

บทความวิจัย (Research Article)

## การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง

วีระพล ทับทิมดี<sup>1</sup>, ปวีร์วรรต นาสวาสดี<sup>2</sup> และ ประเวศ เชื้อวงษ์<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์  
<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและกระบวนการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

\*ผู้ประสานงานบทความฉบับ: pravate@techno.rru.ac.th โทรศัพท์: 081-7158999  
(รับบทความ: 26 กันยายน 2568; แก้ไขบทความ: 16 ธันวาคม 2568; ตอรับบทความ: 7 มกราคม 2569)

### บทคัดย่อ

การตัดวัสดุด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> เป็นกระบวนการตัดที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในการประยุกต์ใช้กับวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวให้ความแม่นยำและความยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตามความแตกต่างของความกว้างรอยตัดทั้งด้านบนและด้านล่างยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบของกำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส ในการตัดวัสดุ PMMA ด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัด เพื่อให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง และวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ ผลแสดงให้เห็นว่า กำลังเลเซอร์และความเร็วตัดเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อขนาดความกว้างรอยตัด โดยความกว้างรอยตัดของ TK และ BK มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ขณะที่กำลังเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกว้างรอยตัดของ TK และ BK เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระยะโฟกัสที่ห่างจากชิ้นงานมากเกินไป ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดของ TK และ BK มีค่ามากขึ้น ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองพื้นผิวตอบสนองชี้ให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ที่เด่นชัดระหว่างกำลังเลเซอร์และความเร็วตัด ซึ่งส่งผลต่อความกว้างรอยตัดอย่างชัดเจน ผลของงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกค่าพารามิเตอร์การตัดที่เหมาะสมเพื่อยกระดับคุณภาพการตัดชิ้นงาน PMMA และประยุกต์ใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ:** เลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ การตัดวัสดุ PMMA ความกว้างรอยตัด

การอ้างอิงบทความ: วีระพล ทับทิมดี, ปวีร์วรรต นาสวาสดี และ ประเวศ เชื้อวงษ์, "การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 87-102, 2569.

## Investigation of the Effects of CO<sub>2</sub> Laser Cutting Parameters on Kerf Width in PMMA based on Box–Behnken Design and Response Surface Methodology

Weerapol Taptimdee<sup>1</sup>, Pariwat Nasawat<sup>2</sup> and Prawach Chourwong<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Automated Manufacturing Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

<sup>2</sup> Department of Logistics and Process Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

\*Corresponding Author: pravate@techno.rru.ac.th โทรศัพท์: 081-7158999

(Received: September 26, 2025; Revised: December 16, 2025; Accepted: January 7, 2026)

### Abstract

CO<sub>2</sub> laser cutting is widely used for polymer processing applications because it provides high precision and flexibility. However, the difference in kerf width between the top and bottom surfaces remains an important factor affecting the quality of the workpiece. This research focuses on investigating the effects of laser power, cutting speed, and focal distance in cutting PMMA with a CO<sub>2</sub> laser, which affect the kerf width, in order to determine the most suitable cutting conditions. The experimental design in this research employed the Box–Behnken Design (BBD) and Response Surface Methodology (RSM), and the results were analyzed using statistical techniques. The experimental results showed that laser power and cutting speed were the main factors that affected kerf width. The kerf widths of the top kerf (TK) and bottom kerf (BK) tended to decrease as cutting speed increased, while higher laser power caused the kerf widths of TK and BK to increase. In addition, a high focal distance resulted in higher kerf widths of TK and BK. The response surface modeling indicated a clear interaction between laser power and cutting speed, which significantly affected kerf width. The findings of this research can serve as a guideline for selecting appropriate cutting parameters to improve the cutting quality of PMMA workpieces, and they can be further applied at the industrial level in the future.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> Laser, PMMA Cutting, Kerf Widths

Please cite this article as: W. Taptimdee, P. Nasawat and P. Chourwong, “ Investigation of the Effects of CO<sub>2</sub> Laser Cutting Parameters on Kerf Width in PMMA based on Box–Behnken Design and Response Surface Methodology,” *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 1, pp. 87-102, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

## 1. บทนำ

โพลีเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl Methacrylate; PMMA) เป็นวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความสำคัญและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลากหลายอุตสาหกรรม มันมีสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น มีความโปร่งแสงสูง น้ำหนักเบา ความแข็งแรงทางกลที่ดี ทนต่อสภาพอากาศรังสียูวี และมีความสามารถในการแปรรูปที่หลากหลาย เป็นต้น [1] ด้วยสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้วัสดุ PMMA จัดเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งมีความต้องการวัสดุประสิทธิภาพสูงเพื่อตอบสนองต่อข้อกำหนดในด้านต่างๆ วัสดุ PMMA จึงถูกนำมาผลิตเป็นส่วนประกอบสำคัญในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ โดยการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระจกในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น การผลิตแผงหน้าปัดรถยนต์ คอมพิวเตอร์ หน้าหลังเลนส์แว่นตา ป้ายโฆษณา และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น [2-4] ชิ้นส่วนเหล่านี้ไม่เพียงแต่ต้องมีรูปลักษณะที่สวยงาม แต่ยังคงทนทานต่อสภาวะการใช้งานที่หลากหลายและสภาพแวดล้อมที่ท้าทายตลอดอายุการใช้งานของยานยนต์อีกด้วย อีกทั้งยังต้องมีความสามารถในการขึ้นรูปได้ง่าย และมีความเสถียรทางเคมี เพื่อให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำและความทนทาน

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ได้รับความนิยมอย่างสูงในการตัดวัสดุโพลีเมอร์ เช่น โพลีคาร์บอเนต (PC) โพลีโพรพิลีน (PP) โพลีเอทิลีน (PE) และ โพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นต้น [5,6] เนื่องจากมันมีความแม่นยำและความเร็วในการตัดสูง สามารถตัดงานที่มีความซับซ้อนสูงได้อย่างรวดเร็ว [7] นอกจากนี้ PMMA เป็นหนึ่งในเทอร์โมพลาสติกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตัดเฉือนด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงและมีค่าการดูดซับความยาวคลื่นเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ที่สูง

