

การวิเคราะห์ปัจจัยกระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงต่อความหยาบผิวของเหล็กกล้า SKD 11

Analysis of Water Jet Cutting Parameters on Surface Roughness of SKD 11 Steel

ธนศักดิ์ รัตนพุทธรูป¹ สุรพจน์ วัชรโรภากุล^{1*} รุ่งวสันต์ ไกรกลาง¹ ฉากง เชื้อดี¹

สุรัตน์ วรรณศรี¹ สุรศักดิ์ มะธิโตปะนา¹ และ ภาณุกร บุญสุข¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุนทรารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

Thanasak Rattanapootapiboon¹ Suraphot Watcharophakul^{1*} Rungwasun Kraiklang¹ Chakat Chueadee¹

Surat Wannasri¹ Surasak Matitopatum¹ and Phanukorn Bunsuk¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan

744 Sura Narai Rd, Ban Ko, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima 30000

*Corresponding author E-mail: thanasak.ra@rmu.ac.th

(Received: June 11, 2025; Revise: June 27, 2025; Accepted: June 27, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ แรงดันน้ำ ความเร็วตัด ระยะยกหัวตัด และชนิดของสารขัด ที่มีผลต่อความหยาบผิวของเหล็กกล้า SKD 11 ในกระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูงผสมสารขัด โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวน (ANOVA) ผลจากการวิจัยพบว่า ปัจจัยทั้งสี่มีผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) โดยค่าความหยาบผิวที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วง 3.21 ถึง 4.75 ไมโครเมตร โดยเงื่อนไขที่ส่งผลให้มีค่าความหยาบผิวต่ำสุด ได้แก่ แรงดันน้ำ 35,000 PSI ความเร็วตัด 20 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะยกหัวตัด 1.64 มิลลิเมตร และใช้สารขัดโกเมน II โดยแบบจำลองที่ได้มีค่าความแม่นยำสูง ($R^2 = 88.36\%$ และ Adjusted $R^2 = 81.03\%$) ผลจากการศึกษางานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการตัดด้วยแรงดันน้ำสูงผสมสารขัด เพื่อควบคุมคุณภาพผิวงานและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

คำหลัก ความหยาบผิว การตัดด้วยแรงดันน้ำสูง การออกแบบการทดลอง และบล็อกซ์-เบห์นเคน

Abstract

This research aims to investigate the effects of various factors, including water pressure, cutting speed, stand-off distance, and abrasive type, on the surface roughness of SKD 11 tool steel in the abrasive water jet cutting process. The study applied the Box-Behnken Design (BBD) for experimental design and employed Analysis of Variance (ANOVA) for statistical analysis. The results indicated that all four factors significantly influenced surface roughness ($p\text{-value} < 0.05$), with surface roughness values ranging between 3.21 and 4.75 micrometers. The optimal conditions for achieving the lowest surface roughness were a water pressure of 35,000 Psi, a cutting speed of 20 mm/min, a stand-off distance of 1.64 mm, and the use of Garnet II Abrasive.

The developed model demonstrated high accuracy with an R^2 of 88.36% and an Adjusted R^2 of 81.03%. The findings of this study can be applied as guidelines for selecting appropriate parameters in abrasive waterjet cutting processes to control surface quality and enhance production efficiency.

Keywords: Surface roughness, water jet cutting, Design of experiment, and Box–Behnken Design

1. บทนำ

1.1 ที่มาความสำคัญของงานวิจัย

ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนโลหะที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น แม่พิมพ์ปั๊ม แม่พิมพ์ดัด และแม่พิมพ์ขึ้นรูปเย็น วัสดุที่นิยมนำมาใช้ คือ เหล็กกล้า SKD 11 เนื่องจากมีคุณสมบัติความแข็งแรง ทนต่อการสึกหรอ และสามารถชุบแข็งได้ดี [1] ซึ่งในกระบวนการตัดแต่งวัสดุ คุณภาพของผิวงาน โดยเฉพาะความหยาบผิว ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของแม่พิมพ์และชิ้นส่วน [2] ความหยาบผิวที่สูงเกินไปอาจส่งผลต่อความแม่นยำของชิ้นงาน รวมถึงทำให้เกิดจุดอ่อนที่อาจนำไปสู่ความเสียหายระหว่างการใช้งาน [3] ดังนั้นการควบคุมและลดค่าความหยาบผิวจึงเป็นสิ่งจำเป็นในกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและตรงตามข้อกำหนดทางวิศวกรรม

