

การศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและมุมเอียงในการตัดวัสดุ PMMA โดยใช้เลเซอร์ CO₂: แนวทางการออกแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

An Investigation of Parameter Effects on Surface Roughness and Kerf Taper in PMMA Cutting Using a CO₂ Laser Cutter: A Full Factorial Experimental Design Approach

วีระพล ทับทิมดี¹, ประเวศ เชื้อวงศ์² และปวีรพรต นาสวาสดี^{2*}

Weerapol Taptimdee¹, Prawach Chourwong² and Pariwat Nasawat^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

² สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์และกระบวนการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

¹ Department of Automated Manufacturing Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

² Department of Logistics and Process Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

*Email: pariwat@techno.rru.ac.th

Received: June 11, 2025; Revised: October 4, 2025; Accepted: November 14, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและมุมเอียงในการตัดวัสดุ PMMA โดยใช้เลเซอร์ CO₂ ด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ และวิเคราะห์ผลด้วย ANOVA เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ ปัจจัยควบคุมที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย 3 ปัจจัย (ปัจจัยละ 3 ระดับ) ได้แก่ ความเร็วในการตัด (3, 5, 7 มิลลิเมตรต่อวินาที), กำลังเลเซอร์ (50, 70, 90 เปอร์เซ็นต์), และ ระยะห่างหัวตัด (12, 14, 16 มิลลิเมตร) ผลการวิเคราะห์พบว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวและมุมเอียงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่กำลังเลเซอร์และผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมทั้งสามไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ชุดพารามิเตอร์ที่ให้คุณภาพการตัดที่เหมาะสมที่สุด คือ ความเร็ว 3 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังเลเซอร์ 90 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างหัวตัด 16 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ค่าความหยาบผิวต่ำที่สุดและค่ามุมเอียงใกล้เคียง 90 องศาที่สุด ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการปรับพารามิเตอร์การตัดให้เหมาะสม เพื่อยกระดับคุณภาพและประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตชิ้นงานจากวัสดุ PMMA ในทางอุตสาหกรรม

คำสำคัญ : การตัดด้วยเลเซอร์ CO₂, ความหยาบผิว, มุมเอียงของรอยตัด, การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ

Abstract

This study aims to investigate the effects of various parameters on surface roughness and kerf taper in the cutting of PMMA material using a CO₂ laser cutter. A full factorial experimental design was employed, and the results were analyzed using Analysis of Variance (ANOVA) to determine statistical significance. The three control factors considered (3 levels per factor) were: cutting speed (3, 5, 7 millimeters per second), laser power (50, 70, 90 percent), and nozzle standoff distance (12, 14, 16 millimeters). The results of the analysis found that cutting speed and nozzle standoff distance significantly affected the mean values of surface roughness and kerf angle. Meanwhile, laser power and the interaction effects among the three control variables did not significantly affect the mean differences. The set of parameters yielding the optimal cutting quality was a cutting speed of 3 millimeters per second, a laser power of 90 percent, and a nozzle standoff distance of 16 millimeters. This was the condition that resulted in the lowest surface roughness and a kerf angle closest to 90 degrees. The findings of this study can be applied in practice to optimize

cutting parameters, thereby enhancing the quality and efficiency of PMMA workpiece production processes in industrial laser cutting.

Keywords : CO₂ laser cutter, Surface roughness, Kerf taper, Full factorial experimental design

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบันที่เทคโนโลยีการผลิตมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว การคัดเลือกวัสดุและเทคนิคการแปรรูปที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของกระบวนการผลิตชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด ประณีต และมีคุณสมบัติเฉพาะตัว วัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate: PMMA) เป็นหนึ่งในวัสดุพอลิเมอร์เชิงวิศวกรรมที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง วัสดุพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกมีลักษณะเด่นหลายประการ อาทิเช่น มีความโปร่งใสสูง น้ำหนักเบา ทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลต และสามารถแปรรูปได้ง่าย เป็นต้น [1] ทำให้ PMMA ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (กันชน แผงจอ บังโคลน) อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (หน้าจอ ฝาครอบสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ) การแพทย์ และอุตสาหกรรมตกแต่งภายใน งานป้ายโฆษณาต่างๆ [2, 3] เพื่อให้สามารถขึ้นรูปหรือผลิตชิ้นงานจาก PMMA ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีการตัดวัสดุที่ให้ความแม่นยำสูงและลดความเสียหายต่อวัสดุจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะเทคโนโลยีการตัดด้วยเลเซอร์ ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

ในบรรดาเครื่องตัดเลเซอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม เครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Laser cutting machine) เป็นหนึ่งในวิธีการที่ได้รับความนิยมสูงสุดสำหรับการตัดวัสดุพอลิเมอร์ โดยเฉพาะ PMMA ซึ่งเครื่องตัดเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ มีข้อได้เปรียบสำคัญหลายประการ คือ การตัดแบบไม่สัมผัส (non-contact), ความสามารถในการตัดด้วยความเร็วสูง ความแม่นยำด้านขนาดที่ดีเยี่ยม และกระบวนการตัดสามารถทำซ้ำได้หลายครั้งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ [4, 5] นอกจากนี้ ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ CO₂ (ประมาณ 10.64 ไมโครเมตร) ยังสอดคล้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานของ PMMA ส่งผลให้การตัดมีประสิทธิภาพสูงและความเสียหายต่อเนื้อวัสดุน้อย [6, 7] การศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า K. Aydin และ L. Ugur [8] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของกำลังเลเซอร์และความเร็วในการตัดที่มีผลต่อคุณภาพของการตัดวัสดุ PMMA ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มกำลังเลเซอร์และความเร็วในการตัดสามารถปรับปรุงความแม่นยำของ