อีกด้วย [8] ส่งผลให้ PMMA มีโครงสร้างที่สะอาดและมีการเสื่อมสภาพจากความร้อนเพียงเล็กน้อย [9] แม้ว่า PMMA จะเป็นที่ยอมรับในด้านความแข็งแรงเชิงกลที่ดีและมีคุณสมบัติด้านทานการขีดข่วนที่ดี [10] แต่อย่างไรก็ตามในการตัดวัสดุ PMMA ด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ยังคงพบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพพื้นผิวที่ได้ เช่น การเปียงเบนของความกว้างรอยตัด ขนาดความกว้างรอยตัด ความแข็งที่ผิว ความหยابผิว และพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) เป็นต้น [11] การตัดที่แม่นยำเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อความถูกต้องและความสมบูรณ์ด้านขนาดของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย ตัวชี้วัดคุณภาพการตัดที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ความกว้างรอยตัด ซึ่งนิยามว่าเป็นร่องที่เกิดจากการนำเนื้อวัสดุออก [12,13] ความกว้างรอยตัดเป็นพารามิเตอร์สำคัญในกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์ เนื่องจากมันส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของขนาดชิ้นส่วนที่ตัดและคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงของความกว้างรอยตัดอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากขนาดที่ต้องการ ซึ่งส่งผลต่อความพอดีและการนำผลิตภัณฑ์ไปเป็นส่วนประกอบกับงานอื่นๆ ดังนั้นการควบคุมและการคาดการณ์ความกว้างรอยตัดจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้มั่นใจถึงความแม่นยำ ความพอดี และความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ได้มีการศึกษาถึงพารามิเตอร์การตัด เช่น กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และแรงดันแก๊ส ที่ส่งผลต่อคุณภาพการตัดของ PMMA ทั้งในส่วนของมุมเอียง ความกว้างรอยตัด ความหยابผิว เป็นต้น โดยบางงานวิจัยใช้วิธีการทางสถิติที่หลากหลายเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังงานวิจัยของ Safari และคณะ [14] ได้ศึกษาถึงการตัดแผ่น PMMA ด้วยเลเซอร์ โดยนำวิธีพื้นผิวดูตอบสนองมาใช้ในการวิเคราะห์ผล พบว่า การเพิ่มกำลังเลเซอร์นำไปสู่การเพิ่มความหยابผิวและมุมเอียงลดลง ในขณะที่ความกว้างรอยตัดที่ผิวด้านบน

### บทความวิจัย (Research Article)

และด้านล่างจะลดลงก่อนจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังเลเซอร์สูงกว่า 90 W

Khoshaim และคณะ [15] ได้ศึกษาถึงผลของปัจจัยกระบวนการต่อลักษณะรอยตัดแผ่น PMMA ด้วยเลเซอร์ พบว่า รอยตัดมีการเบี่ยงเบนมากขึ้นเมื่อความเร็วตัด กำลังเลเซอร์และแรงดันแก๊สเพิ่มขึ้น การใช้กำลังเลเซอร์ต่ำและความเร็วในการตัดสูงจะช่วยลดพื้นที่ ๆ ได้รับความกระทบจากความร้อนและความขรุขระของพื้นผิวได้ Kurt และคณะ [16] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของกำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และจุดโฟกัสต่อความกว้างของรอยตัด โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) แสดงให้เห็นว่า ความกว้างของรอยตัดได้รับผลกระทบอย่างมากจากจุดโฟกัส รวมถึงความเร็วและกำลังเลเซอร์อีกด้วย อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้น พบว่ายังขาดการศึกษาเชิงลึกที่ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อสมบัติของ PMMA อย่างเป็นระบบ การศึกษาที่เจาะจงลงไปในด้านผลกระทบหรือพฤติกรรมของระยะห่างความกว้างรอยตัดต่อสมบัติทางกลของ PMMA ยังคงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อประเมินประสิทธิภาพภายใต้สภาพการใช้งานจริงและเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานทางวิศวกรรมที่กำหนด

ดังนั้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพการตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> บนวัสดุ PMMA และลดปัญหางานตัดที่อาจเกิดขึ้นได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA และระบุปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของชิ้นงานเพื่อให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) แบบ Box-Behnken Design (BBD) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดที่สำคัญ

เช่น กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัสต่อขนาดความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA ได้อย่างเป็นระบบ ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้คาดว่าจะให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับศักยภาพของ PMMA ในฐานะวัสดุทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ และเป็นฐานข้อมูลสำหรับการพัฒนาและออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์ในอนาคตให้มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดียิ่งขึ้น

## 2. ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

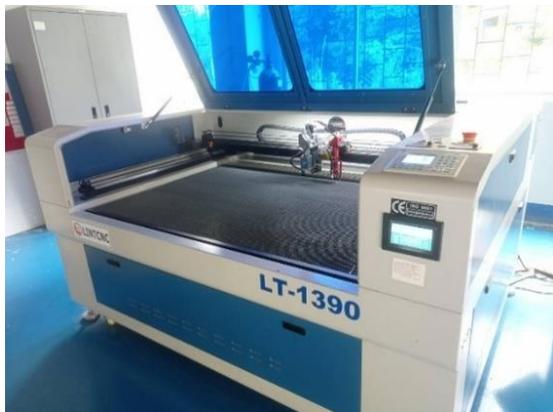
### 2.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วัสดุโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ชนิดแผ่นเรียบที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร (มม.) ซึ่งเป็นวัสดุที่จัดอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก มีสมบัติโดดเด่นในด้านความโปร่งแสงและความแข็งแรงทางกลที่ดี วัสดุ PMMA จะถูกตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Laser Cutter Machine) ชื่อทางการค้า LINTCNC รุ่น LT-1390 ผลิตในประเทศจีน ในงานวิจัยนี้จะใช้คำว่า “การตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub>” แทน “การตัดด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์” รายละเอียดคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องตัดเลเซอร์ CO<sub>2</sub> แสดงไว้ในตารางที่ 1 และลักษณะของเครื่องตัดเลเซอร์ CO<sub>2</sub> และหัวตัดแสดงไว้ในรูปที่ 1 เครื่องตัดเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องตัดเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ชนิด 2 หัวตัด โดยหัวตัดที่หนึ่ง สามารถตัดวัสดุประเภทโลหะ ได้ที่ความหนาไม่เกิน 1 มม. กำลังของหลอดเลเซอร์ขนาด 100 W และหัวตัดที่สอง สามารถใช้ในการตัดวัสดุประเภทโลหะ ได้แก่ ไม้ อะคริลิก ยาง เป็นต้น กำลังของหลอดเลเซอร์ขนาด 130 W หัวตัดทั้งสองไม่สามารถตัดงานพร้อมกันได้ ในงานวิจัยนี้ใช้หัวตัดที่สองในการตัดวัสดุ PMMA หลักการทำงานของเครื่องตัดเลเซอร์ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี [17]