แม้ว่ากระบวนการตัดด้วยแรงดันน้ำสูงจะมีข้อดีในด้านความสะอาดของรอยตัดและช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากความร้อนต่อวัสดุ แต่คุณภาพผิวงานที่ดียังขึ้นอยู่กับการเลือกปัจจัย ได้แก่ แรงดันน้ำ ความเร็วตัด ระยะยกหัวตัด และชนิดของสารขัด ซึ่งแต่ละปัจจัยล้วนส่งผลต่อระดับค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน งานวิจัยหลายฉบับได้ศึกษาและยืนยันผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ เช่น Chandar et al. (2024) พบว่าแรงดันน้ำและระยะยกหัวตัดเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเรียบผิวชิ้นงานและความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุซีเมนต์ [4] ขณะที่ Mohamad et al. (2024) รายงานว่าความเร็วตัดและชนิดของสารขัดมีผลต่อความหยาบผิวของโลหะ Inconel 718 อย่างมีนัยสำคัญ [5] นอกจากนี้ Rajesh et al. (2024) ยังระบุว่าการเพิ่มแรงดันน้ำและลดระยะยกหัวตัดสามารถลดค่าความหยาบผิวและเพิ่มคุณภาพรอยตัดของวัสดุผสมโลหะได้อย่างชัดเจน [6] จากข้อค้นพบเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าการควบคุมพารามิเตอร์การตัดอย่างเป็นระบบเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับความต้องการของอุตสาหกรรม ดังนั้นหลายงานวิจัยจึงนิยมประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) โดยเฉพาะวิธี Box–Behnken Design (BBD) เพื่อวางแผนการทดลองอย่างเป็นระบบ ศึกษาปัจจัยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น งานของ Sathees Kumar et al. (2024) ที่นำ BBD มาวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์การตัดต่อคุณภาพผิวของวัสดุผสมอลูมิเนียม และยืนยันถึงความเหมาะสมของวิธีดังกล่าวในการลดจำนวนการทดลองและเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ [7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวของเหล็กกล้า SKD 11 ในกระบวนการตัดด้วยแรงดันน้ำสูงผสมสารขัด โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ Box–Behnken Design (BBD) เพื่อวางแผนการทดลองอย่างเป็นระบบ และนำข้อมูลผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อตรวจสอบความมีนัยสำคัญของแต่ละปัจจัย รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิวชิ้นงาน ผลการศึกษจะช่วยสนับสนุนให้ภาคอุตสาหกรรมสามารถเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ช่วยลดต้นทุนและระยะเวลาในการผลิต พร้อมทั้งส่งเสริมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงาน

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ดำเนินการวิจัยอย่างเป็นระบบและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยแบ่งกระบวนการดำเนินงานออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้ ขั้นตอนแรกคือการเตรียมชิ้นงานซึ่งใช้เหล็กกล้าเครื่องมือชนิด SKD 11 ขนาด $20 \times 20 \times 10$ มิลลิเมตร ตามที่แสดงในรูปที่ 1 ขั้นตอนที่สองเป็นการใช้เครื่องตัดด้วยแรงดันน้ำสูงผสมสารขัด (Abrasive Water Jet Cutting Machine) ยี่ห้อ OMAX รุ่น 1530 ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับขั้นตอนที่สาม ใช้สารขัดชนิดโกเมน ขนาด 80 Mesh ซึ่งได้จาก 3 แหล่งที่มา ได้แก่ โกเมน I, โกเมน II และ โกเมน III เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดสารขัดต่อความหยาบผิว ขั้นตอนที่สี่เป็นการวัดและตรวจสอบค่าความหยาบผิวของชิ้นงานโดยใช้เครื่องมือวัดยี่ห้อ Mahr รุ่น Marsurf SD20 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ โดยขั้นตอนที่ห้าเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งช่วยในการประมวลผลและวิเคราะห์ผลการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแต่ละขั้นตอนถูกออกแบบและดำเนินการอย่างละเอียดเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและสามารถตอบคำถามวิจัยได้อย่างครบถ้วนและชัดเจน