ขนาดและรูปแบบการตัดได้ในขณะที่ความกว้างของร่องตัดสามารถควบคุมได้โดยการปรับความเร็วในการตัดและกำลังเลเซอร์ Varsi A และ Shaikh A [9] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองและเชิงสถิติเกี่ยวกับมุมเอียงของรอยตัดระหว่างการตัดด้วยเลเซอร์ CO₂ ของวัสดุเทอร์โมพลาสติก โดยพิจารณาปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด จำนวนรอบการตัด ที่ส่งผลต่อมุมเอียงของรอยตัดชิ้นงาน PMMA พบว่า กำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และจำนวนรอบมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมุมเอียงของรอยตัด ยิ่งกำลังเลเซอร์สูง ความเร็วตัดต่ำลง และจำนวนรอบของการตัดสูง ก็ยิ่งส่งผลให้มุมเอียงของรอยตัดมีค่าต่ำลง kurt และคณะ [10] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของกำลังเลเซอร์ ความเร็วตัด และจุดโฟกัสต่อความกว้างของรอยตัด โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นว่า ความกว้างของรอยตัดได้รับผลกระทบอย่างมากจากจุดโฟกัส รวมถึงความเร็วตัดและกำลังเลเซอร์อีกด้วย อย่างไรก็ตามคุณภาพของการตัดขึ้นอยู่กับหลายพารามิเตอร์ เช่น กำลังเลเซอร์ (laser power), ความเร็วในการตัด (cutting speed), ขนาดหัวตัด (Nozzle dimension) และระยะห่างระหว่างหัวตัดกับชิ้นงาน (Nozzle stand-off distance) ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์สามารถส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานได้ เช่น ขนาดของร่องตัด (kerf width), ความหยาบผิว (surface roughness) เป็นต้น [11] หากพารามิเตอร์ถูกตั้งค่าไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ร่องตัดโตเกินไป ร่องตัดไม่สม่ำเสมอ รอยตัดเอียงไม่ได้ฉาก ผิวไม่เรียบ หรือเกิดเศษวัสดุเกาะที่บริเวณตัด เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ และการหาค่าที่เหมาะสม จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการยกระดับคุณภาพของชิ้นงานและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การตัดได้อย่างครอบคลุมและเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลกระทบของกำลังเลเซอร์และความเร็วในการตัดต่อคุณภาพของการตัด PMMA ด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยนำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) มาใช้ในการวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วย ANOVA การ

ออกแบบลักษณะนี้มีจุดเด่นในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยแบบเดี่ยวและแบบปฏิสัมพันธ์ (interaction effects) ระหว่างตัวแปรต้นหลายๆ ตัวแปรในเวลาเดียวกัน โดยสามารถคำนวณความแปรปรวน และทดสอบนัยสำคัญทางสถิติได้อย่างแม่นยำ [12] การวิเคราะห์เชิงสถิติในรูปแบบดังกล่าวได้รับความนิยมในงานวิจัยด้านกระบวนการผลิตและวัสดุศาสตร์ เนื่องจากสามารถนำไปสู่การหาชุดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตจริง [9, 13] ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำและเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและเครื่องมือในการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ วัสดุหลักที่ใช้คือ โพลีเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate: PMMA) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความโปร่งใส มีความแข็งแรงเชิงกลในระดับที่เหมาะสม และสามารถตัดหรือขึ้นรูปได้ง่าย วัสดุ PMMA ที่ใช้มีความหนา 5 มิลลิเมตร และนำมาตัดให้เป็นชิ้นงานขนาด 20×20 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทดลอง

การตัดชิ้นงานดำเนินการโดยใช้เครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Laser Cutter machine) ในงานวิจัยนี้จะใช้คำว่า “เครื่องตัดเลเซอร์ CO₂” แทน “เครื่องตัดเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์” โดยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ที่ใช้คือ รุ่น AKJ1390 จากบริษัท ACCTEK ซึ่งเป็นเครื่องตัดเลเซอร์ที่ใช้แหล่งกำเนิดลำแสงจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ลำแสงเลเซอร์จากเครื่องนี้สามารถให้พลังงานสูงเพียงพอสำหรับการหลอมละลายและการระเหิดของ PMMA ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ รุ่นดังกล่าว แสดงไว้ในตารางที่ 1 และลักษณะของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ แสดงไว้ในรูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [14]

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดของเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂

Description	Parameter
Model	AKJ-1390
Laser medium	CO ₂
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	3phase Stepper motor and driver
Cooling system	Water-cooling



รูปที่ 1 เครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ ที่ใช้ในงานวิจัย

