. Pearson Education Indochina Ltd. 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] David P. Beach. **Applications of lasers and laser systems.** PTR Prentice Hall, Inc. 1993.
- [28] Wikipedia the free encyclopedia. "**Ruby laser.**" [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Ruby_laser. 2018
- [29] Wikipedia the free encyclopedia. "**Nd:YAG laser.**" [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Nd:YAG_laser. 2018.
- [30] Wikipedia the free encyclopedia. "**Carbon dioxide laser.**" [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide_laser. 2018.
- [31] Elijah Kennatey-Asibu Jr. **Principles of laser materials processing.** Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2009.
- [32] Wikipedia the free encyclopedia. "**Laser diode.**" [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode. 2018.
- [33] New Technologies Research Centre: University of West Bohemia. "**Laser surface hardening.**" [Online]. Available : <https://tp.zcu.cz/en/laboratories/laser-surface-treatment/technologies/laser-surface-hardening>.
- [34] Trumpf India Private Limited. "**Laser welding.**" [Online]. Available : https://www.trumpf.com/en_IN/applications/laser-welding. 2017.
- [35] Triton Industries. "**Laser cutting.**" [Online]. Available : <http://www.tritonindustries.com/laser-cutting>. 2017.
- [36] Magod Laser Machining Private Limited. "**Laser drilling.**" [Online]. Available : https://www.kmlt.de/index.php/applications_laser_marking.html. 2017.
- [37] Laser Impressions. "**Micromachining a Silicon Wafer.**" [Online]. Available : <http://www.laserimpressions.com/micromachining-silicon-wafer>. 2017.
- [38] KIRCHNER UND MÜLLER LASERTECHNIK GMBH and the DREMICUT GMBH. "**Laser marking applications.**" [Online]. Available : https://www.kmlt.de/index.php/applications_laser_marking.html. 2017.
- [39] John F. Ready, Farson D.F. and Feeley T. **LIA Handbook of Laser Materials Processing.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2001.
- [40] Yilbas B.S. **Laser heating applications.** California, USA: Elsevier Inc. 2012.
- [41] Riveiro A., Mejías A., Soto R., Quintero F., del Val J., Boutinguiza M., Lusquiños F., Pardo J. and Pou J. "CO₂ laser cutting of natural granite.", **Optics & Laser Technology.** vol. 76, 2016. pp. 19-28
- [42] William M. Steen. **Laser material processing.** London, New York : Springer. 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [43] Clean Energy Institute University of Washington. "Transverse Electromagnetic Modes for a rectangular laser reflector." [Online]. Available : <http://photonicswiki.org/index.php?title=Lasers>. 2006.
- [44] Lydia Sobotova and Miroslav Badida. "Laser marking as environment technology.", **De Gruyter**. 2017. pp. 303-316
- [45] John Powell. **CO₂ laser cutting**. New York, London: Springer. 1998.
- [46] Abdul Fattah Mohd Tahir and Syarifah Nur Aqida. "An investigation of laser cutting quality of 22MnB5 ultra high strength steel using response surface methodology.", **Optics & Laser Technology**., vol. 92, 2017. pp. 142-149
- [47] Misumi Thailand. "Surface Roughness 2012." [Online]. Available : <http://th.misumi-ec.com/marker/campaign/email20120206>. 2016.
- [48] อนุสรณ์ ทนหมื่นไวย์. "การวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน" **นิตยสาร Blue update**, เล่มที่ 13, 2557. หน้า 20-21
- [49] กัลยา วานิชย์บัญชา. **การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย SPSS for Windows**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2540.
- [50] ทรงศิริ แต่สมบัติ. **การวิเคราะห์การถดถอย**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2548.
- [51] Yilbas B.S., Karatas C., Uslan I., Keles O., Usta Y. and Yilbas Z. "Wedge cutting of mild steel by CO₂ laser and cut-quality assessment in relation to normal cutting.", **Optics and Lasers in Engineering**., vol. 46, 2008. pp. 777-784
- [52] Rajaram N., Sheikh-Ahmet J. and Cheraghi S.H. "CO₂ laser cut quality of 4130 steel.", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**., vol. 43, 2003. pp. 351-358
- [53] Eltawahni H.A., Hagino M., Benyounis K.Y., Inoue T. and Olabi A.G. "Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L.", **Optics & Laser Technology**. vol. 44, 2012. pp. 1068-1082
- [54] Chen S-L. "The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting.", **Journal of Materials Processing Technology**. vol. 88, 1999. pp. 57-66
- [55] มนต์ชัย เทียนทอง. **สถิติและวิธีการวิจัยทางเทคโนโลยีสารสนเทศ**. กรุงเทพฯ: สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ประวัติและชนิดของเลเซอร์

1. ประวัติของเลเซอร์

หลักการในการกำเนิดเลเซอร์เกิดจากทฤษฎีของไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ในปี ค.ศ. 1917 ซึ่งเป็นการใช้โฟตอนของแสงกระตุ้นอะตอมให้ปล่อยพลังงานออกมา ก่อนที่จะมีการกำเนิดเลเซอร์ขึ้น ได้มีนักวิจัยพัฒนาและคิดค้นเมเซอร์ (MASER, microwave amplification by stimulated emission of radiation) การเกิดขึ้นของเมเซอร์เกิดจากการกระตุ้นอะตอมหรือโมเลกุลให้มีพลังงานสูงและได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงไมโครเวฟ แสดงตารางการพัฒนาของเมเซอร์ ดัง

ตารางที่ ก.1 โดยเริ่มจาก Charles H. Townes ได้คิดค้นการกระตุ้นโมเลกุลของแอมโมเนียให้มีการสั่นและมีพลังงานเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1951 ต่อมาในปี ค.ศ. 1954 Townes และนักศึกษาของเขาอีกสองคนคือ James Gordon และ Herb Zeiger ได้อธิบายกระบวนการการกระตุ้นพลังงานในช่วงคลื่นไมโครเวฟขึ้นมา หลังจากนั้น Townes จึงได้กำหนดอักษรย่อของกระบวนการนี้คือ maser หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1957 Scovil ได้สร้าง Solid state maser ขึ้นมาครั้งแรกโดยใช้แกโดลิเนียม (Gadolinium) และภายหลังได้มีการคิดค้น Ruby maser ขึ้นมาในปี ค.ศ. 1958 โดย Makhov ในปัจจุบัน MASER นั้นได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ต่างๆ เช่น นาฬิกาอะตอม (Atomic clocks) เครื่องขยายสัญญาณไมโครเวฟที่มีสัญญาณรบกวนต่ำในกล้องโทรทรรศน์วิทยุ (Low-noise microwave amplifiers) และใช้ในสถานีสื่อสารภาคพื้นดินกับยานอวกาศ [16]

ตารางที่ ก.1 การพัฒนาของเมเซอร์ [17]

Year	Name	Description	Applications
1951	Townes	Conception of maser Ammonia maser (23,870	Microwave oscillation
1954	Gordon, Zeiger and Townes	MHz)	Atomic clock Accuracy of frequency 10^{-10}
1956	Bloembergen	Paramagnetic crystal (3 levels)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1957	Scovil	Gadolinium ethylsulfate	
1958	Makhov	Ruby maser (2380 MHz)	
		Low-noise amplifier	High-sensitivity radar
			Radio telescope
			Space communication
1960	Ramsey <i>et al.</i>	Hydrogen maser (1420 MHz)	Frequency standard
			Accuracy of frequency 10^{-13} to 10^{-14}
1964	Davidovitz	Rubidium maser (6835 MHz)	Accuracy of frequency 10^{-12}

หลังจากมีการค้นพบเมเซอร์ ก็ได้มีการพัฒนาของเลเซอร์ แสดงดัง

ตารางที่ ก.2 โดยมีการนำเสนอเลเซอร์มากมายตั้งแต่ปี ค.ศ. 1958 ถึง 1960 อย่างไรก็ตามเลเซอร์เครื่องแรกที่ให้แสงออกมาได้คือ Ruby laser หรือเลเซอร์ทับทิม ที่มีความยาวคลื่น 694.3 nm ซึ่งคิดค้นโดย Theodore H. Maiman ในปี ค.ศ. 1960 [18] หลังจากนั้น Ali Javan และคณะ [19] ได้ค้นพบระบบแก๊สเลเซอร์ ซึ่งเป็นแก๊สเลเซอร์แบบแรก โดยใช้แก๊สผสมฮีเลียม-นีออน เป็นตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ มีความยาวคลื่น 1150 nm เรียกว่าฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ (He-Ne laser) ต่อมาในปี ค.ศ. 1962 ได้มีการค้นพบฮีเลียม-นีออนเลเซอร์อีกชนิดหนึ่งซึ่งมีความยาวคลื่น 632.8 nm โดยเลเซอร์นี้ให้แสงสีแดง [20] ต่อมาในปี ค.ศ. 1962 Hall และคณะ [21] Nathan และคณะ [22] และ Quist และคณะ [23] ต่างก็ได้คิดค้น Semiconductor laser โดยใช้ แกลเลียมอาร์ซีไนด์ (GaAs) ซึ่งเป็นเลเซอร์ที่มีอุณหภูมิไม่สูงนัก หลังจากนั้น Kumar Patel [24] ได้ค้นพบและสร้างเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) ในปี ค.ศ. 1964 ซึ่งให้กำลังออกมา 1 มิลลิวัตต์ และต่อมาได้พัฒนาจนสามารถให้กำลังออกมาได้ 8.8 kW หลังจากนั้นก็ได้มีการค้นพบดายเลเซอร์ (Dye laser) จนถึง Free electron laser (FEL) ซึ่งภายหลังได้มีการพัฒนาเลเซอร์และนำมาประยุกต์ใช้มากมายในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ประวัติของเลเซอร์ [17]

Year	Name	Description
1958	Schawlow, Townes	Proposal of optical maser K ligh pump, unsuccessful
	Basov	Theory of optical maser
1959	Schawlow	Proposal of ruby laser
1960	Maiman	Ruby laser oscillation successful; $\lambda = 0.6943 \mu\text{m}$ (3 levels)
	Sorokin	Uranium laser, $\lambda = 2.5 \mu\text{m}$ (4 levels)
1959-1960	Aigrain (France) Nishizawa (Japan) Basov (USSR)	Proposal of semiconductor laser
1960	Javan et al.	He-Ne laser, $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ (internal reflecting mirror)
1961	Rigrod	He-Ne laser, $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ (external reflecing mirror)
1962	White	He-Ne laser, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$
1962	Nathan et al. (IBM)	Semiconductor laser
	Hall et al. (GE)	
	Quist et al. (MIT)	
	Holonyak et al. (Ill. Univ.)	
1963	Mathias	N ₂ laser
1964	Geusic	YAG laser
	Bridges	Ar-ion laser
	Patel	CO ₂
1965	Khokhlov	KDP optical parametric oscillator
	Wang	ADP optical parametric oscillator
	Giodmaine	LiNbO ₃ optical parametric oscillator
1966	Sorokin	Dye laser
1969	Hayashi, Panish	GaAs/GaAlAs, double heterostructure semiconductor laser
1970		Double heterostructure room temperature CW
1973		Coherent ultraviolet ray
1975		Generation of x ray
1976	Hsieh	GaInAsP semiconductor laser ($\lambda \cong 1.1 \mu\text{m}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1978	Several groups	GaInAsP semiconductor laser ($\lambda \cong 1.3 \mu\text{m}$)
------	----------------	---

2. ชนิดของเลเซอร์

ในปัจจุบันเลเซอร์ได้มีการพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้งานหลากหลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งชนิดของเลเซอร์ตามตัวกลางเลเซอร์ (Laser medium) ที่ใช้ เช่น เลเซอร์ชนิดแก๊ส (Gas laser) ซึ่งเป็นเลเซอร์ที่นิยมกันอย่างกว้างขวางในงานทางด้านอุตสาหกรรม เช่น ฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ และคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ และเลเซอร์ชนิดอื่น ๆ ที่นิยมเช่นกัน คือ เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor laser) เลเซอร์ชนิดของแข็ง (Solid-state laser) เลเซอร์ทับทิม (Ruby laser) และด้ายเลเซอร์ (Dye laser) เป็นต้น โดยสามารถแบ่งชนิดของเลเซอร์ตามสถานะของตัวกลางเลเซอร์ได้ดังนี้

1. เลเซอร์ชนิดของแข็ง (Solid-state laser)

เลเซอร์ชนิดของแข็ง หรือ โซลิดสเตทเลเซอร์ เป็นเลเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเป็นของแข็ง ประกอบด้วย เลเซอร์ทับทิม (Ruby laser) เลเซอร์แย็ค (YAG laser) เลเซอร์แก้ว (Glass laser) และอื่นๆ

เลเซอร์ทับทิม (Ruby laser) เป็นเลเซอร์ชนิดแรกที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยทีโอดอร์ ไนแมน ผลึกทับทิมนี้ประกอบด้วย Cr^{3+} ion ซึ่งถูกเจือปนอยู่ในผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งให้แสงสีแดง [17] ให้ความยาวคลื่นออกมาอยู่ที่ 694.3 nm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ 1 – 25 mm ในปกติแล้วเลเซอร์ชนิดนี้จะให้พลังงานออกมาอยู่ที่ 1 – 10 J แต่สำหรับการใช้เป็นเลเซอร์ชนิดพัลส์พลังงานสูงโดยการใช้ Q-switching สามารถให้กำลังออกมาได้ถึง 10^9 W อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ได้กำลังออกมามากถึงหลายร้อยเมกะวัตต์เครื่องเลเซอร์นี้จะเสียหายได้ [27] ประโยชน์ของเลเซอร์ชนิดนี้ สามารถนำไปใช้เกี่ยวกับการทดสอบโดยไม่ทำลาย (Non-destructive testing, NDT) เช่นการตรวจสอบเพื่อหาจุดอ่อนในยางของเครื่องบิน และสามารถนำมาใช้เพื่อกำจัดรอยสักและกำจัดขน แต่ในปัจจุบันนี้ถูกแทนที่ด้วยเลเซอร์ชนิด Nd:YAG [28] แสดงตารางคุณสมบัติของเลเซอร์ทับทิมในตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของเลเซอร์ทึบทิม [27]

Active Medium	Chromium-doped sapphire
Output Wavelength	694.3 nm
Power Range	1-100 joules
Pulsed or CW	Pulsed
Excitation	Optical (Xenon lamp)
Polarization	Linear

เลเซอร์ชนิด Nd:YAG (yttrium-aluminum-garnet, $Y_3Al_5O_{12}$) มีตัวกลางเลเซอร์เป็น $Y_3Al_5O_{12}$ ที่เจือปนด้วย Nd^{3+} ion ตัวกลางนี้มีการนำความร้อนสูง ให้ความยาวคลื่นออกมาที่ 1,064 nm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ 1 – 10 mm สามารถให้กำลังออกมาตั้งแต่ 0.1 W ไปจนถึงหลายกิโลวัตต์ เมื่อใช้การ Q-switched ที่ประมาณ 10 ถึง 20 ns จะสามารถให้พลังงานออกมาสูงสุดหลายร้อยกิโลวัตต์ [27] ประโยชน์ของเลเซอร์ชนิดนี้มีใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านต่างๆเช่น ทางด้านการแพทย์: การผ่าตัดเนื้องอก การกำจัดมะเร็ง , ทางด้านอุตสาหกรรม : การตัด การทำตราสัญลักษณ์ การเชื่อม และเกี่ยวกับทางด้านการทหาร : อาวุธที่ทำด้วยเลเซอร์ เป็นต้น [29] ตารางที่ ก.4 แสดงตารางคุณสมบัติของแย์คเลเซอร์

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติของเลเซอร์ชนิด Nd:YAG [27]

Active Medium	YAG-doped Nd crystal
Output Wavelength	6,064 nm
Power Range	10 – 4,000 W
Pulsed or CW	Both
Excitation	Optical (Krypton lamp)
Polarization	Unpolarized or linear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์แก้วหรือเลเซอร์ชนิด Nd:glass เป็นเลเซอร์ที่ใช้แก้วเป็นตัวกลาง โดยมี Nd^{3+} เจือปนอยู่ให้ความยาวคลื่นออกมาอยู่ที่ 1,054 nm เลเซอร์ชนิดนี้สามารถใช้ได้เฉพาะแบบพัลส์เท่านั้น (Pulse mode) และมีอัตราของการพัลส์ที่ต่ำ อยู่ที่ประมาณหนึ่งรอบต่อวินาที การนำมาใช้งานของเลเซอร์ชนิดนี้มักจะนำมาใช้ในการเจาะโลหะ หรือการเชื่อมแบบจุด (Spot welding)

2. เลเซอร์ชนิดของเหลว (Liquid laser)