- 1) ชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือชนิด SKD 11 ขนาด $20 \times 20 \times 10$ มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดชิ้นงานสำเร็จ

- 2) เครื่องตัดด้วยแรงดันน้ำสูงผสมสารขัด (Abrasive Water Jet Cutting Machine) ยี่ห้อ OMAX รุ่น 1530 ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องตัดด้วยแรงดันน้ำสูงผสมสารขัด (Abrasive Water Jet Cutting Machine) ยี่ห้อ OMAX รุ่น 1530

- 3) สารขัดชนิดโกเมน ขนาด 80 Mesh จาก 3 แหล่งที่มา ได้แก่ โกเมน I, โกเมน II และโกเมน III

- 4) เครื่องมือวัดตรวจสอบความหยาบผิว ยี่ห้อ Mahr รุ่น Marsurf SD20
- 5) โปรแกรม Minitab สำหรับใช้วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองในครั้งนี้ประกอบด้วยตัวแปรดังนี้

ตัวแปรต้น (Independent Variables)

- ปัจจัยแปรผันที่ศึกษา มี 4 ปัจจัยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังตารางที่ 1

ตัวแปรตาม (Dependent Variable)

- ค่าความหยาบผิว (Surface Roughness, Ra) หน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)

ตัวแปรควบคุม (Controlled Variables)

- ขนาดรูรีดน้ำ: 0.25 mm
- ขนาดท่อลำน้ำ: 0.7 mm
- ขนาดของสารขัด: 80 Mesh
- อัตราการไหลของสารขัด: 0.368 kg/min
- อุณหภูมิน้ำ: $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 1 ปัจจัยแปรผัน และระดับปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ระดับปัจจัย		
		-1	0	1
แรงดันน้ำ (WP)	Psi	35000	40000	45000
ความเร็วตัด (FR)	mm/min	20	27.5	35
ระยะยกหัวตัด(SD)	mm	1	2	3
ชนิดทราย (TA)	-	โกเมน I (GA-I)	โกเมน II (GA-II)	โกเมน III (GA-III)

2.2 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแนวคิด Response Surface Methodology (RSM) โดยออกแบบการทดลองสำหรับปัจจัยแปรผันได้แก่ แรงดันน้ำ ความเร็วตัด ระยะยกหัวตัด และชนิดของสารขัด โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และทำซ้ำกัน 3 ครั้ง เพื่อศึกษาผลกระทบของแต่ละปัจจัยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่อค่าความหยาบผิว และลดจำนวนชุดการทดลองให้น้อยลงจากการทำ Full Factorial Design โดยไม่สูญเสียความแม่นยำของผลการทดลอง [7]

2.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

2.3.1 เตรียมชิ้นงานเหล็กกล้า SKD 11 ให้มีขนาดและคุณสมบัติตามที่กำหนด

2.3.2 ตั้งค่าเครื่องตัดแรงดันน้ำสูงผสมสารขัดตามค่าปัจจัยที่ระบุในชุดการทดลองที่ได้จาก Box-Behnken Design ดังรูปที่ 3

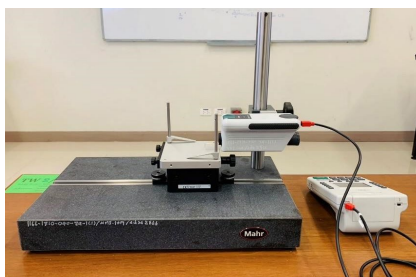


รูปที่ 3 การตั้งเครื่องเพื่อตัดชิ้นงาน

2.3.3 เตรียมสารขัดโกเมนจากแหล่งที่มาต่าง ๆ ให้พร้อมใช้งาน

2.3.4 ทำการตัดชิ้นงานตามเงื่อนไขการทดลองแต่ละชุด

2.3.5 ดำเนินการวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว รุ่น Marsurf SD20 ดังรูปที่ 4 โดยวัดที่ตำแหน่งเดียวกันจำนวน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3 การวัดความหยาบผิวรอยตัดของชิ้นงาน