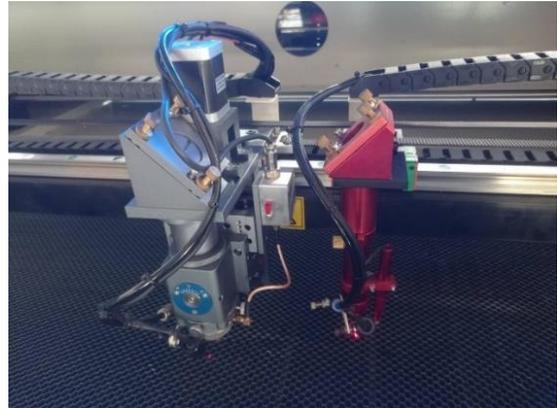
บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 1 รายละเอียดคุณลักษณะทางเทคนิคของเครื่องตัดเลเซอร์ รุ่น LT-1390

Description	Parameter
Model	LT-1390
Laser Medium	CO <sub>2</sub>
Working Area	1300 × 900 mm
Laser Power	100 W/130 W
Position Accuracy	0.01 mm
Repetition Accuracy	0.02 mm
Cutting Speed	150 mm/s
Control System	Ruida (USB interface)
Drive System	3-Phase Stepper Motor and Driver
Cooling System	Water-Cooling



(a)



(b)

รูปที่ 1 (a) เครื่องตัดเลเซอร์ CO<sub>2</sub> (b) หัวตัดเลเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

## 2.2 การออกแบบการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้เขียนได้ใช้การออกแบบการทดลอง (DOE) แบบ Box-Behnken Design (BBD) และพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ กำลังเลเซอร์ (P) ความเร็วในการตัด (S) และระยะโฟกัส (mm) ต่อขนาดความกว้างของรอยตัดบนแผ่นโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) หนา 3 มม. การศึกษาที่ใช้ซอฟต์แวร์ Minitab v.19 ในการวิเคราะห์ผลทางสถิติและหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อระบุพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ขนาดความกว้างรอยตัดน้อยที่สุด ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับ (Factors & Levels)

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (+1)
กำลังเลเซอร์ (%)	P	50	60	70
ความเร็วตัด (mm/min)	S	5	7.5	10
ระยะโฟกัส (mm)	F	12	14	16

วิระพล ทับทิมดี และคณะ, การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบสนอง

บทความวิจัย (Research Article)

### 2.3 การวัดความกว้างรอยตัด

ในการวัดขนาดของความกว้างรอยตัดที่เกิดจากการตัดด้วยเครื่องเลเซอร์ CO<sub>2</sub> บนวัสดุ PMMA นั้น ดำเนินการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) ชื่อทางการค้า Leica รุ่น DM4 M ผลิตในประเทศเยอรมัน ดังรูปที่ 3 (a) เป็นเครื่องมือหลัก เนื่องจากสามารถถ่ายภาพของความกว้างรอยตัดได้อย่างชัดเจน โดยเริ่มต้นจากการตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขการทดลองที่ได้กำหนดไว้ ดังรูปที่ 3 (b) จากนั้นถ่ายภาพความกว้างรอยตัดทั้งด้านบน (Top Kerf: TK) และ ด้านล่าง (Bottom Kerf: BK) ด้วยกล้อง OM โดยใช้กำลังขยายที่ 5x เพื่อให้สามารถสังเกตรูปร่างของความกว้างรอยตัดได้อย่างครบถ้วน ภาพถ่ายชิ้นงานที่ได้จากกล้อง OM แสดงดังรูปที่ 4 จากนั้นวัดขนาดของความกว้างรอยตัดด้วยโปรแกรม ImageJ การวัดจะทำการสุ่มวัดในหลายตำแหน่ง (5 จุด/ชิ้นงาน) ตลอดความยาวของรอยตัด เพื่อลดอคติจากความไม่สม่ำเสมอของกระบวนการตัด และใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าตัวแทนในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ



(a)



(b)

รูปที่ 3 (a) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และ (b) ตัวอย่างชิ้นงาน



4 (a) ความกว้างรอยตัดด้านบน (TK)



4 (b) ความกว้างรอยตัดด้านล่าง (BK)

รูปที่ 4 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ได้จากกล้อง OM กำลังขยาย 5x บนเงื่อนไข P60 S7.5 F14

### 2.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตัด PMMA ด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ร่วมกับการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (RSM) เพื่อประเมินผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส ที่ส่งผลต่อความกว้างของความกว้างรอยตัดของชิ้นงาน โดยใช้

บทความวิจัย (Research Article)

ANOVA ในการตรวจสอบว่าปัจจัยหรือปฏิสัมพันธ์ใด มีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลตอบสนอง ส่วน RSM นั้นใช้ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ในรูปแบบพหุนามกำลังสองเพื่ออธิบายแนวโน้มของข้อมูล พร้อมวิเคราะห์ผลผ่านกราฟ Surface Plot และ Contour Plot เพื่อตีความผลเชิงภาพ หลังจากได้สมการพยากรณ์แล้ว จะใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เพื่อระบุชุดค่าพารามิเตอร์ที่ให้คุณภาพการตัดดีที่สุด โดยพิจารณาถึงค่าความกว้างของความกว้างรอยตัดน้อยที่สุด

### 3. ผลการทดลอง (Results)

#### 3.1 ผลการวัดขนาดความกว้างรอยตัดบน TK และ BK

ในงานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design โดยการใช้การทดลองทั้งสิ้นจำนวน 15 Run หลังการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ชิ้นงานจะถูกถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จากนั้นวัดขนาดความกว้างรอยตัดด้าน TK และ BK ด้วยโปรแกรม ImageJ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวัดความกว้างรอยตัดด้าน TK และ BK