ดายเลเซอร์ (Dye laser) หรือเลเซอร์ประเภทสีย้อมผ้า เป็นเลเซอร์ที่มีตัวกลางเป็นของเหลว ใช้กันมากในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ เนื่องจากเป็นเลเซอร์ที่มีความยืดหยุ่นในการปรับสเปกตรัมหรือความยาวคลื่นของแสงได้ง่ายโดยการปรับส่วนผสมของตัวกลางเลเซอร์ และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้ [27] ในการนำดายเลเซอร์ไปใช้งานจะอาศัยหลักการของการสะท้อนแสงคือ วัสดุที่มีสีนั้นๆ จะสะท้อนแสงสีนั้นๆ และดูดกลืนแสงสีอื่น เช่น วัสดุสีแดงเมื่อมีแสงสีขาวย้อมสีจะสะท้อนแสงสีแดงออกมา เนื่องจากแสงสีขาวยกเกิดการผสมกันของสีแดง สีน้ำเงิน และสีเขียว หรือวัสดุสีเขียวเมื่อมีแสงสีเหลืองมาส่องจะสะท้อนสีเขียวออกมา เนื่องจากแสงสีเหลืองเกิดการผสมกันของแสงสีแดงและสีเขียว โดยประโยชน์ของการใช้ดายเลเซอร์คือสามารถปรับความยาวคลื่นหรือกำหนดสีให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น ในการผ่าตัดจะใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วงที่สามารถสะท้อนสีแดง เนื่องจากเลือดเป็นสีแดงจึงสะท้อนสีแดง และดูดกลืนแสงสีอื่น [1] ตารางที่ ก.5 แสดงตารางคุณสมบัติของดายเลเซอร์

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของดายเลเซอร์ [27]

Active Medium	Organic dye
Output Wavelength	Wide range
Power Range	mW range
Pulsed or CW	Pulsed
Excitation	Optical (lamp or solid laser)
Polarization	Unpolarized or linear

3. เลเซอร์ชนิดแก๊ส (Gas laser)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์ชนิดแก๊ส เป็นเลเซอร์ที่ใช้ตัวกลางเป็นแก๊ส ในปัจจุบันมีการใช้แก๊สหลายชนิด แต่โดยทั่วไปที่นิยมใช้กันนั้นประกอบไปด้วย เลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) เลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ laser) เลเซอร์ชนิดอออน (Ion laser) เลเซอร์ชนิดฮีเลียม-แคดเมียม (He-Cd laser) และเลเซอร์ชนิดไนโตรเจน (N₂ laser) เป็นต้น

เลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน (Helium-Neon laser) เป็นเลเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างทั่วไปในเลเซอร์ระบบแก๊ส และยังเป็นแก๊สเลเซอร์แบบแรกอีกที่ใช้ได้จริงอีกด้วย [17] ส่วนผสมโดยทั่วไปของแก๊สฮีเลียมคือ 90% และแก๊สนีออน 10% ซึ่งเลเซอร์ชนิดนี้สามารถทำให้มีความยาวคลื่นได้มากกว่าหนึ่งค่า แต่โดยทั่วไปแล้ว มักจะทำให้เกิดแสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 632.8 nm และให้กำลังออกมาตั้งแต่ 1 – 10 mW [27] ตัวอย่างการนำมาประยุกต์ใช้งาน เช่น เครื่องอ่านบาร์โค้ด เลเซอร์พอยเตอร์ อุปกรณ์การสำรวจถนน การใช้ในงานวิจัย โฮโลกราฟี รวมไปถึงการแสดง เป็นต้น ตารางที่ ก.5 แสดงตารางคุณสมบัติของฮีเลียม-นีออนเลเซอร์

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติของเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน [27]

Active Medium	Neon Gas
Output Wavelength	632.8 nm
Power Range	0.1 mW – 100 mW
Pulsed or CW	CW
Excitation	Electrical (500-3,000 VDC)
Polarization	Unpolarized or linear

* most common wavelength

เลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ laser) เป็นเลเซอร์ที่สามารถนำมาใช้งานได้ในงานหลายๆ ด้าน ลำแสงเลเซอร์ที่ได้อยู่ภายในช่วงรังสีอินฟราเรด ให้มีความยาวคลื่นออกมาที่ 10 nm สามารถให้กำลังออกมาได้ตั้งแต่กำลังต่ำๆ (1 W) ไปจนถึงกำลังสูงๆ (kW) โดยลำแสงเลเซอร์ที่ได้สามารถผลิตออกมาได้ทั้งในรูปแบบพัลส์ (Pulsed) และคลื่นต่อเนื่อง (Continuous wave, CW) ได้ [27]

โดยในเลเซอร์ชนิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีแก๊สผสมซึ่งได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สไนโตรเจน (N₂) และแก๊สฮีเลียม (He) เป็นตัวกลางเลเซอร์ โดยอัตราส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่าง 1 - 9 % แก๊สฮีเลียม 60 – 85 % และแก๊สอื่นๆอีกจำนวนหนึ่ง โดย

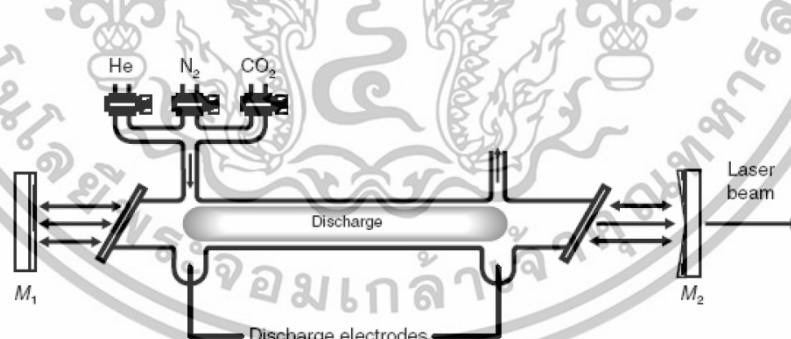
เปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมที่แท้จริงนั้นขึ้นอยู่กับารออกแบบของออปติคัลควิตี้ อัตราการไหลของแก๊ส และอุปกรณ์เชื่อมต่อที่ใช้ นอกจากนั้นการใช้แก๊สบริสุทธิ์เป็นสิ่งสำคัญในเลเซอร์ชนิดนี้ โดยทั่วไปแก๊สฮีเลียมและไนโตรเจน 99.995 % และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.990 % [1] ประโยชน์ของเลเซอร์ชนิดนี้นำมาใช้ในงานประเภทต่างๆ เช่น ในด้านอุตสาหกรรมการตัดหรือการเชื่อม รวมไปถึงการแกะสลัก (Engraving) ในด้านการแพทย์ เช่นการผ่าตัด และอื่นๆ เช่น การผลิตอุปกรณ์ของไหลจุลภาค หรือ ไมโครฟลูอิดิกส์ (Microfluidic devices) การค้นหาตำแหน่งในด้านการทหาร การเพิ่มยูเรเนียม และ การผลิตอาวุธ [30]

ตารางที่ ก.5 แสดงตารางคุณสมบัติของเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์

Active Medium	Carbon Dioxide Gas
Output Wavelength	10,600 nm
Power Range	10 W – 5,000 W
Pulsed or CW	Both
Excitation	Electrical (10,000-50,000 V)
Polarization	Unpolarized

* most common wavelength

ตัวอย่างแผนภาพส่วนประกอบของเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ส่วนประกอบของเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ [31]

เลเซอร์ชนิดไอออน (Ion laser) ใช้แก๊สอาร์กอน (Ar) หรือคริปทอน (Kr) เป็นแก๊สไอออไนซ์ (ionized) โดยการปล่อยอิเล็กตรอน เลเซอร์ชนิดนี้สามารถให้ความยาวคลื่นออกมาได้หลายค่า เช่นสำหรับเลเซอร์ชนิดแก๊สอาร์กอนสามารถให้ความยาวคลื่นออกมาได้หลายค่าดังตารางที่ ก.7 แต่ค่าความยาวคลื่นที่

โดดเด่นคือ 488 และ 514.5 nm [27] การนำไปใช้งานของเลเซอร์ชนิดนี้ได้แก่ การประยุกต์ใช้และการสังเกตการณ์ในปรากฏการณ์แทรกสอด เช่น เลเซอร์ดอปเปอร์ [17]

ตารางที่ ก.6 ความยาวคลื่นของเลเซอร์ชนิดอาร์กอน [27]

Wavelength (nm)
514.5
501.7
496.5
488.0
476.5
472.7
465.8
457.9
351.1-363.8

เลเซอร์ชนิดฮีเลียม-แคดเมียม (Helium-Cadmium laser) เป็นเลเซอร์ที่ใช้การปล่อยอิเล็กตรอนในออรอนของโลหะ (Cadmium) ให้แสงสีฟ้าและแสงอัลตราไวโอเล็ต เลเซอร์ชนิดนี้มักนำมาใช้เกี่ยวกับกระบวนการแทรกสอดในโฮโลกราฟีค [17]

เลเซอร์ชนิดไนโตรเจน (Nitrogen laser) เลเซอร์ชนิดนี้สามารถให้กำลังออกมาสูงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตที่ 337 nm ด้วยระบบพัลส์ใน 2 ns โดยทั่วไปแล้วกำลังจะอยู่ที่ 100 mW แต่แสงที่ได้จากเลเซอร์ชนิดนี้เป็นแสงที่มีโคฮีเรนซ์ที่แย่มาก ในการนำมาใช้งานจึงมีข้อจำกัด [17]

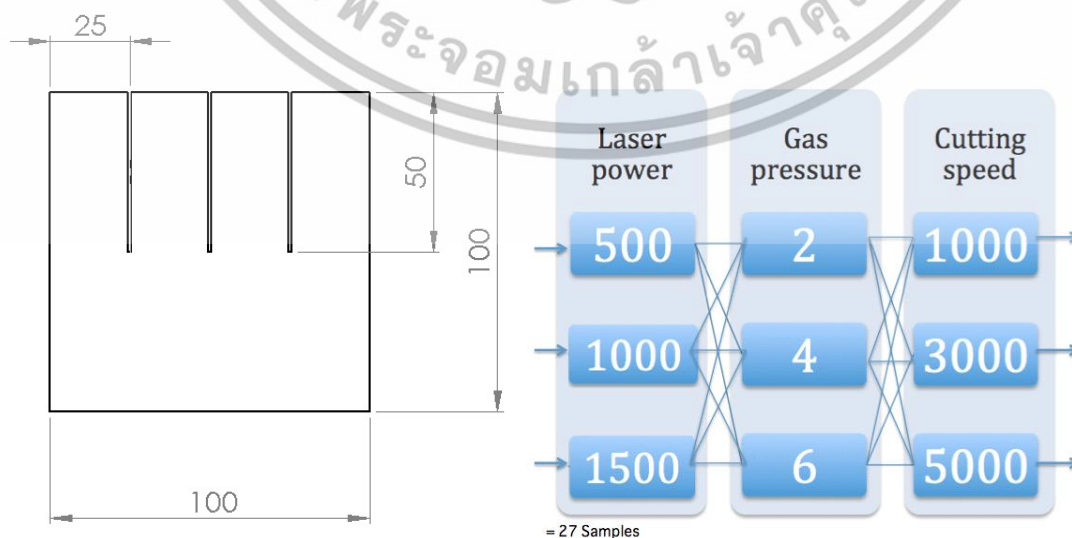
4. เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor laser)

เลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ หรือเลเซอร์ไดโอด เป็นการพัฒนาในเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำและไดโอด โดยใช้ไฟเบอร์ออปติกส์ในการส่งผ่านลำแสง เพื่อความกะทัดรัด พกพาสะดวกและมีราคาที่ไม่แพง [27] ในการใช้งานของเลเซอร์ชนิดนี้มีมากมาย เช่น การใช้ไฟเบอร์ออปติกส์ในการสื่อสารคมนาคม การใช้เป็นเครื่องอ่านบาร์โค้ด เลเซอร์พอยเตอร์ เครื่องเล่น CD หรือ DVD และ เครื่องพิมพ์เลเซอร์ เป็นต้น [32]

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Part Number	Laser power (W)	Gas pressure (MPa)	Cutting speed (mm/min)
1	2000	0.07	3100
2	2000	0.07	3400
3	2000	0.07	3700
4	2000	0.12	3100
5	2000	0.12	3400
6	2000	0.12	3700
7	2000	0.17	3100
8	2000	0.17	3400
9	2000	0.17	3700
10	2200	0.07	3100
11	2200	0.07	3400
12	2200	0.07	3700
13	2200	0.12	3100
14	2200	0.12	3400
15	2200	0.12	3700
16	2200	0.17	3100
17	2200	0.17	3400
18	2200	0.17	3700
19	2400	0.07	3100
20	2400	0.07	3400
21	2400	0.07	3700
22	2400	0.12	3100
23	2400	0.12	3400
24	2400	0.12	3700
25	2400	0.17	3100
26	2400	0.17	3400
27	2400	0.17	3700

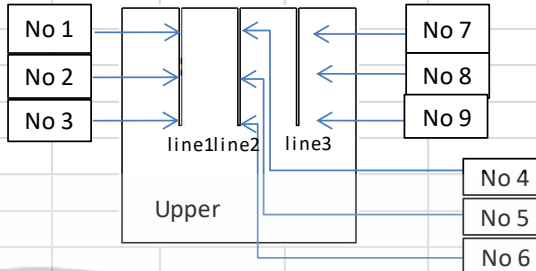


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ภาคผนวก ค

ค่าความกว้างรอยตัดที่ได้จากการทดลอง

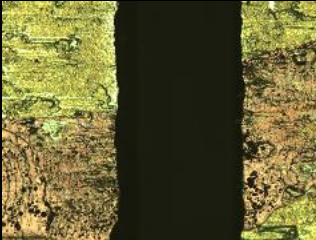


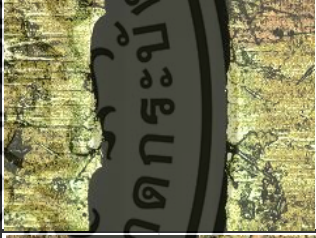

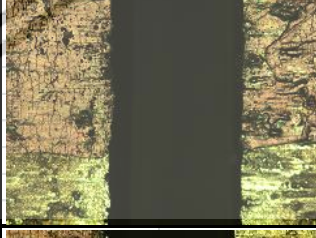

Sample	รอยตัดที่ (Line)	No (1 to 9)	Upper kerf width (µm)				Average per line	Average per Sample	Picture
			Data	min	max				
1	1	1	316	299	319	307	306		
		2	305						
		3	301						
	2	1	306						
		2	299						
		3	299						
	3	1	319						
		2	309						
		3	303						
2	1	1	277	277	309	292	297		
		2	295						
		3	303						
	2	1	293						
		2	292						
		3	305						
	3	1	297						
		2	309						
		3	303						
3	1	1	364	280	364	335	315		
		2	327						
		3	315						
	2	1	280						
		2	287						
		3	295						
	3	1	335						
		2	326						
		3	304						
4	1	1	379	256	379	351	313		
		2	353						
		3	321						
	2	1	300						
		2	296						
		3	306						
	3	1	256						
		2	301						
		3	304						
5	1	1	331	259	331	316	294		
		2	321						
		3	295						
	2	1	281						
		2	295						
		3	291						
	3	1	259						
		2	285						
		3	286						
6	1	1	343	265	343	329	294		
		2	329						
		3	314						
	2	1	268						
		2	282						
		3	290						
	3	1	265						
		2	274						
		3	282						






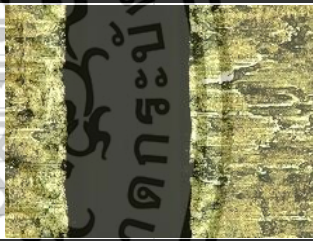

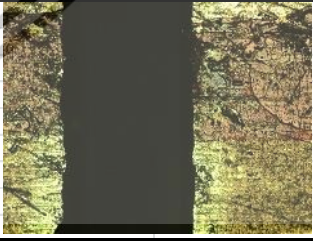
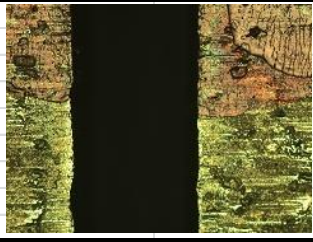
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	รอยตัดที่ (Line)	No (1 to 9)	Upper kerf width (μm)				Picture	
			Data	min	max	Average per line		Average per Sample
7	1	1	337	292	365	349	324	
		2	345					
		3	365					
	2	1	292					
		2	318					
		3	330					
	3	1	292			310		
		2	314					
		3	324					
8	1	1	313	260	323	311	297	
		2	323					
		3	297					
	2	1	276			295		
		2	304					
		3	305					
	3	1	260			284		
		2	283					
		3	308					
9	1	1	269	269	305	288	292	
		2	296					
		3	298					
	2	1	276			289		
		2	295					
		3	296					
	3	1	290			300		
		2	304					
		3	305					
10	1	1	333	283	333	330	310	
		2	333					
		3	325					
	2	1	289			299		
		2	303					
		3	306					
	3	1	283			299		
		2	303					
		3	312					
11	1	1	327	298	328	326	318	
		2	324					
		3	328					
	2	1	298			309		
		2	310					
		3	318					
	3	1	316			318		
		2	319					
		3	319					
12	1	1	321	292	323	321	309	
		2	323					
		3	319					
	2	1	306			311		
		2	310					
		3	316					
	3	1	292			296		
		2	296					
		3	301					
13	1	1	340	313	356	346	329	
		2	356					
		3	342					
	2	1	313			320		
		2	317					
		3	329					
	3	1	321			322		
		2	327					
		3	319					