2.3.6 บันทึกผลการทดลองทั้งหมดเพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูล

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เพื่อตรวจสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยแปดตัว ได้แก่ แรงดันน้ำ ความเร็วตัด ระยะยกหัวตัด และชนิดของสารขัด ที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ผลการวิเคราะห์ช่วยในการระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และใช้เป็นแนวทางในการปรับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการตัด

3. ผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองตามชุดการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD) โดยมีปัจจัยแปดตัว 4 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันน้ำ (WP) ความเร็วตัด (FR) ระยะยกหัวตัด (SD) และชนิดของสารขัด (TA) เพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า SKD 11 ที่ตัดด้วยเครื่องตัดแรงดันน้ำสูงผสมสารขัด โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

3.1 ผลการทดลองค่าความหยาบผิว

ผลการทดลองตามเงื่อนไขของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design มีปัจจัยในการทดลอง 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และทำซ้ำกัน 3 ครั้ง 45 เงื่อนไข โดยตัวแปรตามหรือผลตอบสนองที่ต้องการ คือ ค่าความหยาบผิว ซึ่งจะนำค่าที่ได้บันทึกลงในตารางเก็บข้อมูล แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความหยาบผิว

WP (Psi)	FR (mm/min)	SD (mm)	ค่าความหยาบผิว: Ra (μm)		
			TA		
			GA-I	GA-II	GA-III
35000	20	2	3.39	3.36	3.21
45000	20	2	3.98	3.7	3.96
35000	35	2	4.3	3.97	3.96
45000	35	2	4.57	4.13	4.75
35000	27.5	1	3.86	3.54	3.45
45000	27.5	1	4.26	3.79	4.07
35000	27.5	3	4.13	3.67	3.94
45000	27.5	3	4.56	4.18	4.35
40000	20	1	4.01	3.74	3.98
40000	35	1	4.23	3.96	4.38
40000	20	3	4.06	3.71	4.1
40000	35	3	4.38	4.36	4.58
40000	27.5	2	4.23	3.85	3.79
40000	27.5	2	3.86	3.76	3.75
40000	27.5	2	3.87	3.68	3.83

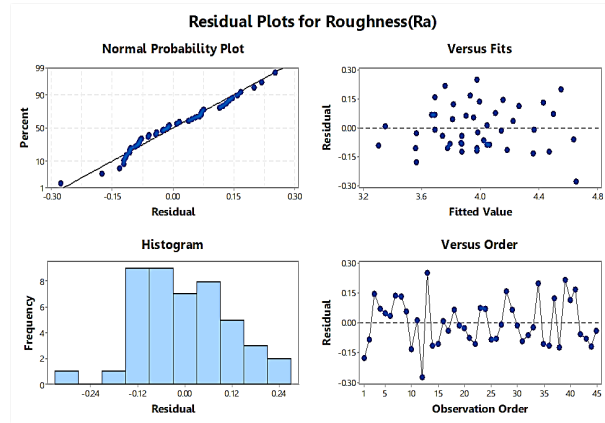
จากการทดลองทั้งหมดที่ดำเนินการตามชุดการทดลองของ BBD พบว่า ค่าความหยาบผิว (Ra) ซึ่งได้จากการตัดชิ้นงานมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 3.21 ถึง 4.75 ไมโครเมตร โดยปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุด ได้แก่ เงื่อนไขที่ใช้ แรงดันน้ำต่ำ (35,000 PSI) ความเร็วตัดต่ำ (20 mm/min) ระยะยกหัวตัดปานกลาง (2 mm) และใช้สารขัดชนิดโกเมน I ในขณะที่ค่าความหยาบผิวสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อใช้แรงดันน้ำสูง (45,000 PSI) ความเร็วตัดสูง (35 mm/min) ระยะยกหัวตัดปานกลาง (2 mm) และใช้สารขัดชนิดโกเมน I