2.2 การทดสอบค่าความหยาบผิว

การวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องมือวัดความหยาบผิวแบบพกพา รุ่น SJ-210 (Mitutoyo, Japan) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ระบบหัววัดแบบสไตลัส (stylus-type) โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินผลคือค่า Rz ซึ่งนิยามว่าเป็นผลรวมของค่าเฉลี่ยความสูงของยอดสูงสุดห้าอันดับแรก และความลึกของร่องต่ำสุดห้าอันดับแรกภายในช่วงการวัดหนึ่งช่วง (sampling length) ตามนิยามในมาตรฐาน ISO 4287 และ JIS B0601 ค่าดังกล่าวเป็นดัชนีที่เหมาะสมในการแสดงลักษณะความขรุขระของผิววัสดุ ก่อนทำการวัดชิ้นงานจะได้รับการทำความสะอาดและจัดวางให้อยู่ในตำแหน่งที่มั่นคงเพื่อลดผลกระทบจากการสั่นสะเทือน การวัดดำเนินการโดยให้หัววัดเคลื่อนที่ในแนวขนานกับพื้นผิวของชิ้นงาน เพื่อบันทึกรูปแบบของผิวและประมวลผลเป็นค่าความหยาบผิว ทั้งนี้ตำแหน่งในการวัดถูกกำหนดให้ครอบคลุมพื้นผิวทั้งสี่ด้านของชิ้นงาน โดยแต่ละด้านทำการวัดจำนวน 2 ตำแหน่ง รวมเป็น 8 ตำแหน่งต่อชิ้นงาน เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการวัด ผลที่ได้จะนำมาหาค่าเฉลี่ยความหยาบผิว

2.3 การทดสอบมุมเอียง

การทดสอบหาค่ามุมเอียงในงานวิจัยนี้ ดำเนินการวัดด้วยเครื่องวัดขนาดชิ้นงานแบบแสงเงา (Profile Projector) ยี่ห้อ Starrett รุ่น 400 Series เป็นกระบวนการตรวจสอบค่ามุมของชิ้นงานโดยอาศัยการฉายเงาของชิ้นงานขยายลงบนหน้าจอที่มีสเกลมุมอย่างแม่นยำ โดยวางชิ้นทดสอบบนแท่นวางซึ่งสามารถปรับตำแหน่งได้ในระนาบ XY แสงจากแหล่งกำเนิดจะส่องผ่านชิ้นงานผ่านชุดเลนส์ก่อนฉายภาพลงบนหน้าจอวงกลมที่มีสเกลเชิงมุมและเส้นอ้างอิง ผู้ปฏิบัติงาน

จะทำการหมุนภาพที่ฉายให้แนวเส้นอ้างอิงบนหน้าจออยู่ในแนวเดียวกับขอบที่ต้องการวัดของชิ้นงาน จากนั้นอ่านค่ามุมที่แสดงบนสเกลหรือตัวแสดงผลดิจิทัลของเครื่องวัด สำหรับการประเมินความเที่ยงตรงของรูปทรงชิ้นงาน ดำเนินการวัดมุมทั้งสี่ด้านของชิ้นทดสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลค่ามุมครบถ้วน และสามารถนำไปวิเคราะห์ความถูกต้องของการผลิตหรือการแปรรูปชิ้นงานได้อย่างเป็นระบบ

2.4 สถิติที่ใช้ในงานวิจัย

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของแต่ละพารามิเตอร์ได้อย่างละเอียดถี่ถ้วน งานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยให้สามารถประเมินผลของแต่ละปัจจัยรวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยได้อย่างครบถ้วน โดยกำหนดปัจจัยในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังตารางที่ 2 การทดลองมีจำนวนทั้งสิ้น 27 ชุดการทดลอง (3^3) โดยใช้การทดลองแบบสุ่ม เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและลดผลกระทบจากความแปรปรวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนและระบุค่าที่เหมาะสมของแต่ละพารามิเตอร์ได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (+1)	
ความเร็วในการตัด	3	5	7	mm/sec
กำลังเลเซอร์	50	70	90	%
ระยะห่าง Nozzle	12	14	16	mm
ตัวแปรตอบสนอง	ความหยาบผิว มุมเอียงเฉลี่ย			

ตารางที่ 3 ผลของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและมุมเอียงเฉลี่ย

Run	ความเร็วในการตัด (mm/sec)	กำลังเลเซอร์สูงสุด (%)	ระยะห่าง Nozzle (mm)	ความหยาบผิว เฉลี่ย (μm)	มุมเอียงเฉลี่ย (องศา)
1	5	90	14	1.367	90.77
2	5	50	12	1.001	90.65
3	3	70	16	0.768	90.45
4	3	90	16	0.769	90.04
5	7	90	16	2.068	91.24
6	3	50	14	0.808	90.15
7	7	70	16	1.702	91.21
8	7	70	14	1.642	90.92
9	3	70	14	1.705	90.45
10	5	90	12	1.239	90.59
11	7	90	12	1.611	90.77
12	5	70	16	1.516	91.17

2.5 การยืนยันผลการทดลอง

เมื่อได้ปัจจัยการทดลองที่ทำให้ค่าความหยาบผิวต่ำที่สุด และมุมเอียงเข้าใกล้ 90 องศาที่สุดแล้ว เพื่อยืนยันผลความถูกต้องของการทดลอง ชิ้นงานใหม่จำนวน 10 ชิ้นจะถูกตัดเพื่อวัดค่าความหยาบผิว (8 ตำแหน่งต่อชิ้นงาน) และมุมเอียง (4 ตำแหน่งต่อชิ้นงาน) จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อน กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลของค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ย