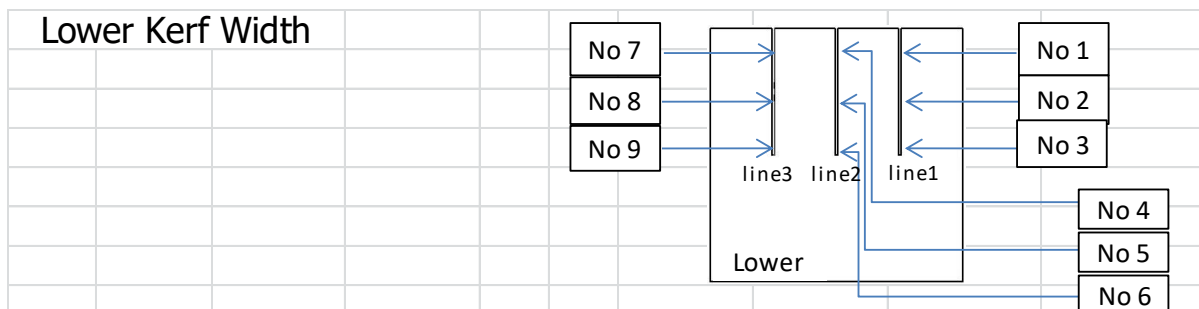
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	รอยตัดที่ (Line)	No (1 to 9)	Upper kerf width (μm)				Average per Sample	Picture
			Data	min	max	Average per line		
14	1	1	308	286	316	312	302	
		2	316					
		3	313					
	2	1	286					
		2	297					
		3	306					
	3	1	286					
		2	292					
		3	310					
15	1	1	356	293	356	336	317	
		2	337					
		3	316					
	2	1	293					
		2	299					
		3	302					
	3	1	323					
		2	311					
		3	312					
16	1	1	298	298	435	388	343	
		2	432					
		3	435					
	2	1	303					
		2	327					
		3	327					
	3	1	301					
		2	337					
		3	329					
17	1	1	364	296	364	347	335	
		2	344					
		3	333					
	2	1	296					
		2	323					
		3	333					
	3	1	339					
		2	347					
		3	340					
18	1	1	383	283	383	356	318	
		2	354					
		3	331					
	2	1	301					
		2	307					
		3	303					
	3	1	283					
		2	294					
		3	309					
19	1	1	310	307	344	323	327	
		2	320					
		3	339					
	2	1	307					
		2	323					
		3	344					
	3	1	333					
		2	331					
		3	336					
20	1	1	302	302	334	318	319	
		2	319					
		3	334					
	2	1	309					
		2	317					
		3	328					
	3	1	315					
		2	324					
		3	321					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

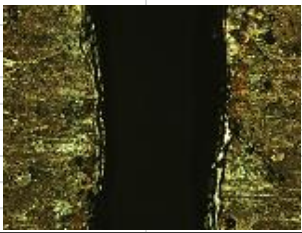
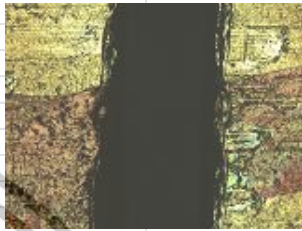
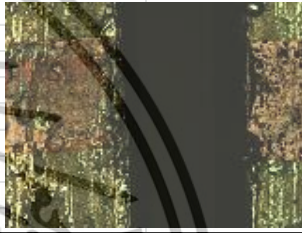

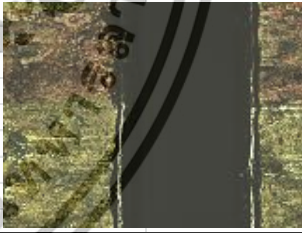


Sample	รอยตัดที่ (Line)	No (1 to 9)	Upper kerf width (μm)					Picture
			Data	min	max	Average per line	Average per Sample	
21	1	1	319	295	319	318	311	
		2	319					
		3	315					
	2	1	303					
		2	316					
		3	315					
	3	1	295					
		2	307					
		3	311					
22	1	1	322	311	344	331	330	
		2	341					
		3	329					
	2	1	325					
		2	311					
		3	344					
	3	1	327					
		2	338					
		3	334					
23	1	1	310	284	327	315	311	
		2	322					
		3	313					
	2	1	284					
		2	301					
		3	311					
	3	1	316					
		2	316					
		3	327					
24	1	1	291	291	321	307	313	
		2	308					
		3	321					
	2	1	302					
		2	312					
		3	319					
	3	1	321					
		2	321					
		3	319					
25	1	1	369	326	369	357	348	
		2	359					
		3	344					
	2	1	326					
		2	349					
		3	343					
	3	1	333					
		2	345					
		3	363					
26	1	1	382	289	382	356	333	
		2	342					
		3	343					
	2	1	289					
		2	301					
		3	326					
	3	1	331					
		2	328					
		3	352					
27	1	1	302	302	331	317	319	
		2	319					
		3	329					
	2	1	304					
		2	305					
		3	326					
	3	1	326					
		2	325					
		3	331					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


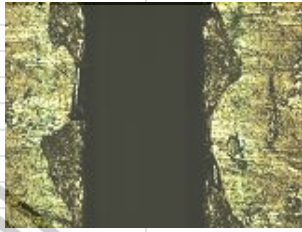
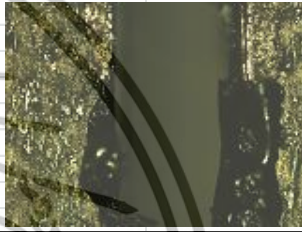

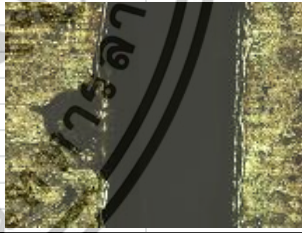
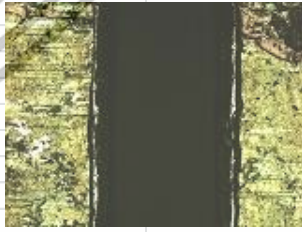
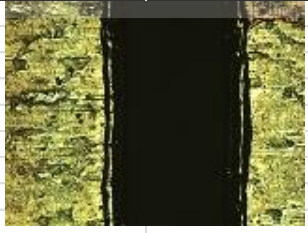


Sample	รอยตัดที่ (Line)	No (1 to 9)	Lower kerf width (µm)				Picture	
			Data	min	max	Average per line		Average per Sample
1	1	1	362	336	362	355	347	
		2	358					
		3	346					
	2	1	347					
		2	343					
		3	343					
	3	1	344					
		2	342					
		3	336					
2	1	1	322	318	365	323	333	
		2	318					
		3	329					
	2	1	330					
		2	325					
		3	323					
	3	1	365					
		2	351					
		3	337					
3	1	1	388	339	388	369	357	
		2	371					
		3	349					
	2	1	339					
		2	346					
		3	345					
	3	1	383					
		2	353					
		3	341					
4	1	1	405	308	405	371	335	
		2	367					
		3	341					
	2	1	314					
		2	329					
		3	318					
	3	1	308					
		2	323					
		3	313					
5	1	1	370	315	370	346	327	
		2	342					
		3	327					
	2	1	316					
		2	320					
		3	316					
	3	1	315					
		2	315					
		3	321					
6	1	1	364	316	373	367	336	
		2	363					
		3	373					
	2	1	321					
		2	324					
		3	326					
	3	1	316					
		2	321					
		3	319					


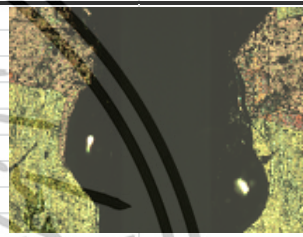
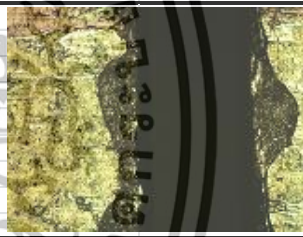
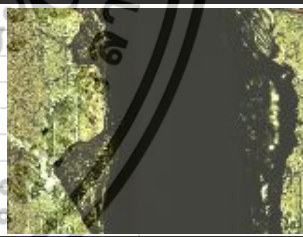

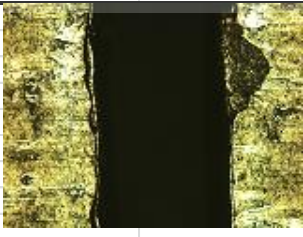
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	รอยตัดที่ (Line)	No (1 to 9)	Lower kerf width (μm)				Average per line	Average per Sample	Picture
			Data	min	max				
7	1	1	363	269	363	336	300		
		2	325						
		3	320						
	2	1	295			288			
		2	281						
		3	289						
	3	1	284			277			
		2	269						
		3	277						
8	1	1	313	279	327	311	298		
		2	327						
		3	293						
	2	1	308			299			
		2	290						
		3	300						
	3	1	291			284			
		2	279						
		3	282						
9	1	1	295	295	342	309	315		
		2	310						
		3	321						
	2	1	323			310			
		2	300						
		3	306						
	3	1	342			326			
		2	311						
		3	324						
10	1	1	348	310	355	349	337		
		2	355						
		3	344						
	2	1	310			327			
		2	336						
		3	336						
	3	1	340			335			
		2	322						
		3	342						
11	1	1	334	321	346	340	337		
		2	341						
		3	346						
	2	1	321			331			
		2	335						
		3	336						
	3	1	340			339			
		2	342						
		3	334						
12	1	1	373	312	373	366	348		
		2	360						
		3	366						
	2	1	339			352			
		2	345						
		3	371						
	3	1	312			327			
		2	324						
		3	346						
13	1	1	363	335	363	352	344		
		2	349						
		3	343						
	2	1	335			340			
		2	341						
		3	343						
	3	1	336			342			
		2	344						
		3	345						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	รอยตัดที่ (Line)	No (1 to 9)	Lower kerf width (μm)				Average per line	Average per Sample	Picture
			Data	min	max				
14	1	1	341	304	344	340	332		
		2	344						
		3	335						
	2	1	329						
		2	338						
		3	330						
	3	1	304						
		2	323						
		3	342						
15	1	1	372	300	372	352	332		
		2	339						
		3	344						
	2	1	300						
		2	338						
		3	317						
	3	1	338						
		2	316						
		3	328						
16	1	1	284	284	356	329	328		
		2	356						
		3	347						
	2	1	319						
		2	309						
		3	340						
	3	1	307						
		2	336						
		3	354						
17	1	1	380	303	380	344	335		
		2	331						
		3	320						
	2	1	326						
		2	303						
		3	317						
	3	1	354						
		2	355						
		3	329						
18	1	1	408	315	408	376	344		
		2	371						
		3	350						
	2	1	315						
		2	323						
		3	342						
	3	1	327						
		2	328						
		3	331						
19	1	1	339	339	368	353	356		
		2	357						
		3	362						
	2	1	342						
		2	352						
		3	361						
	3	1	368						
		2	359						
		3	364						
20	1	1	314	314	354	325	333		
		2	322						
		3	340						
	2	1	322						
		2	334						
		3	336						
	3	1	354						
		2	339						
		3	334						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	รอยตัดที่ (Line)	No (1 to 9)	Lower kerf width (μm)				Picture	
			Data	min	max	Average per line		Average per Sample
21	1	1	363	327	363	355	348	
		2	362					
		3	341					
	2	1	343			344		
		2	363					
		3	327					
	3	1	360			344		
		2	342					
		3	330					
22	1	1	345	340	371	354	355	
		2	355					
		3	361					
	2	1	340			354		
		2	359					
		3	364					
	3	1	348			356		
		2	371					
		3	350					
23	1	1	349	334	371	360	355	
		2	361					
		3	371					
	2	1	334			350		
		2	350					
		3	367					
	3	1	336			353		
		2	363					
		3	361					
24	1	1	330	320	347	331	332	
		2	343					
		3	320					
	2	1	329			324		
		2	322					
		3	322					
	3	1	344			341		
		2	347					
		3	331					
25	1	1	399	339	399	370	358	
		2	344					
		3	367					
	2	1	343			358		
		2	361					
		3	371					
	3	1	357			346		
		2	339					
		3	343					
26	1	1	374	328	377	365	355	
		2	372					
		3	350					
	2	1	328			340		
		2	341					
		3	350					
	3	1	343			360		
		2	360					
		3	377					
27	1	1	299	299	378	329	344	
		2	332					
		3	355					
	2	1	339			339		
		2	343					
		3	336					
	3	1	378			363		
		2	364					
		3	348					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

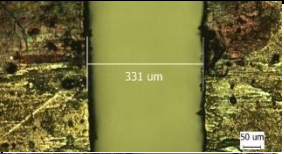
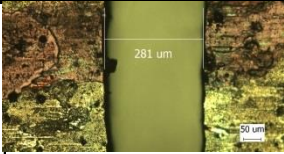
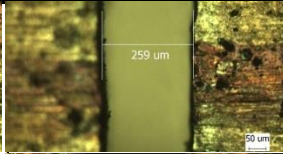





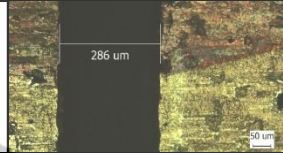




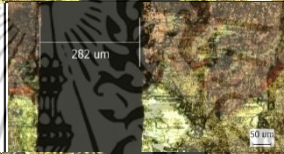







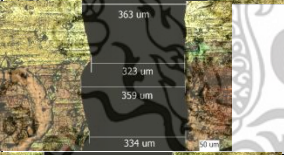

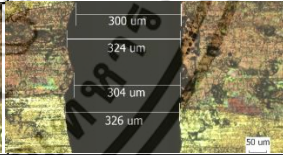
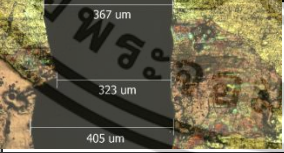



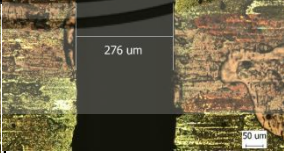


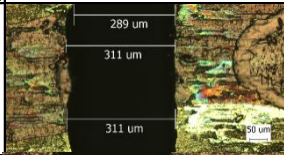
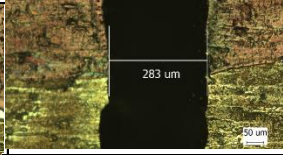
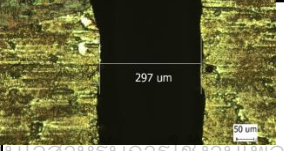
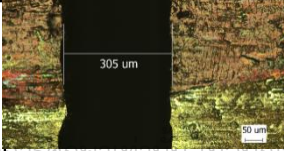

ภาคผนวก ง

รูปถ่ายจากการวัดความกว้างรอยตัด

Measured Report (Upper Kerf Width)				
Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
1	1			
	2			
	3			
2	1			
	2			
	3			
3	1			
	2			
	3			
4	1			
				
	2			
				
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
5	1			
	2			
	3			
6	1			
	2			
	3			
7	1			
	2			
	3			
8	1			
	2			
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
9	1			
	2			
	3			
10	1			
	2			
	3			
11	1			
	2			
	3			
12	1			
	2			
	3			

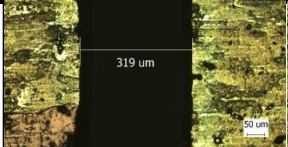
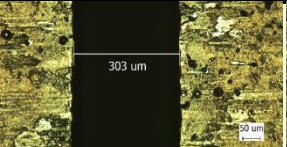
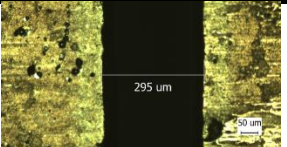


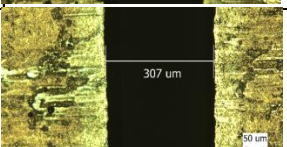


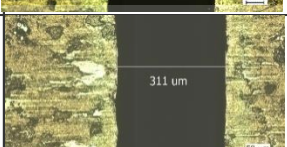




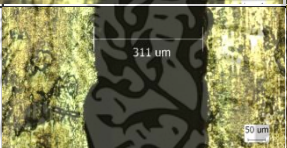

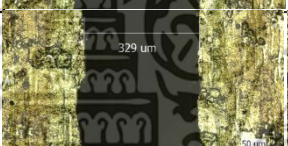














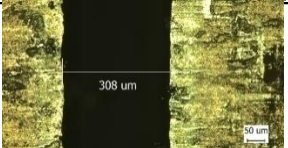





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
13	1			
	2			
	3			
14	1			
	2			
	3			
15	1			
	2			
	3			
16	1			
	2			
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
17	1	364 um	296 um	339 um
	2	344 um	342 um 321 um 307 um	371 um 344 um
	3	358 um 327 um 314 um	351 um 336 um 311 um	325 um 318 um 358 um 343 um
18	1	383 um	301 um	278 um
	2	354 um	307 um	294 um
	3	331 um	303 um	293 um 328 um 306 um
19	1	310 um	307 um	333 um
	2	320 um	323 um	331 um
	3	339 um	344 um	336 um
20	1	302 um	309 um	315 um
	2	319 um	317 um	324 um
	3	334 um	328 um	321 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
21	1			
	2			
	3			
22	1			
	2			
	3			
23	1			
	2			
	3			
24	1			
	2			
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
25	1	335 um	297 um	319 um
		406 um	357 um	352 um
		367 um	325 um	329 um
	2	324 um	317 um	371 um
		393 um	375 um	345 um
		361 um	356 um	318 um
	3	322 um	321 um	386 um
		371 um	312 um	369 um
		340 um	397 um	334 um
26	1	404 um	289 um	331 um
		384 um		
		359 um		
	2	342 um	301 um	328 um
	3	343 um	326 um	340 um
				322 um
				393 um
27	1	302 um	304 um	326 um
	2	319 um	305 um	325 um
	3	329 um	326 um	331 um