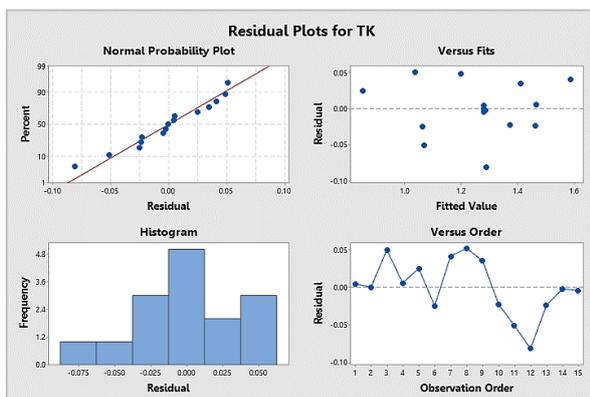
Run Order	Laser Power (%)	Cutting Speed (mm/s)	Focus (mm)	Top Kerf (mm)	Bottom Kerf (mm)
1	60	7.5	14	1.287	0.326
2	60	7.5	14	1.129	0.337
3	50	10.0	14	1.248	0.189
4	60	5.0	12	1.471	0.381
5	50	7.5	12	0.878	0.330
6	70	7.5	16	1.040	0.515
7	60	5.0	16	1.629	0.350
8	70	7.5	12	1.089	0.350
9	60	10.0	16	1.447	0.190
10	50	5.0	14	1.351	0.205
11	50	7.5	16	1.020	0.292
12	60	10.0	12	1.209	0.242
13	70	5.0	14	1.439	0.255
14	70	10.0	14	1.286	0.234
15	60	7.5	14	0.890	0.324

บทความวิจัย (Research Article)

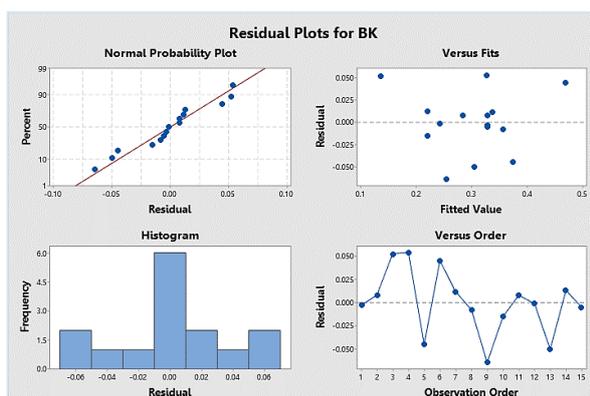
### 3.2 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

#### 3.2.1 ผลการวิเคราะห์ ANOVA

หลังจากถ่ายภาพชิ้นงานด้วยกล้อง OM จึงทำการวัดขนาดความกว้างของรอยตัดทั้งด้าน TK และด้าน BK จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab ก่อนดำเนินการวิเคราะห์ ANOVA จำเป็นต้องตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองและสมมติฐานทางสถิติให้เป็นไปตามเงื่อนไข ผลการวิเคราะห์ Residual Plot ของความกว้างรอยตัดด้าน TK และ BK แสดงดังรูปที่ 5



5 (a)



5 (b)

รูปที่ 5 กราฟ Residual ของ (a) ความกว้างรอยตัดด้านบนและ (b) ความกว้างรอยตัดด้านล่าง

จากรูปที่ 5 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองผ่านกราฟ Residual แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสำหรับ TK และ BK ผ่านเกณฑ์ตรวจสอบทั้งสามเงื่อนไข ได้แก่ รูปแบบการกระจายตัวแบบปกติ ความแปรปรวนคงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งช่วยยืนยันว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและเป็นไปตามสมมติฐานทางสถิติอย่างเพียงพอ โดยไม่พบสัญญาณของการเบี่ยงเบนจากความเป็นปกติ (Non-Normality) หรือความแปรปรวนไม่คงที่ (Heteroscedasticity) ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลชุดนี้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้

ผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน TK ที่ออกแบบการทดลองโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ BBD แสดงดังตารางที่ 4 ผลแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า  $R^2 = 96.41\%$  และ  $R^2 (\text{Adj}) = 92.81\%$  ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างเพียงพอ [14] โดยปัจจัยทั้งสาม ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความกว้างรอยตัดด้านบนอย่างมีนัยสำคัญ โดยความเร็วตัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อขนาดความกว้างรอยตัดด้าน TK เมื่อเทียบกับกำลังเลเซอร์และระยะโฟกัส โดยพิจารณาจากค่า P-Value น้อยที่สุดและค่า F-Value สูงสุด ในด้านปัจจัยยกกำลังสอง พบว่ากำลังเลเซอร์<sup>2</sup> ความเร็วตัด<sup>2</sup> และระยะโฟกัส<sup>2</sup> แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงโค้งระหว่างปัจจัยเหล่านี้กับตัวแปรตอบสนอง โดยเฉพาะความเร็วตัด ซึ่งแสดงความสัมพันธ์โค้งมากที่สุดในบรรดาปัจจัยทั้งหมด การปรับค่าความเร็วให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการได้คุณภาพรอยตัดที่ดี รองลงมาคือ กำลังเลเซอร์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่ากำลังเลเซอร์สูงหรือต่ำเกินไป คุณภาพรอยตัดจะลดลง ขณะที่ปฏิสัมพันธ์แบบสองทาง (2-Way Interaction) ระหว่างกำลังเลเซอร์และระยะโฟกัสไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน TK

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.522196	0.074599	26.83	0.000
Linear	3	0.107116	0.035705	12.84	0.003
Laser power	1	0.015913	0.015913	5.72	0.048
Speed	1	0.061215	0.061215	22.02	0.002
focus distance	1	0.029988	0.029988	10.79	0.013
Square	3	0.405997	0.135332	48.68	0.000
Laser power*Laser power	1	0.135735	0.135735	48.83	0.000
Speed*Speed	1	0.213416	0.213416	76.77	0.000
focus distance*focus distance	1	0.025919	0.025919	9.32	0.018
2-Way Interaction	1	0.009082	0.009082	3.27	0.114
Laser power*focus distance	1	0.009082	0.009082	3.27	0.114
Error	7	0.019460	0.002780		
Lack-of-Fit	5	0.019421	0.003884	200.08	0.005
Pure Error	2	0.000039	0.000019		
Total	14	0.541655			
S = 0.0527251		R-sq = 96.41%		R-sq (adj) = 92.81%	