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) เพื่อประเมินผลกระทบหลัก (Main Effects) และผลกระทบจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects) ของตัวแปรควบคุม 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วในการตัด, กำลังเลเซอร์, และระยะห่างหัวตัด ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม 2 ตัว คือ ค่าความหยาบผิวและมุมเอียงของชิ้นงาน ชิ้นงานจำนวน 27 ชิ้น จะถูกตัดด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ โดยมีการปรับระดับปัจจัยต่างๆ ตามลำดับ (Run) ในแผนการทดลองที่ออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดค่าความหยาบผิวและมุมเอียง เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามทั้งสอง ซึ่งผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและมุมเอียงเฉลี่ย แสดงในตารางที่ 3

Run	ความเร็วในการตัด (mm/sec)	กำลังเลเซอร์สูงสุด (%)	ระยะห่าง Nozzle (mm)	ความหยาบผิว เฉลี่ย (μm)	มุมเอียงเฉลี่ย (องศา)
13	3	90	12	0.556	90.32
14	5	50	14	1.459	90.79
15	7	90	14	1.783	91.01
16	3	50	12	0.746	90.59
17	5	70	14	1.202	90.70
18	7	50	14	1.385	91.13
19	5	50	16	1.544	90.90
20	3	90	14	0.736	90.45
21	7	50	12	1.111	90.63
22	5	70	12	1.104	90.44
23	3	70	12	0.645	90.50
24	5	90	16	1.291	91.09
25	7	70	12	1.447	90.79
26	3	50	16	0.832	90.14
27	7	50	16	1.854	91.57

3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

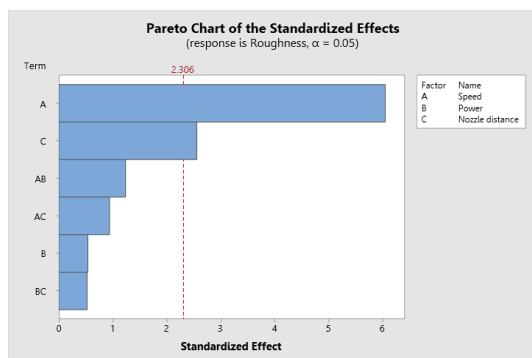
ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าความหยาบผิวเฉลี่ย พบว่า รูปแบบ (Model) โดยรวมมีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและสามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าความหยาบผิวได้ถึง 90.74 เปอร์เซ็นต์ (R^2) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลกระทบหลัก (Main effect) ของแต่ละปัจจัย พบว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กำลังเลเซอร์ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ผลจากปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effects)

ระหว่างตัวแปรควบคุมทั้งสามคู่ (ความเร็วในการตัด*กำลังเลเซอร์, ความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด, กำลังเลเซอร์*ระยะห่างหัวตัด) ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (ทุกคู่มี P-value > 0.05) ซึ่งบ่งชี้ว่า ผลกระทบหลักของแต่ละปัจจัยสามารถพิจารณาแยกกันได้โดยไม่มีปฏิสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับความเร็วในการตัดมีค่า F-value สูงที่สุดในบรรดาปัจจัยหลักทั้งหมด ซึ่งบ่งชี้ว่าความเร็วในการตัดมีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเทียบกับระยะห่างหัวตัดและกำลังเลเซอร์ สำหรับค่า $R^2(\text{adj})$ ที่ 69.89 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า โมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าความหยาบผิวได้ในระดับที่ค่อนข้างดี

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	18	4.16527	0.23140	4.35	0.020
Linear	6	3.40528	0.56755	10.68	0.002
ความเร็วในการตัด (A)	2	2.78210	1.39105	26.16	0.000
กำลังเลเซอร์ (B)	2	0.05708	0.02854	0.54	0.604
ระยะห่างหัวตัด (C)	2	0.56610	0.28305	5.32	0.034
2-Way Interactions	12	0.75999	0.06333	1.19	0.413
ความเร็วในการตัด*กำลังเลเซอร์ (AB)	4	0.35294	0.08823	1.66	0.251
ความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด (AC)	4	0.25884	0.06471	1.22	0.375
กำลังเลเซอร์*ระยะห่างหัวตัด (BC)	4	0.14822	0.03705	0.70	0.615
Error	8	0.42532	0.05316		
Total	26	4.59059			
S=0.230575		R-sq=90.74%		R-sq(adj)= 69.89	

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 4 ที่ระบุว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันและสอดคล้องกับแผนภาพพาเรโตของผลกระทบแบบมาตรฐานของค่าความหยาบผิว (รูปที่ 2) โดยความเร็วในการตัด (A) มีความยาวของแท่งกราฟเกินเส้นอ้างอิง (2.306 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha=0.05$) มากที่สุด บ่งชี้ว่าความเร็วในการตัดมีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นๆ ส่วนระยะห่างหัวตัด (C) นั้นมีแท่งกราฟที่มีความยาวเกินเส้นอ้างอิงเช่นกัน ยืนยันว่าปัจจัยนี้ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกัน ในขณะที่กำลังเลเซอร์ (B) และผลจากปฏิสัมพันธ์ (AB, AC, BC) มีความยาวของแท่งกราฟสั้นกว่าเส้นอ้างอิงอย่างชัดเจน ซึ่งยืนยันว่าปัจจัยเหล่านี้ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ การสังเกตนี้สอดคล้องกับค่า P-value ที่สูงกว่า 0.05 ดังนั้นทั้งตารางที่ 4 และรูปที่ 2 จึงให้ข้อสรุปที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยชี้ให้เห็นว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กำลังเลเซอร์และผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ไม่มีผลกระทบต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 2 แผนภาพพาเรโตแสดงผลกระทบแบบมาตรฐานของค่าความหยาบผิว