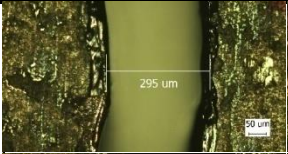
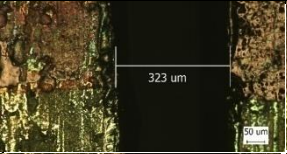
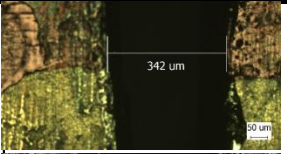

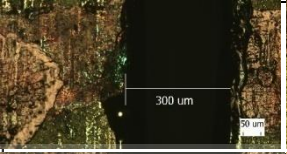
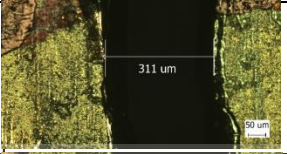


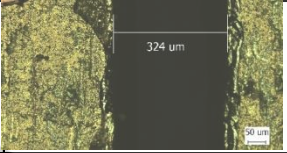

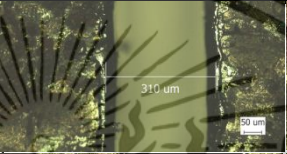







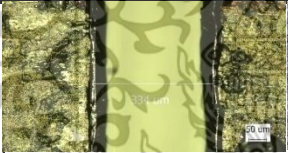


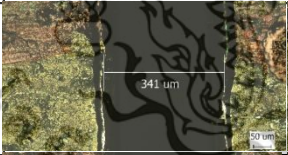










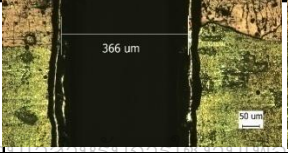
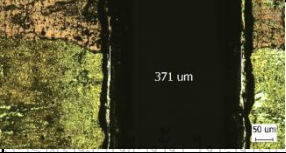
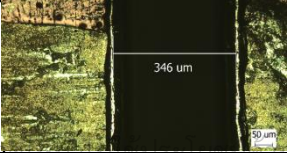
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measured Report (Lower Kerf Width)							
Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3			
1	1	362 um	347 um	344 um			
	2	358 um	343 um	342 um			
	3	346 um	343 um	336 um			
2	1	322 um	330 um	365 um			
	2	318 um	325 um	351 um			
	3	329 um	323 um	337 um			
3	1	388 um	339 um	383 um			
	2	371 um	346 um	353 um			
	3	349 um	345 um	341 um			
4	1	405 um	314 um	308 um			
	2	367 um	329 um	323 um			
	3	341 um	318 um	313 um			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
5	1			
	2			
	3			
6	1			
	2			
	3			
7	1			
	2			
	3			
8	1			
	2			
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
9	1			
	2			
	3			
10	1			
	2			
	3			
11	1			
	2			
	3			
12	1			
	2			
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และผู้ดูแลระบบสารสนเทศในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
13	1	 363 μm	 335 μm	 336 μm
	2	 349 μm	 341 μm	 344 μm
	3	 343 μm	 343 μm	 345 μm
14	1	 341 μm	 329 μm	 304 μm
	2	 344 μm	 336 μm	 323 μm
	3	 335 μm	 330 μm	 342 μm
15	1	 372 μm	 300 μm	 338 μm
	2	 339 μm	 338 μm	 316 μm
	3	 344 μm	 317 μm	 328 μm
16	1	 284 μm	 284 μm	 307 μm
	2	 356 μm	 309 μm	 336 μm
	3	 347 μm	 340 μm	 354 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และผู้ดูแลสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้ การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
17	1			
	2			
	3			
18	1			
	2			
	3			
19	1			
	2			
	3			
20	1			
	2			
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และผู้จัดทำเอกสารนี้เพื่อใช้ในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
21	1			
	2			
	3			
22	1			
	2			
	3			
23	1			
	2			
	3			
24	1			
	2			
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	Position	Line 1	Line 2	Line 3
25	1			
	2			
	3			
26	1			
	2			
	3			
27	1			
	2			
	3			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ค่าความหยาบผิวในรอยตัดที่ได้จากการทดลอง

Sample	No 1-12	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Agv Rz (μm)	Agv Ra (μm)
1	1	2.637	3.302	13.646	13.331	2.584
	2	1.935	2.228	8.373		
	3	1.995	2.621	11.154		
	4	2.061	2.743	12.854		
	5	3.248	4.062	15.710		
	6	3.430	4.210	17.054		
	7	2.620	3.321	13.901		
	8	3.001	3.949	16.383		
	9	1.661	2.134	9.944		
	10	2.566	3.115	12.735		
	11	3.592	4.270	15.747		
	12	2.265	2.932	12.471		
2	1	2.388	2.967	11.365	10.012	1.990
	2	1.822	2.380	10.421		
	3	2.125	2.625	11.126		
	4	1.593	1.892	6.725		
	5	2.028	2.501	9.827		
	6	1.457	1.800	7.258		
	7	1.737	2.201	10.308		
	8	2.048	2.524	10.577		
	9	2.239	2.736	10.033		
	10	2.421	3.116	13.429		
	11	2.512	3.030	12.306		
	12	1.509	1.810	6.771		
3	1	2.220	2.720	9.918	10.079	2.205
	2	3.642	4.265	14.935		
	3	1.621	1.937	7.839		
	4	1.993	2.558	9.990		
	5	2.901	3.512	12.087		
	6	2.326	2.645	9.028		
	7	2.387	2.867	12.412		
	8	2.182	2.597	10.159		
	9	1.701	2.095	7.906		
	10	1.614	2.035	7.002		
	11	1.612	1.945	7.515		
	12	2.256	2.789	12.161		
4	1	2.274	2.898	11.904	12.649	2.445
	2	4.057	5.107	20.535		
	3	1.904	2.354	9.930		
	4	1.529	1.846	7.505		
	5	3.032	3.901	15.970		
	6	3.657	4.500	18.184		
	7	2.282	2.735	9.908		
	8	1.167	1.545	6.746		
	9	2.536	3.034	11.552		
	10	2.727	3.411	15.025		
	11	2.255	2.777	11.875		
	12	1.925	2.359	10.477		
5	1	2.457	2.960	10.699	10.519	2.047
	2	1.854	2.275	9.593		
	3	1.649	2.078	9.703		
	4	1.773	2.141	8.293		
	5	2.585	3.191	12.413		
	6	2.283	3.015	13.685		
	7	1.779	2.246	10.916		
	8	2.013	2.607	12.215		
	9	1.972	2.387	8.967		
	10	2.137	2.566	9.303		
	11	1.950	2.380	10.335		
	12	2.107	2.565	10.100		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	No 1-12	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Agv Rz (μm)	Agv Ra (μm)
6	1	1.996	2.441	9.430	9.858	1.938
	2	2.021	2.545	12.982		
	3	2.122	2.508	10.020		
	4	1.595	1.912	8.272		
	5	1.491	1.979	8.375		
	6	2.344	2.782	9.894		
	7	1.858	2.294	9.886		
	8	1.795	2.221	10.007		
	9	2.571	3.007	10.402		
	10	2.213	2.777	11.713		
	11	1.839	2.220	9.261		
	12	1.412	1.764	8.053		
7	1	6.937	8.658	35.754	20.059	4.310
	2	13.316	15.377	51.858		
	3	2.758	3.256	13.249		
	4	3.042	3.895	16.119		
	5	3.224	3.856	14.314		
	6	6.000	6.971	26.589		
	7	1.730	2.137	8.784		
	8	3.106	3.826	16.555		
	9	2.330	2.987	12.392		
	10	5.296	6.185	22.465		
	11	1.969	2.499	10.395		
	12	2.006	2.534	12.237		
8	1	3.308	3.843	14.208	13.016	2.604
	2	2.898	3.546	14.851		
	3	2.246	2.773	10.766		
	4	2.334	2.865	12.639		
	5	1.977	2.542	11.540		
	6	2.848	3.616	15.971		
	7	1.858	2.311	9.898		
	8	2.881	3.382	12.998		
	9	1.996	2.393	8.844		
	10	3.812	4.612	19.113		
	11	2.102	2.524	10.301		
	12	2.988	3.634	15.067		
9	1	1.494	1.853	7.673	10.132	2.013
	2	2.337	2.816	11.051		
	3	1.681	1.988	7.906		
	4	2.831	3.406	13.901		
	5	1.773	2.079	7.937		
	6	2.216	2.712	10.974		
	7	1.710	2.160	9.289		
	8	1.632	2.018	9.952		
	9	2.238	2.703	10.503		
	10	2.398	2.853	11.755		
	11	1.791	2.242	9.198		
	12	2.052	2.602	11.450		
10	1	1.998	2.388	9.022	10.418	2.057
	2	2.547	3.113	12.750		
	3	1.901	2.449	11.003		
	4	1.967	2.518	10.680		
	5	2.729	3.472	15.031		
	6	1.765	2.188	8.019		
	7	2.157	2.598	10.343		
	8	1.824	2.352	11.172		
	9	2.054	2.335	7.569		
	10	0.943	1.190	5.170		
	11	1.953	2.315	9.708		
	12	2.847	3.520	14.546		
11	1	2.035	2.397	8.598	8.174	1.701
	2	1.596	2.062	7.656		
	3	1.520	1.851	6.851		
	4	1.738	2.206	9.560		
	5	1.533	1.890	6.721		
	6	1.478	1.743	5.978		
	7	1.792	2.283	9.853		
	8	2.147	2.744	11.278		
	9	2.059	2.553	10.226		
	10	1.539	1.829	6.918		
	11	1.478	1.763	6.463		
	12	1.497	1.845	7.983		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ไม่มีเหตุขัดแย้งกัน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

Sample	No 1-12	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Agv Rz (μm)	Agv Ra (μm)
18	1	2.547	3.031	11.244	10.670	2.341
	2	2.998	3.642	14.601		
	3	2.281	2.680	9.454		
	4	1.743	2.058	7.825		
	5	2.331	2.791	9.639		
	6	2.841	3.709	12.895		
	7	2.306	2.786	10.504		
	8	1.489	1.804	6.967		
	9	2.499	2.967	10.884		
	10	2.556	3.136	12.569		
	11	1.913	2.219	8.084		
	12	2.583	3.225	13.376		
19	1	2.621	3.189	11.812	10.865	2.173
	2	2.337	2.985	12.500		
	3	1.560	1.834	7.265		
	4	3.169	3.883	15.039		
	5	1.943	2.480	9.986		
	6	1.881	2.282	9.719		
	7	2.419	2.903	11.200		
	8	1.989	2.691	11.809		
	9	1.886	2.306	8.377		
	10	2.304	2.852	11.011		
	11	1.843	2.510	11.563		
	12	2.122	2.524	10.104		
20	1	1.817	2.178	8.185	8.371	1.736
	2	1.420	1.720	6.623		
	3	1.823	2.229	9.411		
	4	2.069	2.589	11.123		
	5	1.898	2.313	8.777		
	6	1.904	2.246	8.411		
	7	1.736	1.996	7.773		
	8	1.306	1.645	7.198		
	9	2.167	2.521	8.689		
	10	1.232	1.477	5.884		
	11	1.986	2.423	10.142		
	12	1.470	1.851	8.237		
21	1	1.957	2.420	8.474	9.286	1.882
	2	1.780	2.307	8.269		
	3	1.803	2.311	9.753		
	4	2.069	2.539	10.868		
	5	2.122	2.601	9.944		
	6	1.454	1.840	7.486		
	7	1.668	2.005	8.491		
	8	1.320	1.639	7.305		
	9	2.104	2.536	9.442		
	10	2.220	2.722	10.215		
	11	2.073	2.557	10.392		
	12	2.013	2.493	10.795		
22	1	2.116	2.611	10.078	15.108	3.113
	2	4.760	6.086	26.027		
	3	1.671	2.074	7.693		
	4	1.855	2.349	10.688		
	5	3.091	3.781	14.426		
	6	5.088	5.999	22.513		
	7	1.910	2.434	11.421		
	8	2.010	2.487	10.582		
	9	3.464	4.353	17.178		
	10	7.456	8.602	30.787		
	11	2.038	2.554	9.521		
	12	1.902	2.334	10.382		
23	1	2.101	2.517	9.298	9.152	1.939
	2	2.348	2.851	11.503		
	3	1.959	2.278	8.427		
	4	2.010	2.702	10.604		
	5	2.090	2.526	9.452		
	6	2.230	2.680	9.869		
	7	1.831	2.244	8.416		
	8	1.508	1.813	7.167		
	9	1.289	1.566	6.055		
	10	2.568	3.135	11.424		
	11	1.773	2.180	9.061		
	12	1.558	2.005	8.551		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่านำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปตัดต่อ แก้ไข หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางโรงเรียนเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	No 1-12	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Agv Rz (μm)	Agv Ra (μm)
24	1	1.626	1.870	6.489	8.517	1.792
	2	1.558	1.864	6.766		
	3	1.917	2.382	10.876		
	4	1.469	1.774	6.796		
	5	1.858	2.236	8.749		
	6	1.522	1.879	6.708		
	7	1.744	2.154	8.381		
	8	1.601	1.879	6.803		
	9	2.183	2.772	10.165		
	10	2.564	3.239	13.162		
	11	1.557	1.951	7.672		
	12	1.903	2.386	9.635		
25	1	7.510	9.598	35.855	32.085	7.359
	2	14.843	17.286	61.689		
	3	3.884	4.864	18.666		
	4	6.382	7.843	29.532		
	5	4.331	5.260	20.662		
	6	11.420	13.492	44.938		
	7	4.416	5.449	21.490		
	8	5.488	6.726	27.590		
	9	6.099	7.174	27.408		
	10	14.582	16.940	56.951		
	11	3.798	4.516	17.542		
	12	5.551	6.959	22.695		
26	1	4.846	5.954	25.114	20.513	4.479
	2	3.409	4.580	20.828		
	3	3.407	4.204	14.340		
	4	5.149	6.216	18.181		
	5	3.740	4.687	18.022		
	6	7.687	9.151	33.634		
	7	4.387	5.230	18.325		
	8	2.967	3.782	14.907		
	9	3.226	3.818	13.429		
	10	6.161	7.724	29.491		
	11	3.669	4.439	17.825		
	12	5.101	6.203	22.054		
27	1	2.057	2.536	10.801	9.587	2.048
	2	2.373	2.896	10.888		
	3	1.606	1.997	8.538		
	4	2.087	2.515	9.621		
	5	1.669	2.050	7.867		
	6	2.912	3.486	12.102		
	7	1.677	2.013	7.248		
	8	2.034	2.491	9.177		
	9	2.257	2.718	10.443		
	10	2.117	2.686	10.570		
	11	2.239	2.742	10.279		
	12	1.551	1.884	7.514		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
ผลการทดลองทั้งหมด