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน BK ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองมีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า  $R^2 = 83.69\%$  และ  $R^2$  (Adj) =  $67.39\%$  ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างเพียงพอ โดยกำลังเลเซอร์และความเร็วตัด มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยตัดด้าน BK ในขณะที่ระยะโฟกัสไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาปัจจัยทั้งสาม พบว่า กำลังเลเซอร์และความเร็วตัด เป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมความกว้างรอยตัดด้าน BK ในส่วนของปัจจัยยกกำลังสอง พบว่า ความเร็วตัด<sup>2</sup> ส่งผลกระทบต่อความกว้างรอยตัดด้าน BK มากที่สุด ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงโค้งระหว่างความเร็วตัด

และความกว้างรอยตัด กล่าวคือ หากความเร็วต่ำเกินไปหรือสูงเกินไป อาจทำให้รอยตัดกว้างขึ้นได้ ส่วนระยะโฟกัส<sup>2</sup> และกำลังเลเซอร์<sup>2</sup> ไม่ส่งผลกระทบต่อความกว้างรอยตัดด้าน BK อย่างมีนัยสำคัญ

ในส่วนของคุณค่า Lack-of-Fit ของ TK และ BK จากตารางที่ 4 และตารางที่ 5 พบว่า Lack-of-Fit ของทั้ง TK และ BK มีค่า P-value < 0.05 ซึ่งมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลนี้อาจเกิดจากจำนวนการทำซ้ำของจุดกึ่งกลาง (Center-Point Replications) ที่มีจำกัด ส่งผลให้การทดสอบมีความไวต่อความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมากขึ้นกว่าปกติ อย่างไรก็ตาม โมเดลยังคงสามารถนำไปใช้งานได้ เนื่องจากแผนภาพอิทธิพลหลัก (Main Effects Plot) ของทั้ง TK และ BK ยังคงแสดงแนวโน้มของปัจจัยได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน BK

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.087400	0.012486	5.13	0.023
Linear	3	0.028452	0.009484	3.90	0.063
Laser power	1	0.014179	0.014179	5.83	0.046
Speed	1	0.014028	0.014028	5.77	0.047
focus distance	1	0.000244	0.000244	0.10	0.761
Square	3	0.048687	0.016229	6.67	0.018
Laser power*Laser power	1	0.000678	0.000678	0.28	0.614
Speed*Speed	1	0.033183	0.033183	13.64	0.008
focus distance*focus distance	1	0.011745	0.011745	4.83	0.064
2-Way Interaction	1	0.010262	0.010262	4.22	0.079
Laser power*focus distance	1	0.010262	0.010262	4.22	0.079
Error	7	0.017028	0.002433		
Lack-of-Fit	5	0.016930	0.003386	69.10	0.014
Pure Error	2	0.000098	0.000049		
Total	14	0.104428			
S = 0.0493206		R-sq = 83.69%		R-sq (adj) = 67.39%	

3.2.2 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักต่อความกว้างรอยตัด

ผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดด้าน TK และด้าน BK แสดงดังรูป 6 (a, b) แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่อขนาดความกว้างรอยตัดที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน จากรูป 6 (a) พบว่า ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดด้าน TK มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังของเลเซอร์เพิ่มขึ้นในช่วงแรก การเพิ่มกำลังเลเซอร์ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ผิววัสดุสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณรอยตัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เกิดการหลอมและการระเหยของ

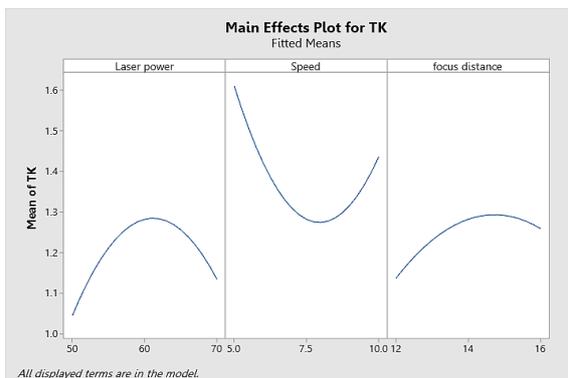
PMMA มากขึ้น จึงทำให้ความกว้างรอยตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อกำลังเลเซอร์เพิ่มจาก 60% เป็น 70% พบว่าความกว้างรอยตัดมีแนวโน้มลดลงขณะที่ความเร็วตัดส่งผลอย่างชัดเจนในทางตรงข้ามกับกำลังเลเซอร์ กล่าวคือ การใช้ความเร็วตัดที่ต่ำเกินไปส่งผลให้ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดมีค่าสูงมาก และเมื่อเพิ่มความเร็วจาก 5.0 เป็น 7.5 mm/min ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจนและจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความเร็วตัดสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการควบคุมความเร็วตัดที่เหมาะสมจะช่วยให้ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดลดลงได้ ทั้งนี้เมื่อความเร็ว

บทความวิจัย (Research Article)

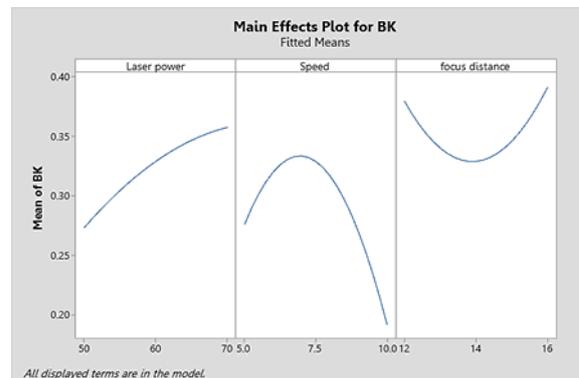
ในการตัดสูงขึ้น อัตราการส่งผ่านพลังงานไปสู่ชิ้นงานจะลดลงเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างลำแสงกับพื้นผิวลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิที่พื้นผิวต่ำลง ตลอดจนการถ่ายเทพลังงานได้แพร่กระจายในทิศทางความลึก ส่งผลให้ TK มีขนาดเล็กลง [11,18] ส่วนของระยะโฟกัส พบว่า มีผลต่อความกว้างรอยตัดในลักษณะโค้งเช่นกัน โดยระยะโฟกัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกว้างรอยตัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยตำแหน่งโฟกัสที่เหมาะสมจะช่วยให้การรวมพลังงานของแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้รอยตัดสม่ำเสมอและความกว้างรอยตัดแคบลง [19] เพิ่มขึ้นของความกว้างของรอยตัดเมื่อระยะโฟกัสเพิ่มมากขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงการโฟกัสของลำแสงและการกระจายพลังงานเมื่อลำแสงทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ระยะต่างกันออกไป หากระยะตัดสูงขึ้นการกระจายตัวของลำแสงจะเพิ่มขึ้น ขนาดจุดเลเซอร์จึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (HAZ) และการกำจัดวัสดุมีมากขึ้น ส่งผลให้ความกว้างของรอยตัดกว้างขึ้น [13]