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของมุมเอียงเฉลี่ย

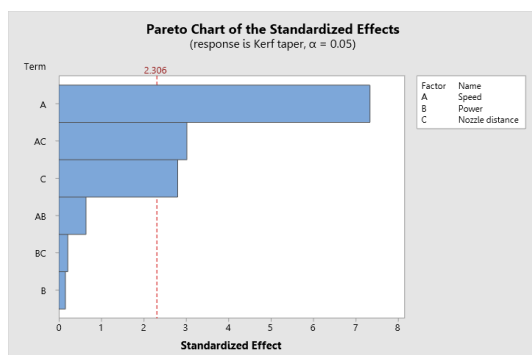
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	18	3.35878	0.18660	6.51	0.005
Linear	6	2.54984	0.42497	14.82	0.001
ความเร็วในการตัด (A)	2	2.18450	1.09225	38.09	0.000
กำลังเลเซอร์ (B)	2	0.00747	0.00374	0.13	0.880
ระยะห่างหัวตัด (C)	2	0.35787	0.17894	6.24	0.023
2-Way Interactions	12	0.80893	0.06741	2.35	0.116
ความเร็วในการตัด*กำลังเลเซอร์ (AB)	4	0.09588	0.02397	0.84	0.539
ความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด (AC)	4	0.67308	0.16827	5.87	0.017

3.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับมุมเอียงเฉลี่ย

จากตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับมุมเอียงเฉลี่ย พบว่า รูปแบบ (Model) โดยรวมมีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสามารถอธิบายความแปรปรวนของค่ามุมเอียงได้ถึง 93.61 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาผลกระทบหลัก (Main Effect) ของแต่ละปัจจัย พบว่า ความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกัน ในขณะที่กำลังเลเซอร์ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ย นอกจากนี้ผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมพบว่า มีเพียงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัดเท่านั้นที่ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกัน ส่วนปฏิสัมพันธ์อื่นๆ ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ค่า F-value สำหรับความเร็วในการตัดมีค่าสูงที่สุดในบรรดาปัจจัยทั้งหมด บ่งชี้ว่า ความเร็วในการตัดมีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาคือปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัดและระยะห่างหัวตัด และระยะห่างหัวตัด ตามลำดับค่า R-sq(adj) ที่ 79.22 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่ามุมเอียงได้ในระดับที่ดี

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
กำลังเลเซอร์*ระยะห่างหัวตัด (BC)	4	0.03997	0.00999	0.35	0.838
Error	8	0.22941	0.02868		
Total	26	3.58819			
S=0.169340		R-sq=93.61%	R-sq(adj)= 79.22%		

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังตารางที่ 5 ที่ระบุว่า ความเร็วในการตัด (A) และระยะห่างหัวตัด (C) รวมถึงผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด (AC) ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและสอดคล้องกับแผนภาพพาเรโตของผลกระทบแบบมาตรฐาน (รูปที่ 3) โดยความเร็วในการตัด (A) มีความยาวของแท่งกราฟเกินเส้นอ้างอิง (2.306 ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha=0.05$) มากที่สุด บ่งชี้ว่าปัจจัยนี้มีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ยมากที่สุด ระยะห่างหัวตัด (C) และผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด (AC) มีแท่งกราฟที่มีความยาวเกินเส้นอ้างอิงเช่นกัน ยืนยันว่าปัจจัยทั้งสองนี้ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกัน ในขณะที่กำลังเลเซอร์ (B) และผลจากปฏิสัมพันธ์อื่นๆ (AB, BC) มีความยาวของแท่งกราฟสั้นกว่าเส้นอ้างอิงอย่างชัดเจน ซึ่งยืนยันว่าปัจจัยเหล่านี้ไม่มีผลต่อความแตกต่างของค่ามุมเอียงเฉลี่ย การสังเกตนี้สอดคล้องกับค่า P-value ที่สูงกว่า 0.05 ในตาราง ANOVA ดังนั้นทั้งตารางที่ 5 และรูปที่ 3 จึงให้ข้อสรุปที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยชี้ให้เห็นว่าความเร็วในการตัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีผลจากระยะห่างหัวตัด (C) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัด*ระยะห่างหัวตัด (AC) ที่ส่งผลให้ค่ามุมเอียงเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอีกด้วย



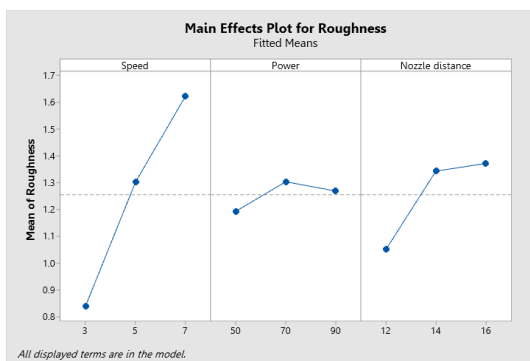
รูปที่ 3 แผนภูมิพาเรโตแสดงผลกระทบแบบมาตรฐานของความเร็วในการตัดในการตัด กำลังเลเซอร์และระยะห่างหัวตัด ต่อมุมเอียง

3.4 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบหลักสำหรับค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ย