Sample	Laser power (W)	Gas pressure (MPa)	Cutting speed (mm/min)	Upper kerf width (μm)			Lower kerf width (μm)				Avg. Kerf (Lower,Upper)	Avg Roughness Rz (μm)	Avg Roughness Ra (μm)	
				line 1-3	Min.	Max.	Avg Upper Kerf	line 1-3	Min.	Max.				Avg Lower Kerf
1	2000	0.07	3100	307	301	310	306	355	341	355	347	327	13.3	2.6
				301				344						
				310				341						
2	2000	0.07	3400	292	292	303	297	323	323	351	333	315	10.0	2.0
				297				326						
				303				351						
3	2000	0.07	3700	335	287	335	315	369	343	369	357	336	10.1	2.2
				287				343						
				322				359						
4	2000	0.12	3100	351	287	351	313	371	315	371	335	324	12.6	2.4
				301				320						
				287				315						
5	2000	0.12	3400	316	277	316	294	346	317	346	327	310	10.5	2.0
				289				317						
				277				317						
6	2000	0.12	3700	329	274	329	294	367	319	367	336	315	9.9	1.9
				280				324						
				274				319						
7	2000	0.17	3100	349	310	349	324	336	277	336	300	312	20.1	4.3
				313				288						
				310				277						
8	2000	0.17	3400	311	284	311	297	311	284	311	298	297	13.0	2.6
				295				299						
				284				284						
9	2000	0.17	3700	288	288	300	292	309	309	326	315	303	10.1	2.0
				289				310						
				300				326						
10	2200	0.07	3100	330	299	330	310	349	327	349	337	323	10.4	2.1
				299				327						
				299				335						
11	2200	0.07	3400	326	309	326	318	340	331	340	337	327	8.2	1.7
				309				331						
				318				339						
12	2200	0.07	3700	321	296	321	309	366	327	366	348	329	9.2	2.0
				311				352						
				296				327						
13	2200	0.12	3100	346	320	346	329	352	340	352	344	337	13.9	2.7
				320				340						
				322				342						
14	2200	0.12	3400	312	296	312	302	342	323	340	332	317	9.7	2.1
				296				332						
				296				323						
15	2200	0.12	3700	336	298	336	317	352	318	352	332	325	9.3	1.9
				298				318						
				315				327						
16	2200	0.17	3100	388	319	388	343	329	323	332	328	336	28.1	6.6
				319				323						
				322				332						
17	2200	0.17	3400	347	317	347	335	344	315	346	335	335	13.6	2.7
				317				315						
				342				346						
18	2200	0.17	3700	356	295	356	318	376	327	376	344	331	10.7	2.3
				304				327						
				295				329						
19	2400	0.07	3100	323	323	333	327	353	352	364	356	342	10.9	2.2
				325				352						
				333				364						
20	2400	0.07	3400	318	318	320	319	331	325	342	333	326	8.4	1.7
				318				331						
				320				342						
21	2400	0.07	3700	318	304	318	311	355	344	355	348	330	9.3	1.9
				311				344						
				304				344						
22	2400	0.12	3100	331	327	333	330	354	354	356	355	342	15.1	3.1
				327				354						
				333				356						
23	2400	0.12	3400	315	299	320	311	360	350	360	355	333	9.2	1.9
				299				350						
				320				353						
24	2400	0.12	3700	307	307	320	313	331	324	341	332	322	8.5	1.8
				311				324						
				320				341						
25	2400	0.17	3100	357	339	357	348	370	346	370	358	353	32.1	7.4
				339				358						
				347				346						
26	2400	0.17	3400	356	305	356	333	365	340	365	355	344	20.5	4.5
				305				340						
				337				360						
27	2400	0.17	3700	317	312	327	319	329	329	363	344	331	9.6	2.0
				312				339						
				327				363						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานวิทยบริการเทคโนโลยีสารสนเทศฯ ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางฯ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์ความถดถอยจากโปรแกรม SPSS

ข.1 ผลการวิเคราะห์ความถดถอยในกรณีของความกว้างรอยตัด

Descriptive Statistics

	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Laser power (W)	27	2000	2400	2200.00	166.410
Gas pressure (MPa)	27	.07	.17	.1200	.04160
Cutting speed (mm/min)	27	3100	3700	3400.00	249.615
Valid N (listwise)	27				

Correlations

		Gas pressure (MPa)	Cutting speed (mm/min)
Laser power (W)	Pearson Correlation	1	.000
	Sig. (2-tailed)	1.000	1.000
	N	27	27
Gas pressure (MPa)	Pearson Correlation	.000	.000
	Sig. (2-tailed)	1.000	1.000
	N	27	27
Cutting speed (mm/min)	Pearson Correlation	.000	1
	Sig. (2-tailed)	1.000	1.000
	N	27	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Cutting speed (mm/min), Gas pressure (MPa), Laser power (W) ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: kerfwidth

b. All requested variables entered.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.717 ^a	.515	.451	9.3884

a. Predictors: (Constant), Cutting speed (mm/min), Gas pressure (MPa), Laser power (W)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2149.703	3	716.568	8.130	.001 ^b
	Residual	2027.299	23	88.143		
	Total	4177.002	26			

a. Dependent Variable: kerfwidth

b. Predictors: (Constant), Cutting speed (mm/min), Gas pressure (MPa), Laser power (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized	t
		B	Std. Error	Coefficients	
		Beta			
1	(Constant)	263.229	35.397		7.436
	Laser power (W)	.051	.011	.664	4.572
	Gas pressure (MPa)	-12.160	44.258	-.040	-.275
	Cutting speed (mm/min)	-.014	.007	-.268	-1.847

Model		Sig.
1	(Constant)	.000
	Laser power (W)	.000
	Gas pressure (MPa)	.786
	Cutting speed (mm/min)	.078

a. Dependent Variable: kerfwidth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช.2 ผลการวิเคราะห์ความถดถอยในกรณีของความหยาบผิวในรอยตัด

Descriptive Statistics

	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Laser power (W)	27	2000	2400	2200.00	166.410
Gas pressure (MPa)	27	.07	.17	.1200	.04160
Cutting speed (mm/min)	27	3100	3700	3400.00	249.615
Valid N (listwise)	27				

Correlations

		Laser power (W)	Gas pressure (MPa)	Cutting speed (mm/min)
Laser power (W)	Pearson Correlation	1	.000	.000
	Sig. (2-tailed)		1.000	1.000
	N	27	27	27
Gas pressure (MPa)	Pearson Correlation	.000	1	.000
	Sig. (2-tailed)	1.000		1.000
	N	27	27	27
Cutting speed (mm/min)	Pearson Correlation	.000	.000	1
	Sig. (2-tailed)	1.000	1.000	
	N	27	27	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Variables Entered/Removed^a

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Cutting speed (mm/min), Gas pressure (MPa), Laser power (W) ^b	.	Enter

a. Dependent Variable: Ra

b. All requested variables entered.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.740 ^a	.548	.489	1.011

a. Predictors: (Constant), Cutting speed (mm/min), Gas pressure (MPa), Laser power (W)

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	28.519	3	9.506	9.304	.000 ^b
	Residual	23.501	23	1.022		
	Total	52.019	26			

a. Dependent Variable: Ra

b. Predictors: (Constant), Cutting speed (mm/min), Gas pressure (MPa), Laser power (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized	t
		B	Std. Error	Coefficients	
				Beta	
1	(Constant)	7.470	3.811		1.960
	Laser power (W)	.001	.001	.143	1.023
	Gas pressure (MPa)	17.953	4.765	.528	3.768
	Cutting speed (mm/min)	-.003	.001	-.499	-3.560

Model		Sig.
1	(Constant)	.062
	Laser power (W)	.317
	Gas pressure (MPa)	.001
	Cutting speed (mm/min)	.002

a. Dependent Variable: Ra

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากโปรแกรม SPSS

ซ.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในกรณีของความกว้างรอยตัด

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างกำลังของเลเซอร์กับขนาดความกว้างในรอยตัด

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
2000	9	316	11.9	4.0	306	325	297	336
2200	9	329	6.7	2.2	324	334	317	337
2400	9	336	9.9	3.3	328	343	322	353
Total	27	327	12.7	2.4	322	332	297	353

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
kerfwidth					
Between Groups	1899.855	2	949.927	10.012	.001
Within Groups	2277.147	24	94.881		
Total	4177.002	26			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: kerfwidth

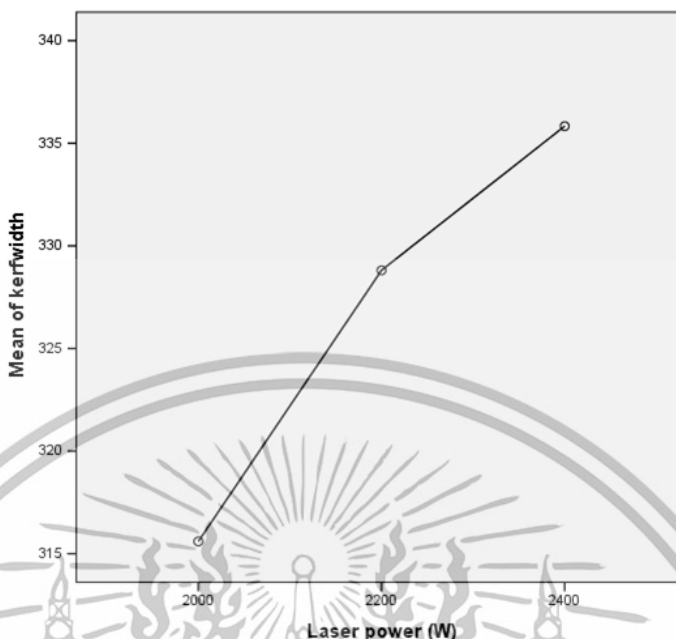
LSD

(I) Laser power (W)	(J) Laser power (W)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2000	2200	-13.2098*	4.5918	.008	-22.6869	-3.7329
	2400	-20.2346*	4.5918	.000	-29.7116	-10.7575
2200	2000	13.2099*	4.5918	.008	3.7329	22.6869
	2400	-7.0247	4.5918	.139	-16.5017	2.4523
2400	2000	20.2346*	4.5918	.000	10.7575	29.7116
	2200	7.0247	4.5918	.139	-2.4523	16.5017

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Means Plots



2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความดันแก๊สกับขนาดความกว้างในรอยตัด

Descriptives

kerfwidth	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
.07	9	328	7.4	2.5	322	334	315	342
.12	9	325	10.6	3.5	317	333	310	342
.17	9	327	18.7	6.2	313	341	297.	353.
Total	27	327	12.7	2.4	322	332	297	353

ANOVA

kerfwidth	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	46.124	2	23.062	.134	.875
Within Groups	4130.878	24	172.120		
Total	4177.002	26			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Post Hoc Tests

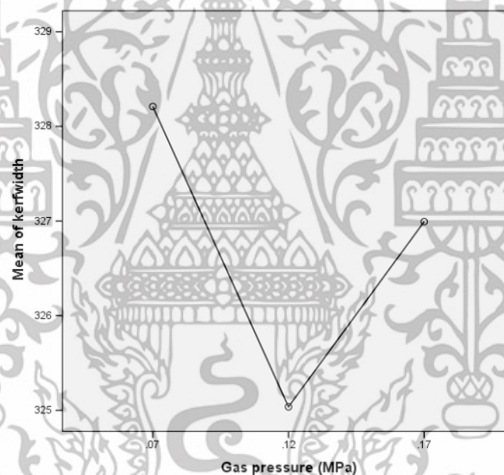
Multiple Comparisons

Dependent Variable: kerfwidth

LSD

(I) Gas pressure (MPa)	(J) Gas pressure (MPa)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Bound	
					Lower Bound	Upper Bound
.07	.12	3.1728	6.1846	.613	-9.5915	15.9372
	.17	1.216	6.1846	.846	-11.5483	13.9804
.12	.07	-3.1728	6.1846	.613	-15.9372	9.5915
	.17	-1.9568	6.1846	.754	-14.7211	10.8075
.17	.07	-1.2160	6.1846	.846	-13.9804	11.5483
	.12	1.9568	6.1846	.754	-10.8075	14.7211

Means Plots



3. การวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเร็วตัดกับขนาดความกว้างในรอยตัด

Descriptives

kerfwidth	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
					3100	9		
3400	9	328	14.3	4.8	312	334	297	344
3700	9	325	10.0	3.3	317	332	303	336
Total	27	327	12.7	2.4	322	332	297	353

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANOVA

kerfwidth

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	520.597	2	260.299	1.709	.202
Within Groups	3656.405	24	152.350		
Total	4177.002	26			

Post Hoc Tests

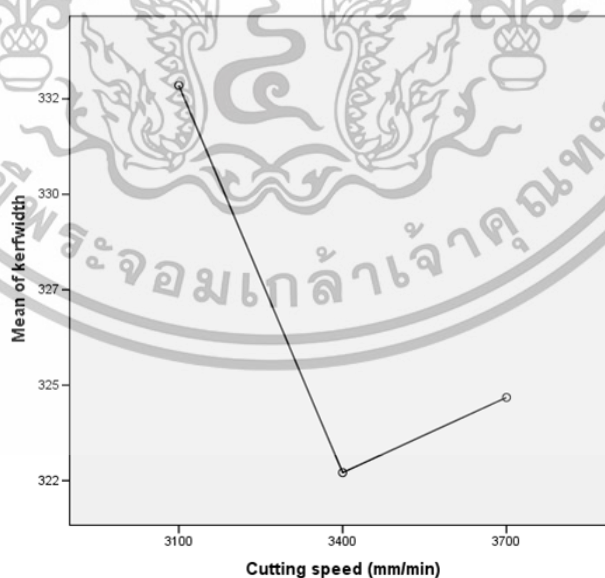
Multiple Comparisons

Dependent Variable: kerfwidth

LSD

(I) Cutting speed (mm/min)	(J) Cutting speed (mm/min)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
3100	3400	10.1419	5.8185	.094	-1.8669	22.1508
	3700	8.1728	5.8186	.173	-3.8361	20.1817
3400	3100	-10.1420	5.8186	.094	-22.15089	1.8669
	3700	-1.9691	5.8186	.738	-13.9780	10.0398
3700	3100	-8.1728	5.8186	.173	-20.1817	3.8361
	3400	1.9691	5.8186	.738	-10.0398	13.9780

Means Plots



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในกรณีของความหยาบในรอยตัด

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างกำลังของเลเซอร์กับความหยาบในรอยตัด

Descriptives

Ra	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
2000	9	2.5	.7	.2	1.9	3.0	1.9	4.3
2200	9	2.7	1.5	.5	1.5	3.8	1.7	6.6
2400	9	2.9	1.7	.6	1.5	4.4	1.7	7.4
Total	27	2.7	1.4	.3	2.18	3.3	1.7	7.4

ANOVA

Ra	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1.074	2	.537	.253	.779
Within Groups	50.946	24	2.123		
Total	52.019	26			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

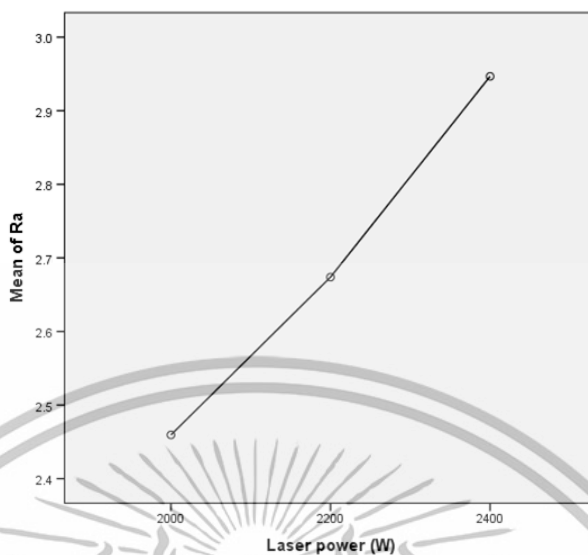
Dependent Variable: Ra

LSD

(I) Laser power (W)	(J) Laser power (W)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2000	2200	-.2144	.6868	.758	-1.6320	1.2031
	2400	-.4873	.6868	.485	-1.9048	.9303
2200	2000	.2144	.6868	.758	-1.2031	1.6320
	2400	-.2728	.6868	.695	-1.6904	1.1447
2400	2000	.4873	.6868	.485	-.9303	1.9048
	2200	.2728	.6868	.695	-1.1447	1.6904

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Means Plots



2. การวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความดันแก๊สกับความหยาบในรอยตัด

Descriptives

Ra	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
.07	9	2.0	.3	.1	1.8	2.2	1.7	2.6
.12	9	2.2	.4	.1	1.9	2.6	1.8	3.1
.17	9	3.8	2.0	.7	2.3	5.4	2.0	7.4
Total	27	2.7	1.4	.3	2.1	3.3	1.7	7.4

ANOVA

Ra	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	17.503	2	8.752	6.085	.007
Within Groups	34.516	24	1.438		
Total	52.019	26			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

Dependent Variable: Ra

LSD

(I) Gas pressure (MPa)	(J) Gas pressure (MPa)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
.07	.12	-.1907	.5653	.739	-1.3575	.9761
	.17	-1.7953*	.5653	.004	-2.9621	-.6286
.12	.07	.1907	.5653	.739	-.9761	1.3575
	.17	-1.6046*	.5653	.009	-2.7714	-.4378
.17	.07	1.7953*	.5653	.004	.6286	2.9621
	.12	1.6046*	.5653	.009	.4378	2.7714

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Means Plots



3. การวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเร็วตัดกับความหนาใบในรอยตัด

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
3100	9	3.7	2.0	.7	2.2	5.2	2.1	7.4
3400	9	2.4	.9	.3	1.7	3.0	1.7	4.5
3700	9	2.0	.2	.1	1.9	2.1	1.8	2.3
Total	27	2.7	1.4	.3	2.1	3.3	1.7	7.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	14.408	2	7.204	4.597	.020
Within Groups	37.612	24	1.567		
Total	52.019	26			