ในส่วนของผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดด้านล่าง ดังรูป 6 (b) พบว่า ปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่อความกว้างรอยตัดด้านล่าง

แตกต่างจากความกว้างรอยตัดด้านบน กล่าวคือ เมื่อตัดด้วยกำลังเลเซอร์ 50% ทำให้ค่าความกว้างรอยตัดต่ำที่สุด แต่เมื่อกำลังเพิ่มเลเซอร์ให้สูงขึ้นส่งผลให้ความกว้างรอยตัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับความเร็วตัด พบว่า เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 7.5 mm/min ค่าเฉลี่ยความกว้างรอยตัดจะเพิ่มขึ้นสูงสุด ก่อนจะลดลงเมื่อความเร็วตัดเป็น 10 mm/min สำหรับความเร็วในการตัด ความกว้างของรอยตัดจะลดลงเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้น แนวโน้มนี้เกิดจากเวลาในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างลำแสงเลเซอร์และวัสดุที่ลดลง ซึ่งเป็นการจำกัดปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าและจำกัดบริเวณจุดหลอมเหลวและการระเหย ดังนั้น ความเร็วในการตัดที่สูงขึ้นจึงส่งผลให้การกำจัดวัสดุน้อยลงและความกว้างของรอยตัดแคบลง ความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างความเร็วในการตัดและความกว้างของรอยตัดนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของการปรับพารามิเตอร์การตัดให้เหมาะสมที่สุด [13] ในด้านระยะโฟกัสนั้น ค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ความกว้างรอยตัดต่ำที่สุดคือ 14 mm หากระยะโฟกัสใกล้หรือไกลเกินไปจะทำให้ความกว้างรอยตัดเพิ่มขึ้น



(a)



(b)

รูปที่ 6 ผลกระทบของปัจจัยหลักของ (a) ความกว้างรอยตัดด้านบน และ (b) ความกว้างรอยตัดด้านล่าง

บทความวิจัย (Research Article)

3.2.3 Contour Plot และ Surface Plot

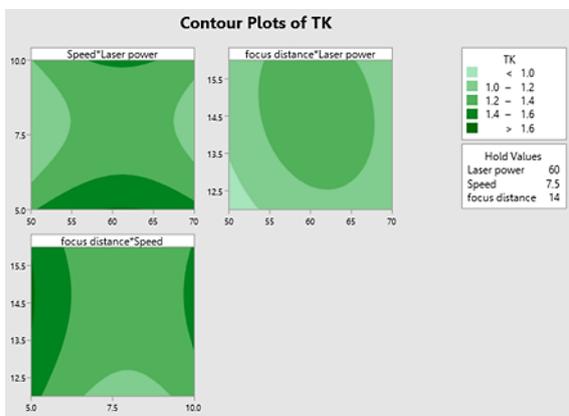
รูปที่ 7 แสดง Contour Plot ของความกว้างรอยตัดบนพื้นผิวด้าน TK และด้าน BK ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งเป็นการแสดงผลในรูปแบบภาพ 2D และรูปที่ 8 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์เชิงพื้นผิว (Surface Plot) ซึ่งเป็นการแสดงผลเป็นแบบภาพ 3D ภายใต้อิทธิพลของปัจจัยการตัดทั้งสาม ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส ที่มีอิทธิพลต่อความกว้างรอยตัดด้าน TK และด้าน BK ของวัสดุ PMMA ที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องเลเซอร์ CO<sub>2</sub> สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน TK ดังรูปที่ 6 (a) และรูปที่ 7 (a) พบว่า กำลังเลเซอร์เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดมากที่สุด เมื่อกำลังเลเซอร์สูง

ความเร็วตัดต่ำ ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดด้านบนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการกระจายพลังงานความร้อนในกระบวนการตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> การเพิ่มกำลังเลเซอร์และการลดความเร็วในการตัดให้ต่ำลง ให้ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเพิ่มขึ้น ค่า TK จึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่หลอมละลายของวัสดุมีขนาดใหญ่ขึ้น [15,20] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาระยะโฟกัส พบว่า เมื่อระยะโฟกัสต่ำ ส่งผลให้ค่า TK แคลงในทางกลับกัน เมื่อระยะโฟกัสสูง กำลังเลเซอร์จะกระจายไปทั่วพื้นที่ผิวที่กว้างขึ้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่กระทำกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น จึงทำให้ TK เพิ่มขึ้น [20] สมการเชิงพหุนามในการหาความกว้างรอยตัดที่แคบที่สุดบนพื้นผิวด้านบน แสดงดังสมการที่ 1

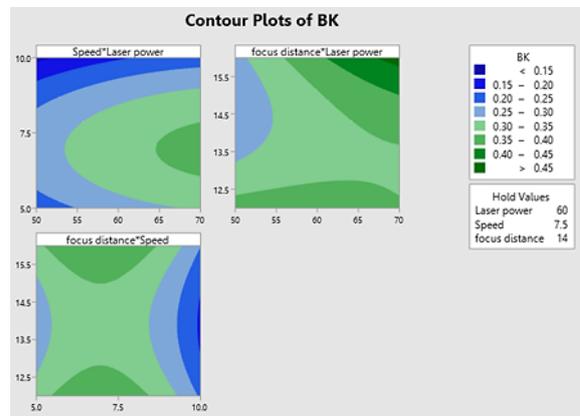
$$TK = 10.00 + 0.2679 \text{ Laser Power} - 0.6120 \text{ Speed} + 0.760 \text{ Focus Distance} - 0.001917 \text{ Laser Power}^2 + 0.03847 \text{ Speed}^2 - 0.02095 \text{ Focus Distance}^2 - 0.00238 \text{ Laser Power} * \text{Focus Distance} \dots \dots \dots (1)$$