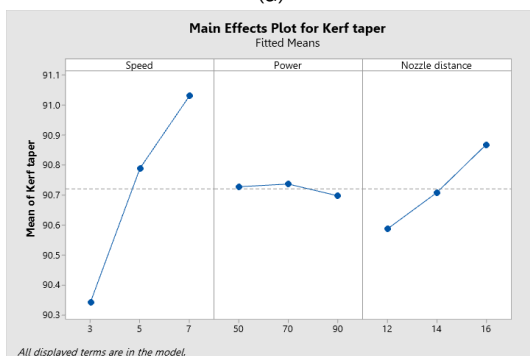
รูปที่ 4(a) แสดงผลการวิเคราะห์กราฟผลกระทบหลักสำหรับค่าความหยาบผิว (Main Effects Plot for Roughness) พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อค่าความหยาบผิว คือ ความเร็วในการตัด โดยเมื่อเพิ่มความเร็วในการตัดจาก 3 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็น 7 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 0.84 เป็น 1.62 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการตัดที่สูงขึ้นทำให้คุณภาพผิวงานลดลง เนื่องจากเวลาในการสัมผัสระหว่างลำแสงเลเซอร์กับชิ้นงานลดลง ส่งผลให้เกิดความไม่เรียบเนียนบนพื้นผิว [15, 16] สำหรับปัจจัยกำลังเลเซอร์ พบว่า มีผลกระทบต่อความหยาบผิวเพียงเล็กน้อย โดยค่าความหยาบผิวเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อกำลังเลเซอร์เพิ่มขึ้นจาก 50 เปอร์เซ็นต์ เป็น 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงอิทธิพลในระดับต่ำในช่วงค่าที่ทำการทดลอง ส่วนปัจจัยด้านระยะห่างหัวตัด ส่งผลต่อความหยาบผิวในระดับปานกลาง โดยค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นตามระยะห่างหัวตัดที่มากขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าระยะห่างหัวตัดมีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญและอาจมีระยะที่เหมาะสมในการลดความหยาบของพื้นผิว ทั้งนี้ลักษณะของเส้นกราฟช่วยยืนยันว่า ความชันของแต่ละปัจจัยสะท้อนถึงระดับผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวโดยที่ความเร็วในการตัดมีความชันสูงสุด รองลงมาคือระยะห่างหัวตัดและต่ำสุดคือกำลังเลเซอร์ จากข้อมูลนี้อาจกล่าวได้ว่า การควบคุมความเร็วในการตัดของเครื่องจักรมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน

รูปที่ 4(b) แสดงผลการวิเคราะห์จากกราฟผลกระทบปัจจัยหลักสำหรับมุมเอียง (Main Effects Plot for kerf Taper) สามารถอธิบายได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่ามุมเอียงอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุดคือ ความเร็วในการตัด โดยเมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นจาก 3 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็น 7 มิลลิเมตรต่อวินาที ค่าเฉลี่ยของมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 90.34 องศา เป็น 91.03 องศา แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการตัดที่สูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงมากขึ้น อาจเนื่องจากการเร่งความเร็วในการตัดของกระบวนการทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของการตัด [17, 18] ส่วนกำลัง

เลเซอร์มีแนวโน้มส่งผลต่อมุมเอียงในระดับต่ำ ค่าเฉลี่ยของมุมเอียงมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกและลดลงเล็กน้อยในช่วงหลัง แสดงให้เห็นว่า กำลังเลเซอร์อาจมีอิทธิพลต่อมุมเอียงไม่มากนักในช่วงนี้ หรืออาจมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยเส้นกราฟค่อนข้างแบนแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงของค่ามุมเอียงเฉลี่ยที่ไม่มากนักในช่วงกำลังเลเซอร์อยู่ระหว่าง 50 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kerchagias [3] ที่กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงกำลังของเลเซอร์ ไม่ส่งผลต่อลักษณะของรอยตัด ด้านระยะห่างหัวตัดมีผลกระทบในระดับปานกลางต่อมุมเอียงโดยพบว่า การเพิ่มระยะห่างของหัวตัดจาก 12 มิลลิเมตร เป็น 16 มิลลิเมตร ทำให้ค่ามุมเอียงเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการกระจายของพลังงานหรือทิศทางของการตัดวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อตำแหน่งหัวตัดอยู่ไกลจากชิ้นงาน [19] ข้อมูลจากกราฟชี้ให้เห็นว่า การควบคุมความเร็วในการตัดของกระบวนการเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรให้ความสำคัญอย่างยิ่งเมื่อต้องการควบคุมค่ามุมเอียงให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม



(a)

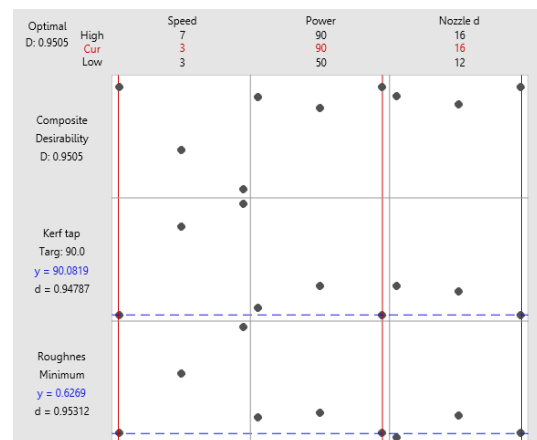


(b)