Post Hoc Tests

Multiple Comparisons

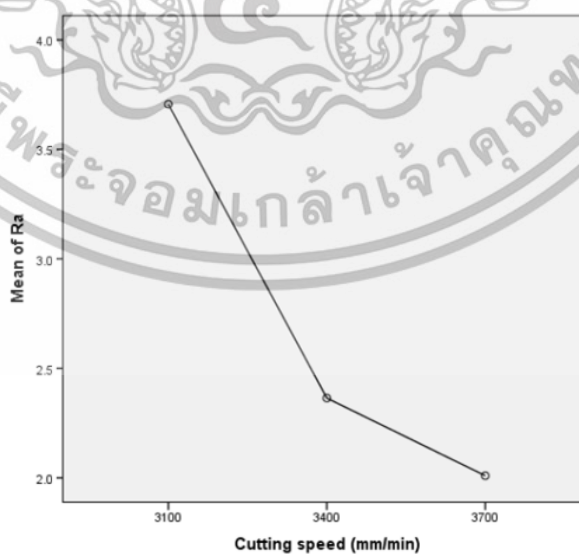
Dependent Variable: Ra

LSD

(I) Cutting speed (mm/min)	(J) Cutting speed (mm/min)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
3100	3400	1.3416*	.5901	.032	.1237	2.5596
	3700	1.6961*	.5901	.008	.4782	2.9141
3400	3100	-1.3417*	.5901	.032	-2.5596	-.12370
	3700	.3545	.5901	.554	-.8635	1.5724
3700	3100	-1.6961*	.5901	.008	-2.9141	-.4782
	3400	-.3545	.5901	.554	-1.5724	.8635

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Means Plots



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฅ

การคำนวณขนาดความกว้างรอยตัดโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

ในการคำนวณหาขนาดความกว้างรอยตัดจะใช้เหล็กเหนียวและใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ ฅ.1

ตารางที่ ฅ.1 คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กเหนียวและแก๊สออกซิเจนที่ใช้ในการคำนวณ

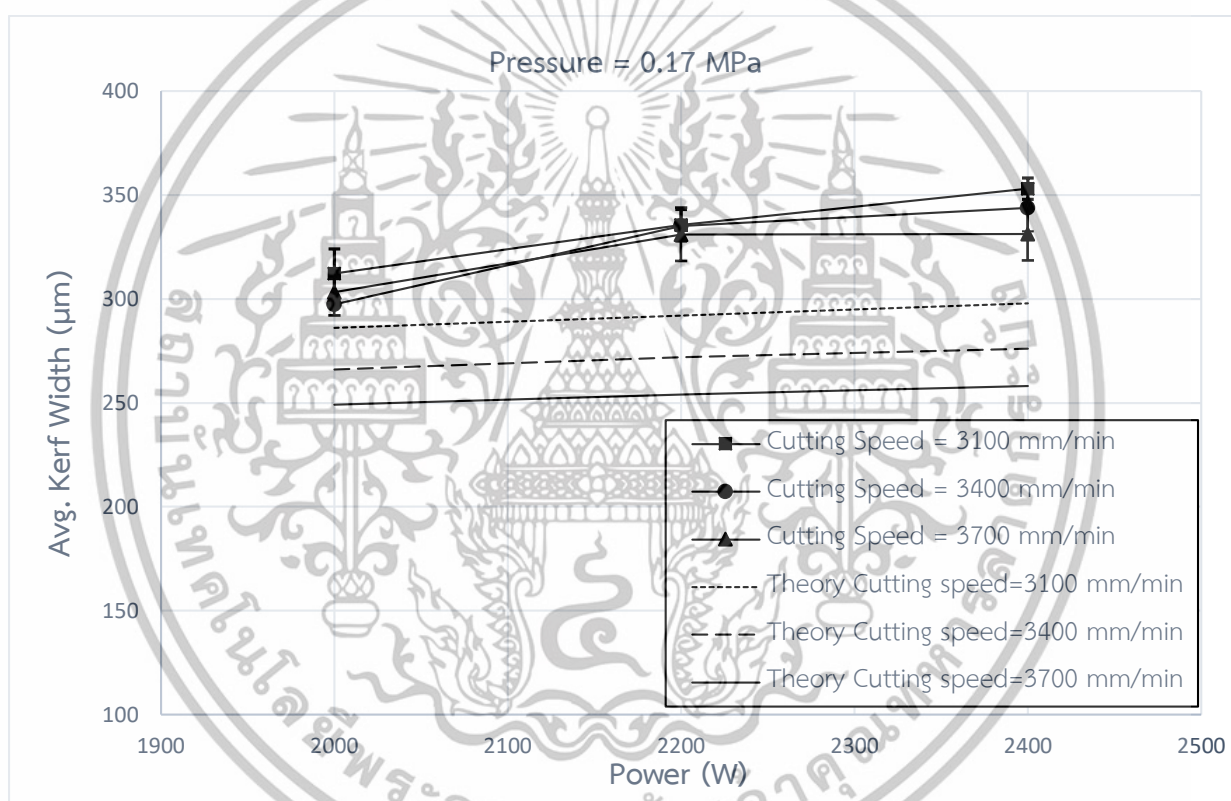
Mild steel properties	
Density of workpiece, ρ (kg/m ³)	7880
Specific heat capacity of workpiece, c_p (J/(kg K))	460
Thermal diffusivity of workpiece, α (m ² /s)	2.21×10^{-5}
Latent heat of melting, L_m (J/kg)	2.72×10^5
Latent heat of vaporization, L_v (J/kg)	6.10×10^6
Thermal conductivity of workpiece, k (W/mK)	80.3
Melting temperature, T_m (K)	1809
Boiling temperature, T_{vap} (K)	3133
Oxygen properties	
Ambient room temperature, T_0 (K)	298.15
Density of assisting gas, ρ_g (kg/m ³)	1.97
Molecular diameter, σ (Angstrom)	3.46
Fraction of pressure drop, f	0.1
Fraction of evaporation contribution, β	0.1
Energy coupling factor, A	0.5
Super heating factor in the melt front, η_u	0.02

ระยะความกว้างของรอยตัดเฉลี่ย

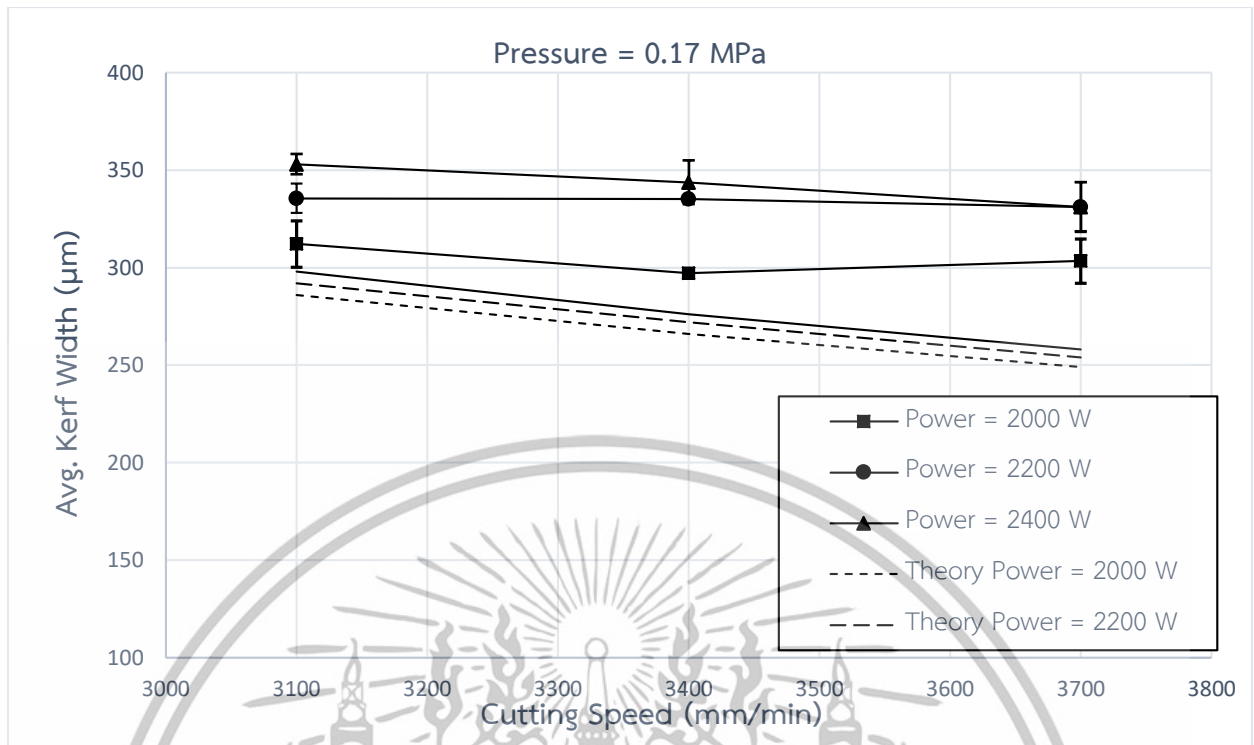
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 2.3 จากสมการที่ 2.4 เมื่อทำการแทนค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองตัดโลหะด้วยเลเซอร์ โดยผลที่ได้จากสมการที่ 4 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจะสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

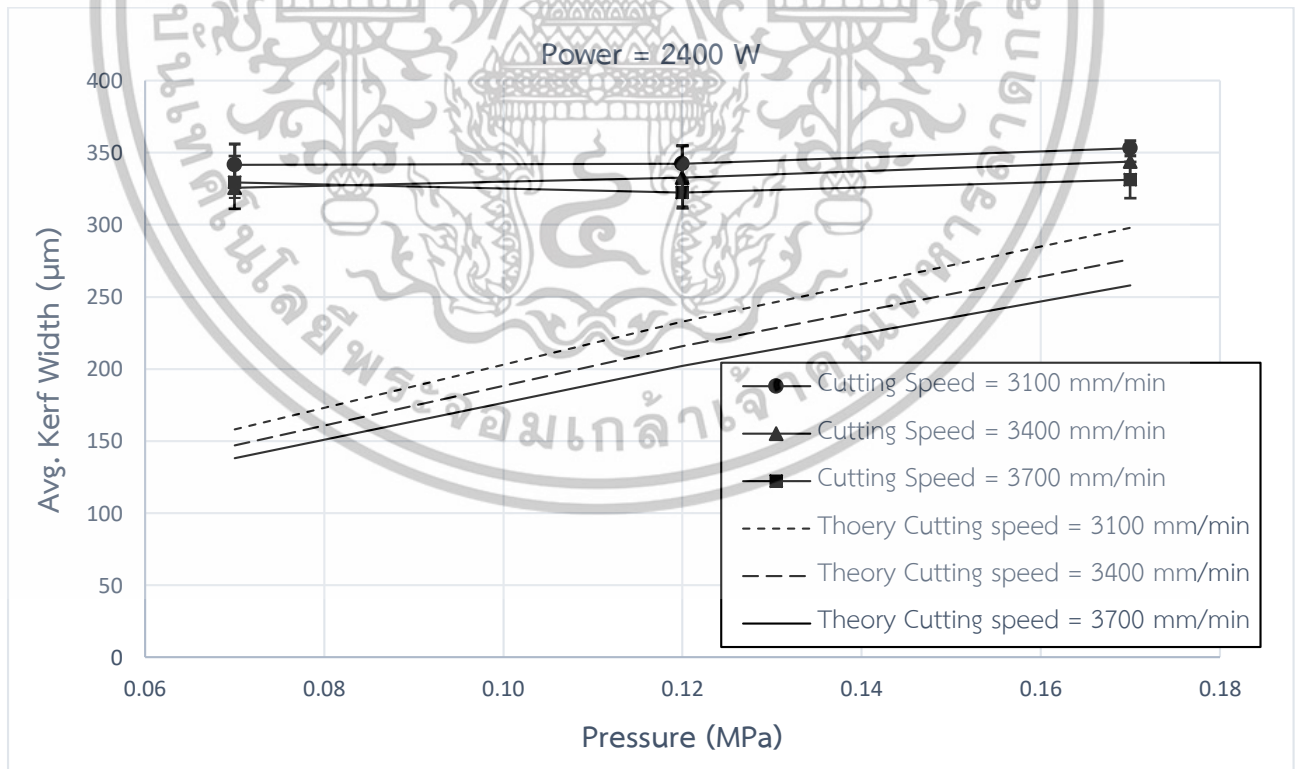
รูปที่ ๑.๑ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเลเซอร์กับความกว้างของรอยตัดในกรณีที่ความดันของแก๊สช่วยเท่ากับ 0.17 MPa โดยกำลังของเลเซอร์จะถูกปรับไว้ที่ 2000, 2200 และ 2400 W ความเร็วในการตัดเท่ากับ 3100, 3400 และ 3700 mm/min ระหว่างผลการทดลองที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ อธิบายได้ว่าระหว่างการทดลองกับการคำนวณในทางทฤษฎีมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ เมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้น ซึ่งในกรณีที่ความเร็วการตัดต่ำที่สุดเท่ากับ 3100 mm/min จะทำให้เกิดความกว้างของรอยตัดกว้างที่สุด และในกรณีที่ความเร็วการตัดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 3400 และ 3700 mm/min จะทำให้ระยะความกว้างของรอยตัดลดลงตามลำดับ ทั้งในการทดลองและในทางทฤษฎี



รูปที่ ๑.๑ การเปรียบเทียบผลของความกว้างของรอยตัดระหว่างการทดลองกับในทางทฤษฎีเนื่องจากกำลังของเลเซอร์ (ความดันของแก๊สออกซิเจน = 0.17 MPa)



รูปที่ ๓.๒ การเปรียบเทียบผลของความกว้างของรอยตัดระหว่างการทดลองกับในทางทฤษฎีเนื่องจากความเร็วการตัด (ความดันของแก๊สออกซิเจน = 0.17 MPa)



รูปที่ ๓.๓ การเปรียบเทียบผลของความกว้างของรอยตัดระหว่างการทดลองกับในทางทฤษฎีเนื่องจาก

ความดันของแก๊สออกซิเจน (กำลังของเลเซอร์ = 2400 W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ฅ.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการตัดกับความกว้างของรอยตัดในกรณีที่มีความดันของแก๊สช่วยเท่ากับ 0.17 MPa โดยค่าความเร็วในการตัดจะถูกปรับไว้ที่ 3100, 3400 และ 3700 mm/min และกำลังของเลเซอร์เท่ากับ 2000, 2200 และ 2400 W ระหว่างผลการทดลองที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ อธิบายได้ว่าระหว่างการทดลองกับการคำนวณในทางทฤษฎีนั้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยในขณะที่มีการเพิ่มขึ้นของความเร็วการตัดจะส่งผลทำให้ระยะความกว้างของรอยตัดนั้นมีความกว้างลดลง ซึ่งในกรณีที่กำลังของเลเซอร์สูงสุดเท่ากับ 2400 W จะเกิดความกว้างของรอยตัดสูงสุด และที่กำลังของเลเซอร์เท่ากับ 2200 และ 2000 W จะเกิดความกว้างของรอยตัดที่ลดลงตามลำดับ ทั้งในการทดลองและในทางทฤษฎี

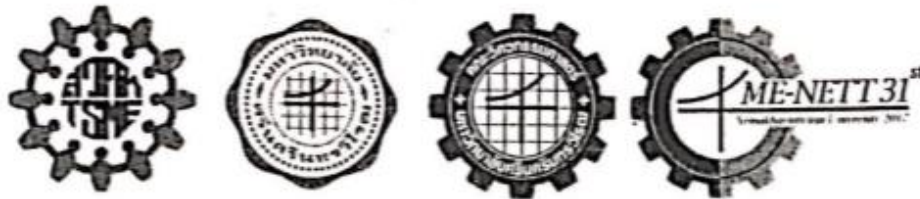
รูปที่ ฅ.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของแก๊สช่วยกับความกว้างของรอยตัดในกรณีที่กำลังของเลเซอร์เท่ากับ 2400 วัตต์ โดยความดันของแก๊สช่วยจะถูกปรับไว้ที่ 0.07, 0.12 และ 0.17 MPa และค่าความเร็วการตัดเท่ากับ 3100, 3400 และ 3700 mm/min ระหว่างผลการทดลองที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์ อธิบายได้ว่าระหว่างการทดลองกับการคำนวณในทางทฤษฎีนั้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สช่วยจะทำให้ความกว้างของรอยตัดมีขนาดที่กว้างขึ้น ซึ่งในกรณีที่ความเร็วตัดเท่ากับ 3100 mm/min จะทำให้เกิดความกว้างของรอยตัดมากที่สุด และที่ความเร็วตัดเท่ากับ 3400 และ 3700 mm/min จะเกิดความกว้างของรอยตัดที่ลดลงตามลำดับ ทั้งในการทดลองและในทางทฤษฎี โดยที่ความดันของแก๊สช่วยเท่ากับ 0.17 MPa ผลจากการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองนั้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก



ภาคผนวก ญ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Proceedings

The 31st Conference

of Mechanical Engineering Network of Thailand

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31

ระหว่างวันที่ 4 - 7 กรกฎาคม 2560

ณ โรงแรมภูเขางาม รีสอร์ท จ.นครนายก



การศึกษาการทดลองการตัดเหล็กแผ่นด้วยเลเซอร์ An experimental study of laser cut parameters on kerf quality

ธีรภัทร์ คงเจริญ¹, มธุรส สุชาตะวัฒน์^{2*}

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง แขวงลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10520

*ติดต่อ: maturose.su@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในการทดลองนี้ศึกษาถึงผลของตัวแปรการตัดต่างๆที่มีผลต่อการตัดด้วยเลเซอร์บนเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร โดยตัวแปรที่พิจารณาประกอบไปด้วย กำลังเลเซอร์ ความดันแก๊สช่วย และความเร็วในการตัด โดยทำการพิจารณาระยะความกว้างของรอยตัดและค่าความหยาบบนผิวด้านข้างของรอยตัด ในการทดลองนี้จะใช้เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์แบบคลื่นต่อเนื่อง ซึ่งให้กำลังสูงสุดอยู่ที่ 4 กิโลวัตต์ โดยในการทดลองนี้ผลที่ได้คือ เมื่อเพิ่มกำลังเลเซอร์ ความกว้างเฉลี่ยของรอยตัดจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยยังมีผลต่อค่าความหยาบของรอยตัด โดยพบว่าเมื่อความดันแก๊สช่วยเพิ่มขึ้น ความหยาบบนผิวของรอยตัดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดแคบลง และผิวของรอยตัดมีความเรียบขึ้น

คำหลัก: การตัดเลเซอร์, ความกว้างรอยตัด, ความหยาบผิว

Abstract

This paper presents an experimental study on the effects of the process parameters on laser cutting of 3 mm thick mild steel plates. The parameters investigated includes laser power, gas pressure and cutting speed. The kerf width and the cut edge roughness are examined. The laser source used is a continuous wave CO₂ laser with maximum power of 4 kW. The results show that as the laser power increases, the average kerf width increases. Oxygen gas pressure also has a remarkable effect on the cut edge roughness. It is found that as the gas pressure increases, the roughness is increased. Increasing of the cutting speed gives the narrower average kerf width and the smoother cut surface.