สำหรับความกว้างรอยตัดด้าน BK ดังรูปที่ 6 (a) และรูปที่ 7 (a) พบว่า เมื่อตัดชิ้นงานโดยใช้กำลังเลเซอร์ต่ำ ความเร็วตัดสูง จะทำให้ความกว้างรอยตัดแคบลง ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงาน (Heat input) น้อย ส่งผลให้วัสดุหลอมละลายลดลง จึงทำให้ความกว้างรอยตัดลดลง [15,20] ในทาง

กลับกัน เมื่อใช้กำลังเลเซอร์สูง ความเร็วตัดต่ำ ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดเพิ่มขึ้น ในส่วนของระยะโฟกัสจะไม่ส่งผลต่อความกว้างของรอยตัดมากนักเมื่อใช้ความเร็วในการตัดสูง สมการเชิงพหุนามในการหาความกว้างรอยตัดที่แคบที่สุดบนพื้นผิวด้านล่าง แสดงดังสมการที่ 2



(a)



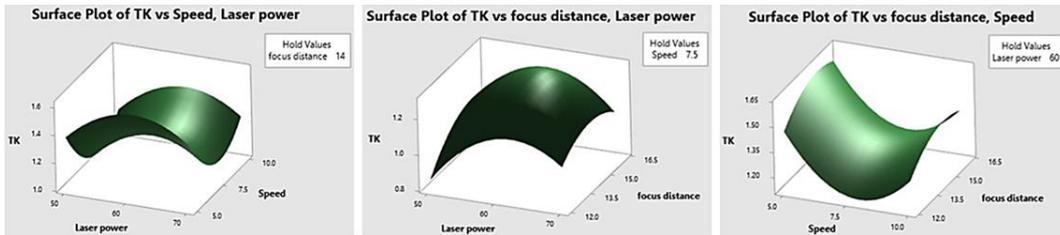
(b)

รูปที่ 7 Contour Plots ของ (a) ความกว้างรอยตัดด้าน TK และ (b) ความกว้างรอยตัดด้าน BK

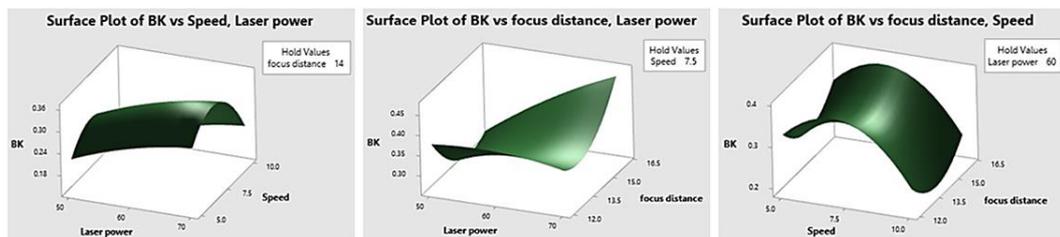
วิระพล ทับทิมดี และคณะ, การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดด้วยเลเซอร์ CO<sub>2</sub> ต่อความกว้างรอยตัดบนวัสดุ PMMA โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ร่วมกับวิธีพื้นผิวดอปสนอง

บทความวิจัย (Research Article)

$$BK = 3.71 - 0.0150 \text{ Laser Power} + 0.2108 \text{ Speed} - 0.544 \text{ Focus Distance} - 0.000135 \text{ Laser Power}^2 - 0.01517 \text{ Speed}^2 + 0.01410 \text{ Focus Distance}^2 + 0.00253 \text{ Laser Power} * \text{Focus Distance} \dots \dots \dots (2)$$



(a)



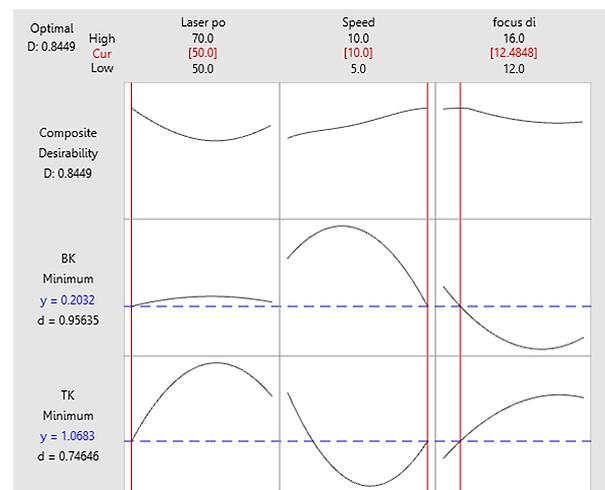
(b)

รูปที่ 8 Surface Plots ของความกว้างรอยตัดด้าน TK และด้าน BK

3.3 การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

รูปที่ 9 แสดงผลระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความกว้างรอยตัดด้าน TK และด้าน BK ที่ส่งผลให้ค่าความกว้างมีค่าต่ำที่สุด โดยกำหนดให้น้ำหนัก (Weight) ของผลตอบสนองแต่ละตัว (Responses) มีค่าเท่ากัน เพื่อแสดงว่าความกว้างรอยตัดด้านบนและด้านล่างมีความสำคัญในระดับเดียวกันต่อคุณภาพชิ้นงาน ภายใต้เงื่อนไขการตัดเดียวกัน ผลแสดงค่า Composite Desirability เท่ากับ 0.8449 ซึ่งถือว่ามีความอยู่ในระดับสูง แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้มีความสามารถในการตอบสนองต่อเป้าหมายที่ตั้งไว้ อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการวิเคราะห์ พบว่า เมื่อใช้กำลังเลเซอร์ 50% ความเร็วตัด 10 mm/min และระยะโฟกัสเท่ากับ 12.48 mm จะทำให้ได้ค่าผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งทำให้ความกว้างรอยตัดมีค่าต่ำ

ที่สุด คือ ค่า TK มีค่าต่ำสุดที่ 1.068 mm และค่า BK มีค่าต่ำสุดที่ 0.203 mm



รูปที่ 9 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความกว้างรอยตัดด้านบนและด้านล่าง

บทความวิจัย (Research Article)

#### 4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ในการตัดวัสดุ PMMA ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส ที่ส่งผลต่อความกว้างรอยตัด ด้านบนและด้านล่าง ผ่านการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบ BBD ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปัจจัยด้านกำลังเลเซอร์และความเร็วตัดเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความกว้างรอยตัด โดยความกว้างรอยตัดของ TK และ BK มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ขณะที่กำลังเลเซอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกว้างรอยตัดของ TK และ BK เพิ่มขึ้น