รูปที่ 4 ผลกระทบของปัจจัยหลักต่อ (a) ค่าความหยาบผิว และ (b) มุมเอียง

3.5 ผลการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ย

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ Response Optimization นี้แสดงให้เห็นถึงการหาค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่า Composite Desirability สูงสุดที่ 0.9692 ตัวแปรควบคุมที่พิจารณา คือ ความเร็วในการตัด, กำลังเลเซอร์ และ ระยะห่างหัวตัด ซึ่งมีค่าปัจจุบัน (Cur) อยู่ที่ 3, 90 และ 16 ตามลำดับ โดยมีช่วงค่าสูง (High) และค่าต่ำ (Low) กำกับไว้ กราฟด้านบนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Desirability ของแต่ละ Response (มุมเอียงและความหยาบผิว) กับค่าตัวแปรควบคุมแต่ละตัว โดยเส้นประสีน้ำเงินแสดงค่าเป้าหมาย (Target = 90) ของมุมเอียงที่ 90.0819 และค่าความหยาบผิว (Minimum) ที่ 0.6269 จุดสีแดงแสดงค่า Desirability ที่สอดคล้องกับค่าตัวแปรควบคุมแต่ละชุด จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าตัวแปรควบคุมปัจจุบันให้ค่า Desirability สำหรับมุมเอียงเท่ากับ 0.94787 และสำหรับความหยาบผิวเท่ากับ 0.95312 ซึ่งเมื่อนำมารวมกันเป็น Composite Desirability ได้ค่าสูงถึง 0.9505 บ่งชี้ว่าค่าตัวแปรควบคุมปัจจุบันนี้เป็นชุดค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ทำให้ได้ค่ามุมเอียงและความหยาบผิวที่ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้มากที่สุด



รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบหาค่าที่เหมาะสมของค่าความหยาบผิวและมุมเอียงต่ำสุด

3.6 ยืนยันผลการทดลอง

ผลจากการทดสอบหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการตัดวัสดุ PMMA ที่ทำให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดและมุมเอียงเข้าใกล้ 90 องศาที่สุด (รูปที่ 5) คือ การตัดที่ใช้ความเร็วในการตัด 3 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังเลเซอร์ 90 เปอร์เซ็นต์ และ ระยะห่างหัวตัด 16 มิลลิเมตร ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกนำไปปรับตั้งบน เครื่องตัดเลเซอร์ CO₂ และทำการตัดชิ้นงานใหม่อีกครั้งจำนวน 10 ชิ้น และดำเนินการวัดค่าความหยาบผิว

และมุมเอียงซ้ำ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวัดค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ยซ้ำ แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวัดค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ยซ้ำ

	ชิ้นงานตัวอย่าง										Average	S.D.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
ความหยาบ												
ผิว	0.652	0.736	0.916	0.625	0.672	0.437	0.723	0.811	0.452	0.584	0.661	0.148
มุมเอียง	90.23	89.76	90.31	90.57	89.55	90.12	90.73	90.12	89.66	90.22	90.127	0.378

จากตารางที่ 6 ผลการวัดซ้ำเพื่อหาค่าความหยาบผิวและมุมเอียงเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชิ้นงานตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานตัวอย่างทั้ง 10 ชิ้น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.661 ไมโครเมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.148 ซึ่งแตกต่างจากค่าความหยาบผิวที่ได้จากค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม (0.6269) อยู่ 0.0341 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 5.44 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และมุมเอียงของชิ้นงานตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 90.127 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.378 ซึ่งแตกต่างจากมุมเอียงที่ได้จากค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสม (90.0819) อยู่ 0.045 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.05 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการตัดของวัสดุ PMMA โดยใช้เลเซอร์ CO₂ ปัจจัยควบคุมที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วในการตัด กำลังเลเซอร์และระยะห่างหัวตัด ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและมุมเอียง โดยใช้การออกแบบแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับความหยาบผิวและมุมเอียง พบว่า ปัจจัยด้านความเร็วตัดและระยะห่างหัวตัดมีผลต่อความแตกต่างของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและมุมเอียงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่กำลังเลเซอร์และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุมทั้งสาม ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ

2. เมื่อพิจารณากราฟอิทธิพลหลักของความหยาบผิวและมุมเอียง พบว่า ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) กล่าวคือ ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อค่าความหยาบผิวและมุมเอียง คือ ความเร็วในการตัด ความเร็วในการตัดที่สูงขึ้นทำให้ความหยาบผิวเฉลี่ยมุมเอียงเพิ่มมากขึ้น

3. ค่าที่เหมาะสมสำหรับการตัด PMMA ที่ทำให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดและมุมเอียงเข้าใกล้ 90 องศาที่สุดคือ การตัดที่ความเร็วตัด 3 มิลลิเมตรต่อวินาที กำลังเลเซอร์ 90 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างหัวตัด 16 มิลลิเมตร

4. การทดสอบเพื่อยืนยันผล พบว่า ค่าความหยาบผิวและมุมเอียงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

5. ข้อเสนอแนะ

1. ในการพิจารณาตัวแปรควบคุม อาจนำปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดเลเซอร์มาพิจารณาเพิ่มเติม เช่น ความดันก๊าซ ชนิดของก๊าซช่วยตัด ขนาดรู Nozzle จำนวนครั้งการตัด เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพการตัดบนวัสดุ PMMA

2. ควรมีการพิจารณาตัวแปรตอบสนองที่สำคัญต่อคุณภาพชิ้นงานอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น อัตราการกำจัดวัสดุ, HAZ หรือความถูกต้องของขนาดหลังการตัด เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดความหยาบผิว ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดขนาดชิ้นงานแบบแสงเงา (Profile projector) และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต อัตโนมติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ให้กับทีมงานวิจัย งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยต่อไปในอนาคต ผู้เขียนเสนอให้ใช้เครือข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายลักษณะรอยตัดเพิ่มเติม เช่น ขนาดร่องตัดเฉลี่ยและความลึกของโซน HAZ นอกจากนี้ ยังแนะนำให้ศึกษาเรื่องความหนาของ PMMA เพิ่มเติมอีกด้วย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Sudarsono, Y. Gatut, S. Hasto, P. Gontjang, A. Diky, P. Nurrisma, I. Susilo, F. Iim, A. Yunus and H. Yono, "Design and fabrication of optical waveguide as directional coupler using laser cutting CO₂ on acrylic substrate," *Journal of Physics Conference Series*, vol.1153, no.1, 2019.
- [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, April. 10-11, 2019, pp. 1-10.
- [3] J. D. Kechagias, K. Ninikas, P. Stavropoulos, and K. Salonitis, "A Generalised Approach on Kerf Geometry Prediction during CO₂ Laser cut of PMMA Thin Plates using Neural Networks," *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 3, Aug. 2021, pp. 372-393.
- [4] S. S. Wangikar, M. M. Dixit, S. G. Wadekar, H. R. Nagtilak, N. D. Hingmire, and D. P. Shinde, "Parametric Influence Study for Laser Cutting on Acrylic," in *Proceedings of National Conference on Relevance of Engineering and Science for Environment and Society*, AIJR Publisher, July. 25, 2021, pp. 104-107.
- [5] M. Moradi, M. Moghadam, M. Shamsborhan, Z. Beiranvand, A. Rasouli, M. Vahdati, A. Bakhtiari and M. Bodaghi, "Simulation, statistical modeling, and optimization of CO₂ laser cutting process of polycarbonate sheets," *Optik (Stuttgart)*, vol. 225, Jan. 2021, Art. no. 164932.
- [6] S. Ürgün, H. Yiğit, S. Fidan, and T. Sinmazçelik, "Optimization of Laser Cutting Parameters for PMMA Using Metaheuristic Algorithms," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, no. 9, Sep. 2024, pp. 12333-12355.
- [7] M. Moradi, M. Rezayat, S. Meiabadi, M. Karamimoghadam, S. Hillyard, A. Mateo, G. Casalino, Z. Tanveer, M. Adnan Manzoor, M. Iqbal and O. Razmkhah, "Capability Enhancing of CO₂ Laser Cutting for PMMA Sheet Using Statistical Modeling and Optimization," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 23, Dec. 2023, Art. no. 12601.
- [8] K. Aydin and L. Uğur, "Prediction of Kerf and Groove Widths in CO₂ Laser Cutting Process of PMMA Using Experimental and Machine Learning Methods," *Exp Tech*, vol. 49, no.17, pp. 873-886, Mar.2025.
- [9] A. M. Varsi and A. H. Shaikh, "Experimental and statistical study on kerf taper angle during CO₂ laser cutting of thermoplastic material," *J Laser Appl*, vol. 31, no. 3, Aug. 2019, Art. no. 032010.
- [10] E. KURT, U. E. KARAÇAY, and M. TUTAR, "Investigation of the effect of process parameters in Co₂ laser cutting of PMMA material by response surface method," *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, vol. 28, no. 2, Art. no. 20223
- [11] S. S. Patel, V. H. Patel, K. M. Patel, B. A. Patel, A. A. Patel, and S. C. Patel, "Experimental Analysis of Laser Cutting Machine," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 10, no. 04, pp. 129-135, April. 2021.
- [12] Douglas C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. John Wiley & Sons, 2017.
- [13] A. B. Khoshaim, A. H. Elsheikh, E. B. Moustafa, M. Basha, and E. A. Showailb, "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, Mar. 2021.
- [14] W. Taptimdee, B. Meesa, and P. Chourwong, "Optimal Value of Factors affecting Surface Roughness and Workpiece Dimension on Acrylic Cutting with a CO₂ Laser Cutter Machine Using the Taguchi Method," *Research on Modern science and Utilizing Technological Innovation Journal (RMUTI Journal) RMUTI Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 1-16, Jun. 2024.

- [15] K. Ninikas, J. Kechagias, and K. Salonitis, "The impact of process parameters on surface roughness and dimensional accuracy during CO₂ laser cutting of PMMA thin sheets," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 5, no. 3, pp. 1-12, Sep. 2021.
- [16] N. S. Isnin, S. M. F. Sh Abdul Nasir, A. R. Hemdi, H. Ismail, H. Yusoff, and R. Nurmalasari, "The effect of CO₂ laser engraves parameters on surface roughness on polymethylmethacrylate (PMMA)," *Jurnal Mekanikal*, vol. 46, no. 2, pp. 114-121, Nov. 2023.
- [17] A. H. Elsheikh, W. Deng, and E. A. Showaib, "Improving laser cutting quality of polymethylmethacrylate sheet: Experimental investigation and optimization," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 1325-1339, Mar. 2020.
- [18] A. K. Ghavidel and M. Zadshakoyan, "Comprehensive study of laser cutting effects on the properties of acrylonitrile butadiene styrene," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, no. 3, pp. 3637-3653, Aug. 2018.
- [19] E. Vasileska, O. Tuteski, B. Kusigerski, A. Argilovski, M. Tomov, and V. Gecevska, "Statistical analysis and machine learning-based modelling of kerf width in CO₂ laser cutting of PMMA," *Manufacturing Technology*, vol. 24, no. 6, pp. 960-968, Dec. 2024.