Keywords: Laser cutting, Kerf, Roughness

1. บทนำ

การตัดแผ่นโลหะด้วยเลเซอร์นั้นมีการใช้อย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเกี่ยวกับการบิน อุตสาหกรรมเกี่ยวกับรถยนต์ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในการตัดด้วยเลเซอร์นั้น เป็นกระบวนการตัดด้วยความร้อน ซึ่งมีข้อโดดเด่นคือ มีความแม่นยำสูง มีการเสียรูปของโลหะน้อย และให้ระยะความกว้างของรอยตัดที่แคบ สิ่งสำคัญของคุณภาพใน

รอยตัดคือความเป็นร่องหรือความหยาบบนผิวรอยตัดที่น้อยที่สุด

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับกระบวนการตัดคือ มีการศึกษาผลจากการตัดเลเซอร์บนเหล็กคาร์บอนต่ำโดยการใช้แก๊สช่วยต่างๆเช่น ออกซิเจน อาร์กอน ไนโตรเจน และฮีเลียม พบว่าการใช้แก๊สออกซิเจนจะทำให้มีคุณภาพการตัดที่ดีที่สุด [1] และ การใช้แก๊สออกซิเจนมีความสำคัญต่อขนาดความกว้างของรอยตัดอย่างมากคือ เมื่อเพิ่มกำลังของเลเซอร์และเพิ่มความดันแก๊สออกซิเจนทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดโลหะที่หลอมละลายมาก อย่างไรก็ตามความลึกของแถบริ้ว (striation depth) บนผิวของรอยตัดต่ำ [2] ในการตัดเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High stress steel) ด้วยเลเซอร์สรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มกำลังของเลเซอร์จะส่งผลให้เกิดแถบริ้วและความกว้างของรอยตัดมากขึ้น [3] ในการตัด 4130 steel ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ สังเกตเห็นว่าความกว้างของรอยตัดและส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat affected zone, HAZ) ลดลง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วการตัดและกำลังของเลเซอร์ [4] ในการตัด high strength steel ด้วยเลเซอร์ พบว่าเมื่อความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้น ก็ต่อเมื่อเพิ่มกำลังของเลเซอร์และลดความเร็วการตัด ในกรณีนี้ทำให้เกิดส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) กว้างขึ้น [5, 6] ในการตัดโลหะ AISI316L ด้วยเลเซอร์โดยการใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วย เมื่อพบว่าความกว้างของรอยตัดด้านบนมีความกว้างเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มกำลังเลเซอร์ เพิ่มความดันแก๊สไนโตรเจน และเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตัดส่วนหากทำให้ความกว้างของรอยตัดลดลง ขึ้นอยู่กับ การเพิ่มขึ้นของความเร็วการตัดและตำแหน่งของระยะโพกัส โดยที่ความเร็วการตัดนั้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลเกี่ยวกับระยะความกว้างของรอยตัด [7] ในกรณีการศึกษาเกี่ยวกับความหยาบบนผิวในรอยตัดในการตัดโลหะด้วยเลเซอร์พบว่า ความหยาบจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ความดันแก๊สออกซิเจนและอากาศ [8] ในการตัดอลูมิเนียมแผ่นบางพบว่า ความหยาบบนผิวในรอยตัดลดลงหรือเรียบขึ้น เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความดันแก๊สออกซิเจน ไม่ว่าจะความเร็วในการตัดจะมีขนาดเท่าใดก็ตาม [9] ในการใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยในการตัด alloy steel พบว่าความหยาบบนผิวในรอยตัดและส่วนที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนมีขนาดลดลงเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น [10] ในการทดลองตัดเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีความหนา 1.1 มิลลิเมตร สำหรับไฟเบอร์เลเซอร์พบว่าในการที่จะได้ซึ่งค่าความหยาบที่น้อยที่สุดต้องใช้ความเร็วตัดที่ปานกลางพอประมาณคือไม่สูงถึงค่าสูงสุดของความเร็วตัดของเครื่องตัดเลเซอร์ [11] ในการตัด high-alloy steel ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ พบว่าทั้งความกว้างรอยตัด ค่าความหยาบ และ HAZ ลดลง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วการตัด [12] การตัดเลเซอร์ในเหล็กคาร์บอนต่ำ โดยใช้ทั้งแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นแก๊สช่วยพบว่าความหยาบบนผิวของรอยตัดลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วในการตัด [13] ส่วนในการตัดเลเซอร์ใน Cubic boron nitride พบว่าที่ กำลังเลเซอร์สูงๆ จะส่งผลให้มีผิวในรอยตัดที่เรียบ แต่เกิด HAZ ที่กว้างขึ้น นอกจากนั้นพบว่าทั้งความหยาบในรอยตัดและ HAZ ลดลง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วตัดและความดันของแก๊สช่วย [14] ในการตัดสแตนเลสสตีล 316L พบว่า HAZ เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการตัดลดลง [15] ส่วนในการใช้แก๊สเฉื่อยเป็นแก๊สช่วยในการตัดด้วยเลเซอร์ พบว่าส่วนของโลหะที่หลอมละลายที่เกาะติดอยู่ด้านล่าง (Dross) จะลดลง เมื่อความเร็วการตัดเมื่อขึ้น และความเอียงของแถบริ้ว (inclination of striation) มีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วในการตัดและความดันของแก๊สช่วยเพิ่มขึ้น [16] ในการตัดเลเซอร์บนโลหะจะทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะแล้วส่วนนั้นจะเกาะติดอยู่กับผนังของรอยตัด (melt film) ส่วนที่หลอมละลายนั้นมีอิทธิพลต่อการเกิดเป็นแถบริ้ว (striation of formation) บนผนังของรอยตัด อธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนโลหะที่หลอมละลาย (melt film thickness) มีขนาดที่ลดลง [17] ซึ่งเกิดจากการใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วยในการตัด เมื่อความดันของแก๊สออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดชั้นของออกไซด์ (oxide layer) ที่เกาะติดอยู่บนผนังของรอยตัดมากขึ้น [18] และการที่จะทำให้ความลึกแถบริ้วบนผิวของรอยตัดลดลงได้ ก็ต่อเมื่อเพิ่มความเร็วในการตัดและลดความดันของแก๊สออกซิเจน [19]

ในจุดมุ่งหมายของกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์นั้น จะต้องเพิ่มคุณภาพการตัด ลดเวลาในกระบวนการตัด และลดต้นทุนในการตัดเลเซอร์ ทั้งนี้สามารถกระทำได้ โดยการปรับค่าตัวแปรต่างๆในกระบวนการตัดเลเซอร์ คือ กำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊สช่วย และความเร็วในการตัดเลเซอร์ ซึ่งค่าตัวแปรตามที่เกิดจากการปรับค่าตัวแปรต่างๆนี้ จะประกอบไปด้วย ความหยาบบนผนังของรอยตัด (roughness) การเกิดแถบริ้วบนผนังของรอยตัด (striation) เศษของโลหะที่หลอมละลายที่เกาะติดอยู่ด้านล่างของรอยตัด (dross) เศษของโลหะที่หลอมละลายที่กระเด็นไปเกาะอยู่ผิวของชิ้นงาน (spatter) และระยะความกว้างของรอยตัด (kerf width)

ในการทดลองนี้จะศึกษาผลจากการปรับค่าตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการตัดเหล็กคาร์บอนต่ำที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ด้วยเลเซอร์แบบคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวแปรนั้นประกอบด้วยกำลังของเลเซอร์ ความดันแก๊ส และความเร็วในการตัด ค่าที่ใช้สำหรับกำลังเลเซอร์คือ 2000, 2200 และ 2400 W สำหรับความดันแก๊สคือ 0.07, 0.12 และ 0.17 MPa และสำหรับความเร็วในการตัดคือ 3100, 3400 และ 3700 mm/min โดยทำการศึกษาความกว้างของรอยตัด และความหยาบบนผิวของรอยตัด

2. วิธีการทดลอง

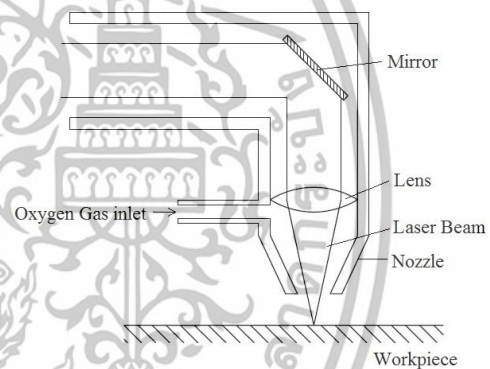
2.1 การออกแบบการทดลอง

ใช้เหล็กคาร์บอนต่ำ (SS400 mild steel) โดยมีขนาด 100x100 ตารางมิลลิเมตร และมีความหนา 3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิเมตร ใช้เครื่องตัดเลเซอร์รุ่น FANUC C4000 ซึ่งให้ลำแสงเลเซอร์แบบต่อเนื่อง และกำลังสูงสุดอยู่ที่ 4000 วัตต์ โดยลำแสงเลเซอร์สามารถเคลื่อนที่ตามแนวแกน x และ y ได้โดยใช้ระบบ CNC (AMADA FO-3015NT) และใช้แก๊สออกซิเจนเป็นแก๊สช่วย ซึ่งแสดงแผนภาพของการตัดเลเซอร์ดังรูปที่ 1

2.2. การดำเนินการตัด

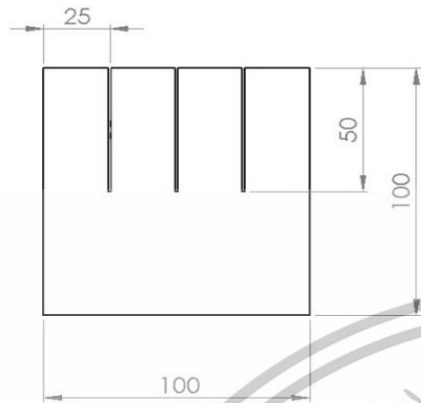
ในการทดลองจะทำการตัดแผ่นโลหะคาร์บอนต่ำเป็นเส้นตรง สามเส้น บนโลหะหนึ่งแผ่น ต่อค่าตัวแปรในการตัดหนึ่งค่า โดยตัดเข้าไป 50 มิลลิเมตร และห่างกัน 25 มิลลิเมตร และเพื่อหลีกเลี่ยงการเจาะนำจึงได้เริ่มทำการตัดที่นอกขอบของแผ่นโลหะ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 แผนภาพการตัดเลเซอร์

ตารางที่ 1 แสดงตัวแปรต่างๆในการทดลองตัดด้วยเลเซอร์

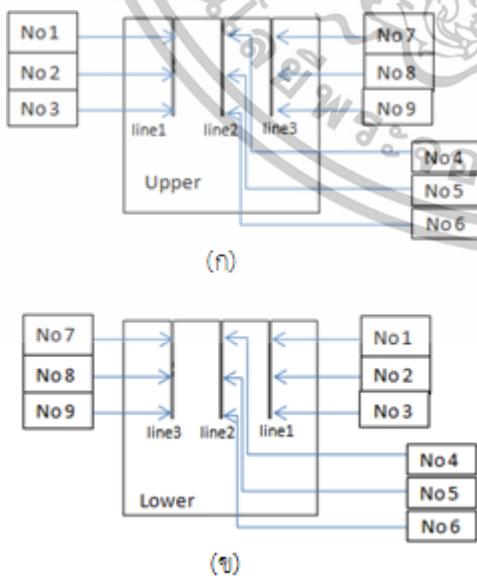
Parameters	Values
Material	Mild steel
Thickness	3 mm
Laser power	2000, 2200, 2400 W
Gas type / pressure	O ₂ /0.07, 0.12, 0.17 MPa
Cutting speed	3100, 3400, 3700 mm/min
Nozzle diameter	0.8 mm
Nozzle standoff distance	0.7 mm



รูปที่ 2 ชิ้นงานตัวอย่าง

2.3 การตรวจสอบความกว้างของรอยตัด

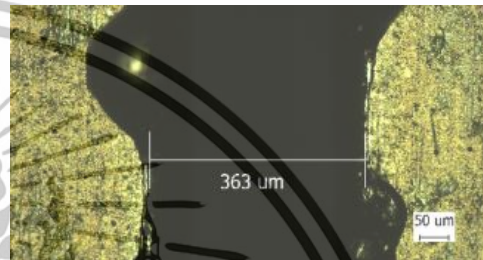
ในการวัดระยะความกว้างของรอยตัด ทำการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) (Olympus U-TV1X-2) ใช้กำลังขยายขนาด 50x ทำการวัดขนาดความกว้างของรอยตัดทั้งด้านบน และด้านล่างของชิ้นงาน โดยวัดระยะสามตำแหน่งต่อหนึ่งรอยตัด แสดงดังรูปที่ 3 และรูปถ่ายทั้งด้านบนและด้านล่างที่ได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แสดงดังรูปที่ 4 หลังจากทำการวัดขนาดระยะความกว้างของรอยตัดทั้งหมดแล้วจะนำมาเฉลี่ยเป็นค่าเฉลี่ยของความกว้างรอยตัดต่อหนึ่งชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดความกว้างรอยตัด (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง



(ก)

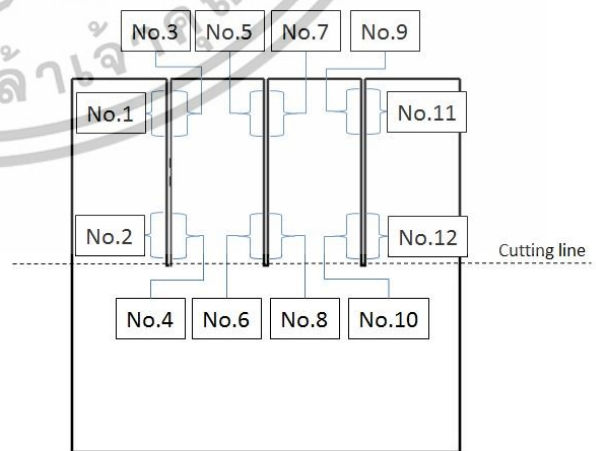


(ข)

รูปที่ 4 รูปถ่ายความกว้างรอยตัดจากกล้องจุลทรรศน์ (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง

2.4 การตรวจสอบความหยาบผิวของรอยตัด

หลังจากที่ได้ทำการวัดระยะความกว้างของรอยตัดเรียบร้อยแล้ว จะนำชิ้นงานมาตัดออกเพื่อวัดค่าความหยาบบนผิวด้านข้างของรอยตัด โดยค่าความหยาบจะใช้ค่าเฉลี่ยของความหยาบ R_z ทำการวัดความหยาบทั้งหมด 12 ตำแหน่งต่อหนึ่งชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5 ใช้เครื่องวัดความหยาบรุ่น Mitutoyo SJ-310 ในการตรวจสอบ โดยวัดความหยาบที่กึ่งกลางของผิวรอยตัด



รูปที่ 5 ตำแหน่งการวัดความหยาบบนรอยตัด

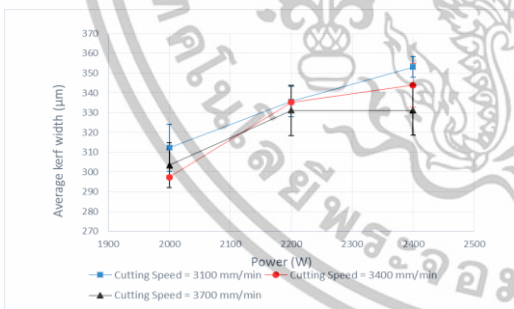
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