2. ระยะโฟกัสส่งผลต่อความกว้างรอยตัด โดยระยะโฟกัสที่ห่างจากชิ้นงานมากเกินไป ทำให้ลำแสงเลเซอร์มีการกระจายตัวมากขึ้น พื้นที่ที่ได้รับความร้อนจึงกว้างขึ้น ส่งผลให้รอยตัดบน TK และ BK มีลักษณะกว้างและไม่คม ระยะโฟกัสที่ใกล้กับชิ้นงานมากกว่าส่งผลต่อความกว้างรอยตัดที่ดีกว่า

3. ผลการวิเคราะห์ Contour และ Surface plot แสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ โดยเฉพาะกำลังเลเซอร์และความเร็วตัด ส่งผลต่อความกว้างรอยตัดอย่างชัดเจน

4. ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการตัดวัสดุ PMMA หนา 3 มม. คือ การตัดโดยใช้กำลังเลเซอร์ 50% ความเร็วตัด 10 มม./นาที และระยะโฟกัส 12.48 มม. ส่งผลให้ความกว้างรอยตัดบน TK และ BK มีค่าต่ำที่สุด

#### 5. ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. การทดลองของงานวิจัยนี้ พิจารณาเฉพาะพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และระยะโฟกัส โดยยังไม่ได้รวมปัจจัยอื่น เช่น แรงดัน

ลมตัด ความหนาของวัสดุ หรือชนิดของพอลิเมอร์ ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรมรอยตัด จึงควรศึกษาปัจจัยเหล่านี้เพิ่มเติม

2. ในงานวิจัยต่อไป หากต้องการอธิบายกลไกของการเกิดรอยตัดในเชิงลึกขึ้น ควรผนวกการวิเคราะห์เชิงความร้อนหรือการจำลองการถ่ายเทพลังงานของเลเซอร์ร่วมด้วย

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ให้กับทีมงานวิจัย งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sudarsono et al., “Design and fabrication of optical waveguide as directional coupler using CO<sub>2</sub> laser cutting on acrylic substrate,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, vol. 1153, 2019, pp. 1–6.
- [2] R. N. Hwayyin and A. S. Hammood, “Improving the properties of acrylic by creating crack using laser beam,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, vol. 579, 2019, pp. 1–10.

บทความวิจัย (Research Article)

- [3] J. D. Kechagias et al., “A generalised approach on kerf geometry prediction during CO<sub>2</sub> laser cut of PMMA thin plates using neural networks,” *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, pp. 372–393, 2021.
- [4] A. H. Elsheikh, W. Deng, and E. A. Showaib, “Improving laser cutting quality of polymethyl methacrylate sheet: Experimental investigation and optimization,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 1325–1339, 2020.
- [5] R. T. Mushtaq et al., “State-of-the-art and trends in CO<sub>2</sub> laser cutting of polymeric materials—A review,” *Materials*, vol. 13, pp. 1–23, 2020.
- [6] P. Khatak et al., “Laser cutting technique: A literature review,” in *Materials Today: Proceedings*, 2022, pp. 2484–2489.
- [7] S. S. Wangikar et al., “Parametric influence study for laser cutting on acrylic,” in *Proceedings of the National Conference on Relevance of Engineering and Science for Environment and Society*, AIJR Publisher, 2021, pp. 104–107.
- [8] M. Hashemzadeh and M. Mohammadi, “The effect of power and maximum cutting speed on the material removal rate and cutting volume efficiency in CO<sub>2</sub> laser cutting of polycarbonate sheets,” *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, vol. 9, no. 1, pp. 5–23, 2020.
- [9] A. M. Varsi and A. H. Shaikh, “Experimental and statistical study on kerf taper angle during CO<sub>2</sub> laser cutting of thermoplastic material,” *Journal of Laser Applications*, vol. 31, no. 3, 2019.
- [10] S. Ürgün et al., “Optimization of laser cutting parameters for PMMA using metaheuristic algorithms,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, no. 9, pp. 12333–12355, 2024.
- [11] K. Aydın and L. Uğur, “Prediction of kerf and groove widths in CO<sub>2</sub> laser cutting process of PMMA using experimental and machine learning methods,” *Experimental Techniques*, vol. 49, pp. 873–886, 2025.
- [12] E. Vasileska, M. Pacher, and B. Previtali, “In-line monitoring of focus shift by kerf width detection with coaxial thermal imaging during laser cutting,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 118, no. 7, pp. 2587–2600, 2022.
- [13] E. Vasileska et al., “Statistical analysis and machine learning-based modelling of kerf width in CO<sub>2</sub> laser cutting of PMMA,” *Manufacturing Technology Engineering Science and Research Journal*, vol. 24, no. 6, pp. 960–968, 2024.
- [14] M. Safari, J. Joudaki, and M. Rezaei, “Investigation of laser cutting of thin polymethyl methacrylate sheets by

บทความวิจัย (Research Article)

- response surface methodology,” *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 37, no. 3, pp. 484–495, 2024.
- [15] A. B. Khoshaim et al., “Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 11, pp. 235–246, 2021.
- [16] E. Kurt, U. E. Karaçay, and M. Tutar, “Investigation of the effect of process parameters in CO<sub>2</sub> laser cutting of PMMA material by response surface method,” *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, vol. 28, no. 2, pp. 523–536, 2023.
- [17] W. Taptimdee, B. Meesa, and P. Chourwong, “Optimal value of factors affecting surface roughness and workpiece dimension on acrylic cutting with a CO<sub>2</sub> laser cutter machine using the Taguchi method,” *Research on Modern Science and Utilizing Technological Innovation Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 1–16, 2024.
- [18] M. Moradi et al., “Effect of the focal plane position on CO<sub>2</sub> laser beam cutting of injection molded polycarbonate sheets,” in *Second International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications (ISPhOA 2016)*, SPIE, 2016, pp. 56–65.
- [19] M. Moradi et al., “Capability enhancing of CO<sub>2</sub> laser cutting for PMMA sheet using statistical modeling and optimization,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 23, pp. 1–17, 2023.
- [20] A. M. Alhawsawi et al., “Kerf characteristics during CO<sub>2</sub> laser cutting of polymeric materials: Experimental investigation and machine learning-based prediction,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 46, pp. 1–11, 2023.