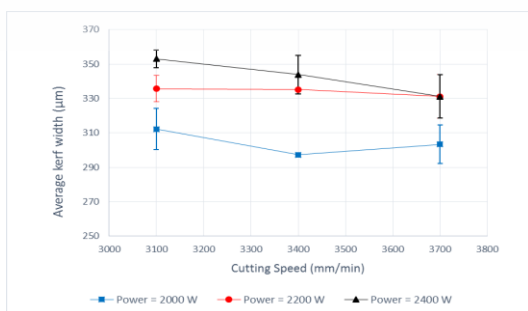
3.1 ระยะความกว้างรอยตัดเฉลี่ย

ในรูปที่ 6 แสดงกำลังของเลเซอร์ที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดเฉลี่ย ในกรณีความดันแก๊สช่วยเท่ากับ 0.17 MPa คงที่ กำลังเลเซอร์ถูกปรับที่ 2000, 2200 และ 2400 W อธิบายได้ว่าความกว้างของรอยตัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากกำลังของเลเซอร์ที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนไปสู่โลหะได้มากจึงทำให้รอยตัดนั้นมีความกว้างเพิ่มขึ้น ผลที่ได้เหมือนกับผลของงานวิจัยอื่นๆ [2-8]

รูปที่ 7 แสดงความเร็วการตัดที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดเฉลี่ย ในกรณีความดันแก๊สช่วยเท่ากับ 0.17 MPa คงที่ โดยความเร็วการตัดถูกปรับที่ 3100, 3400 และ 3700 mm/min สังเกตได้ว่าความกว้างของรอยตัดจะลดลงเมื่อความเร็วการตัดเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่า ที่ความเร็วการตัดต่างๆจะมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างเลเซอร์กับแผ่นโลหะได้นานกว่าที่ความเร็วการตัดสูง ดังนั้นที่ความเร็วต่ำจะทำให้โลหะมีการหลอมละลายมากกว่าและส่งผลให้ระยะความกว้างของรอยตัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ผลของความกว้างรอยตัดเนื่องจากกำลังเลเซอร์ (ความดันแก๊สออกซิเจน = 0.17 MPa)



รูปที่ 7 ผลของความกว้างรอยตัดเนื่องจากความเร็วการ

เอกสารตัด (ความดันแก๊สออกซิเจน = 0.17 MPa) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8 แสดงความกว้างของรอยตัดที่ได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงของความเร็วการตัดและความดันของแก๊สช่วย สำหรับที่กำลังเลเซอร์เท่ากับ 2000, 2200 และ 2400 W สังเกตได้ว่าสำหรับในกรณีที่กำลังเลเซอร์เท่ากับ 2200 W และ 2400 W ความกว้างของรอยตัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันของแก๊สช่วยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าที่ความดันแก๊สสูงๆ จะทำให้มีแก๊สออกซิเจนถูกปล่อยออกมาและทำปฏิกิริยากับโลหะ นั่นก็คือมีปฏิกิริยาทางความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะและส่วนที่หลอมละลายจะถูกเป่าออกไป ส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดมีความกว้างเพิ่มขึ้น

3.2 ความหยابบนผิวของรอยตัด

รูปที่ 9 แสดงถึงความหยابบนผิวของรอยตัดที่เกิดจากความเร็วการตัดและความดันแก๊ส ในกรณีที่กำลังเลเซอร์คงที่ ที่ 2000 W, 2200 W และ 2400 W สังเกตเห็นได้ว่าความหยาบลดลงเมื่อความเร็วการตัดเพิ่มขึ้นในทุกๆค่าของกำลังเลเซอร์ และที่ความเร็วการตัดสูงๆ ค่าความหยาบจะเข้าสู่ค่าคงที่ที่ประมาณ 10 µm และสังเกตได้อีกว่าความหยาบจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความดันแก๊สเพิ่มขึ้น

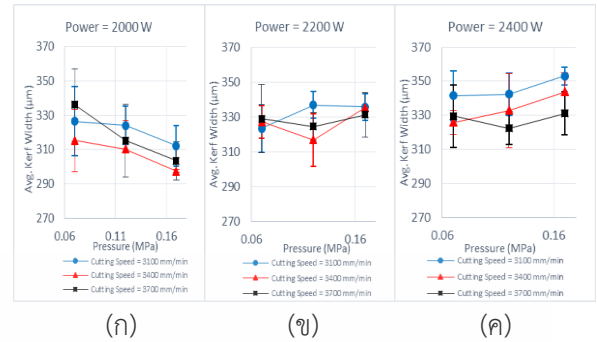
รูปที่ 10 แสดงความหยابบนผิวของรอยตัดที่เกิดจากกำลังของเลเซอร์ ในกรณีความเร็วการตัดคงที่ ที่ 3100, 3400 และ 3700 mm/min จะเห็นได้ว่าผลของความหยาบมีความแตกต่างกันในแต่ละค่าความเร็วการตัด โดยความเร็วตัดที่ 3100 mm/min ความหยาบผิวรอยตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังเลเซอร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ความเร็วการตัดสูงๆค่าความหยาบจะมีแนวโน้มลดลง ในกรณีที่ความเร็วการตัดต่ำ (3100 mm/min) เมื่อความดันแก๊สมีค่ามากส่งผลให้เกิดค่าความหยาบที่มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากที่ความดันแก๊สสูงจะส่งผลให้มีอัตราการหลอมเหลวของโลหะเป็นจำนวนมากทำให้เกิดชั้นของโลหะเหลวเกาะติดอยู่ เมื่อถูกความดันแก๊สเป่าออกทำให้เกิดเป็นริ้ว (striation) บนผิวของรอยตัด ซึ่งจะ

ทำให้เกิดความหยาบที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อต้องการตัดให้ได้ผิวในรอยตัดที่เรียบต้องใช้ความดันแก๊สต่ำๆ

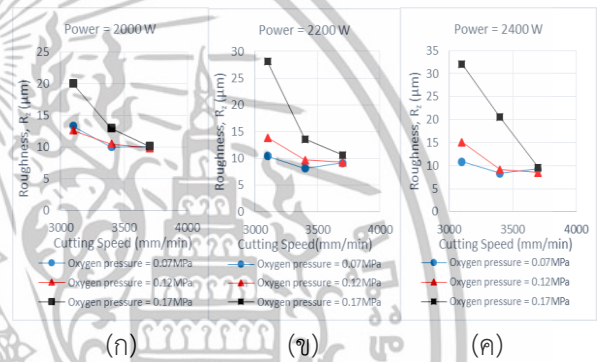
รูปที่ 11 แสดงความหยาบบนผิวของรอยตัดที่เกิดจากความดันแก๊สออกซิเจน จะเห็นได้ว่าความหยาบผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันแก๊สเพิ่มขึ้นในกรณีทุกค่าของกำลังเลเซอร์ ที่ความหยาบที่น้อยที่สุดคือที่ความดันแก๊สต่ำที่สุด อันเนื่องมาจากที่ความดันแก๊สต่ำนั้นจะเกิดปฏิกิริยาการคายความร้อน (Exothermic reaction) ที่ต่ำ ทำให้เกิดการหลอมละลายของโลหะน้อย ดังนั้นความลึกของแถบรีจิงน้อย ทำให้ผิวของรอยตัดที่ได้มีความเรียบมากขึ้น [18, 19] ส่วนในรูปที่ 11(ก) แสดงถึงความหยาบที่เกิดขึ้นในกรณีกำลังเลเซอร์ต่ำ และสำหรับที่ความเร็วการตัดขนาด 3100 mm/min สังเกตได้ว่าการลดลงของความหยาบเล็กน้อยเมื่อความดันแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 0.07 ถึง 0.12 MPa อธิบายได้ว่า ที่ความเร็วการตัดต่ำๆ จะมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาถ่ายเทความร้อนระหว่างลำแสงเลเซอร์กับแผ่นโลหะที่นานกว่า ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดชั้นของโลหะหลอมเหลวที่เกาะติดอยู่มาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความดันแก๊สต่ำมากๆ จะทำให้ส่วนของโลหะหลอมเหลวที่เกาะติดอยู่นั้นไม่สามารถถูกเป่าออกไปจากรอยตัดได้ จึงทำให้ผนังของรอยตัดนั้นเกิดเป็นริ้วมากขึ้น

ในการทดลองนี้จะได้ค่าความหยาบเฉลี่ยบนผิวของรอยตัด (R_z) ที่ต่ำที่สุดสามค่าดังนี้ คือ 8.174 μm , 8.371 μm และ 8.517 μm ตามลำดับ ซึ่งมีเงื่อนไขสำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ในการตัดเลเซอร์ ดังนี้

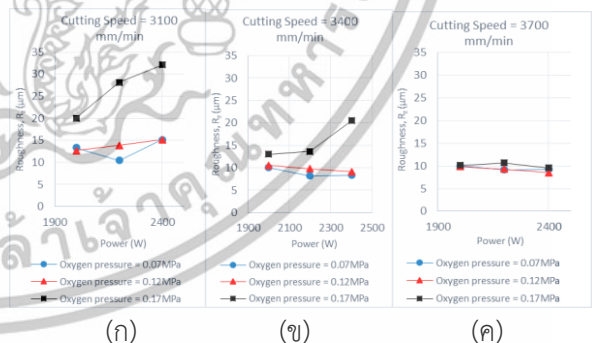
- 8.174 μm ที่กำลังเลเซอร์ 2200 W ความเร็วตัด 3400 mm/min และความดันแก๊ส 0.07 MPa
- 8.371 μm ที่กำลังเลเซอร์ 2400 W ความเร็วตัด 3400 mm/min และความดันแก๊ส 0.07 MPa
- 8.517 μm ที่กำลังเลเซอร์ 2400 W ความเร็วตัด 3700 mm/min และความดันแก๊ส 0.12 MPa



รูปที่ 8 ผลของความกว้างรอยตัดเนื่องจากความดันแก๊สออกซิเจน (ก) กำลังเลเซอร์ = 2000 W, (ข) กำลังเลเซอร์ = 2200 W และ (ค) กำลังเลเซอร์ = 2400 W

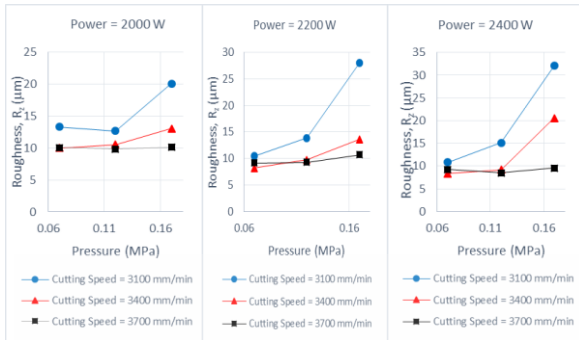


รูปที่ 9 ผลของความหยาบในรอยตัดเนื่องจากความเร็วการตัด (ก) กำลังเลเซอร์ = 2000 W, (ข) กำลังเลเซอร์ = 2200 W และ (ค) กำลังเลเซอร์ = 2400 W



รูปที่ 10 ผลของความหยาบในรอยตัดเนื่องจากกำลังเลเซอร์ (ก) ความเร็วตัด = 3100 mm/min, (ข) ความเร็วตัด = 3400 mm/min และ (ค) ความเร็วตัด = 3700 mm/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 11 ผลของความหยาบในรอยตัดเนื่องจากความดันแก๊สออกซิเจน (ก) กำลังเลเซอร์ = 2000 W, (ข) กำลังเลเซอร์ = 2200 W และ (ค) กำลังเลเซอร์ = 2400 W

4. สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ทำการตัดเหล็กคาร์บอนต่ำขนาดความหนา 3 มิลลิเมตรด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ ซึ่งผลจากการปรับค่าตัวแปรของกำลังเลเซอร์ ความดันแก๊สช่วย และความเร็วการตัด ส่งผลต่อความกว้างของรอยตัดและความหยาบบนผิวของรอยตัด จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- ระยะเวลาความกว้างของรอยตัดมีขนาดลดลง เมื่อลดกำลังเลเซอร์และเพิ่มความเร็วการตัด ในกรณีที่กำลังเลเซอร์ต่ำๆ เมื่อเพิ่มความดันแก๊สจะทำให้ความกว้างของรอยตัดลดลง ในทางตรงกันข้าม สำหรับกรณีที่กำลังเลเซอร์ปานกลางจนถึงกำลังสูงๆ เมื่อเพิ่มความดันแก๊สจะทำให้ความกว้างของรอยตัดมีขนาดที่กว้างขึ้น
- ความหยาบบนผิวรอยตัดลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วการตัด และลดความดันแก๊สช่วย สำหรับในทุกกำลังของเลเซอร์ ขึ้นอยู่กับความเร็วการตัด ซึ่งสามารถทำให้ความหยาบของรอยตัดเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Chen, S.L. (1998). The effects of gas composition on the CO₂ laser cutting of mild

steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 73, 1998, pp. 147 - 159.

[2] Yilbas, B.S. (2008). Laser cutting of thick sheet metals: Effects of cutting parameters on kerf size variations, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, 2008, pp. 285 - 290.

[3] Thomas, D.J. (2016), Optimising laser cut-edge durability for steel structures in high stress applications, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 121, January 2016, pp. 40 - 49.

[4] Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J. and Cheraghi, S.H. (2003), CO₂ laser cut quality of 4130 steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, 2003, pp. 351 - 358.

[5] Abdul, F.M.T. and Syarifah, N.A. (2017). An investigation of laser cutting quality of 22MnB5 ultra high strength steel using response surface methodology, *Optics & Laser Technology*, Vol. 92, 2017, pp. 142 - 149.

[6] Lamikiz, A., Lopez de Lacalle, L.N., Sánchez, J.A., del Pozo, D., Etayo, J.M. and López, J.M. (2005). CO₂ laser cutting of advanced high strength steels (AHSS), *Applied Surface Science*, Vol. 242, October 2004, pp. 362 - 368.

[7] Eltawahni, H.A., Hagino, M., Benyounis, K.Y., Inoue, T. and Olabi, A.G. (2012). Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L, *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, November 2012, pp. 1068 - 1082.

[8] Chen, S-L. (1999). The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- laser cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, 1999, pp. 57 - 66.
- [9] Sharma, A., Yadava, V. (2012). Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd:YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for straight profile, *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, July 2011, p. 159 - 168.
- [10] Cekic, A., Begic-Hajdarevic, D., Kulenovic, M. and Omerspahic, A. (2014). CO₂ Laser Cutting of Alloy Steels Using N₂ Assist Gas, *Procedia Engineering*, Vol. 69, 2014, pp. 310 - 315.
- [11] Powell, J., Al-Mashikhi, S.O., Kaplan, A.F.H. and Voisey, K.T. (2011). Fibre laser cutting of thin section mild steel: An explanation of the 'striation free' effect, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, April 2011, pp. 1069 - 1075.
- [12] Cekic, A. and Begic-Hajdarevic, D. (2015). Definition of Mathematical Models of High-alloyed Steel 1.4828 in CO₂ Laser Cutting, *Procedia Engineering*, Vol. 100, 2015, pp. 435 - 444.
- [13] Orishich, A.M., Malikov, A.G., Shulyatyev, V.B. and Golyshev, A.A. (2014). Experimental Comparison of Laser Cutting of Steel with Fiber and CO₂ Lasers on the Basis of Minimal Roughness, *Physics Procedia*, Vol. 56, 2014, pp. 875 - 884.
- [14] Mao, C., Sun, X., Huang, H., Kang, C., Zhang, M. and Wu, Y. (2016). Characteristics and removal mechanism in laser cutting of cBN-WC-10Co composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 230, November 2015, pp. 42 - 49.
- [15] Jarosz, K., Löschner, P. and Niestony, P. (2016). Effect of Cutting Speed on Surface Quality and Heat-affected Zone in Laser Cutting of 316L Stainless Steel, *Procedia Engineering*, Vol. 149, June 2016, pp. 155 - 162.
- [16] Scintilla, L.D. and Tricarico, L. (2013). Experimental investigation on fiber and CO₂ inert gas fusion cutting of AZ31 magnesium alloy sheets, *Optics & Laser Technology*, Vol. 46, May 2012, pp. 42 - 52.
- [17] Wee, L.M. and Li, L. (2005). An analytical model for striation formation in laser cutting, *Applied Surface Science*, Vol. 247, April 2005, pp. 277 - 284.
- [18] Salem, H.G., Mansour, M.S., Badr, Y. and Abbas, W.A. (2008). CW Nd:YAG laser cutting of ultra low carbon steel thin sheets using O₂ assist gas, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, May 2007, pp. 64 - 72.
- [19] Chen, K., Lawlence, Y. and Vijay M. (2001). Gas Dynamic Effects on Laser Cut Quality, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 3, 2001, pp. 38 - 49.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายภัทรภรณ์ คงเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	16 กุมภาพันธ์ 2536 ที่จังหวัดอุทัยธานี
ที่อยู่	158/1 ซอยโพธาราม ถ.โรจนะ ตำบลไผ่ลิง อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000
ประวัติการศึกษา	2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยบูรพา 2562 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การตัดเลเซอร์ (Laser Cutting) 2.) การออกแบบถังความดัน (Pressure Vessel Design)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้