3.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นการทดสอบสมมติฐานถึงอิทธิพลปัจจัยต่อความหยาบผิวในการตัดเหล็ก SKD 11 ด้วยเครื่องตัดวัสดุแรงดันน้ำสูง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab 17 ในการวิเคราะห์ผล มีรายละเอียดดังนี้

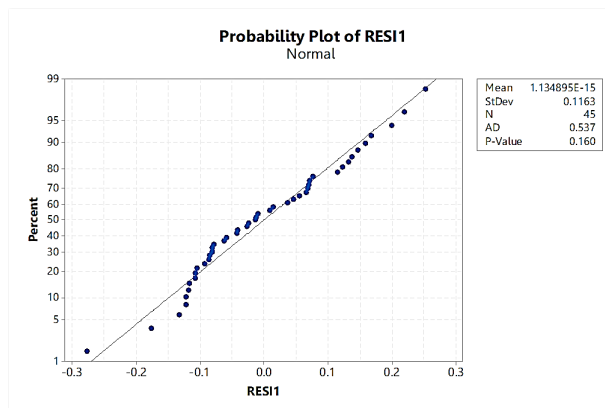
3.2.1 การตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ก่อนทำการทดสอบสมมติฐานดังกล่าว ต้องตรวจสอบความถูกต้องรูปแบบการทดลองก่อน โดยเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองที่สมมติฐานว่าค่าเศษเหลือ (Residual) ได้จากข้อมูลในการทดลองต้องเป็นไปตามหลักการ คือ ค่าเศษเหลือ (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ มีความแปรปรวนเท่ากัน และมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ การวิเคราะห์รูปแบบของค่าเศษเหลือ (Residual) ของค่าความหยาบผิว แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟความถูกต้องของสมมติฐานเบื้องต้น

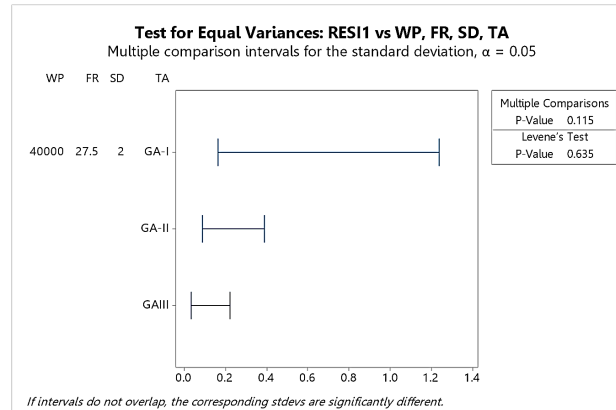
จากกราฟรูปที่ 4 กราฟบนด้านซ้าย เป็นการพิจารณาว่าข้อมูลของค่าความหยาบผิวมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยพิจารณากราฟว่ามีลักษณะของข้อมูล เป็นเส้นตรงหรือไม่ แต่เพื่อความมั่นใจในการกระจายตัวของข้อมูล จึงต้องทำการทดสอบ Normal Probability แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติค่าเศษเหลือ

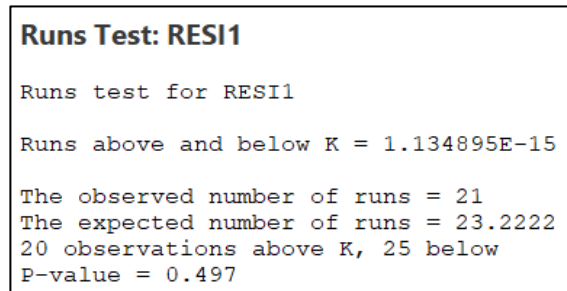
จากรูปที่ 5 พบว่า P-Value เท่ากับ 0.160 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าความหยาบผิวมีการแจกแจงแบบปกติ

จากกราฟด้านบนขวา ในรูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของค่าเศษเหลือที่มีการกระจายอย่างสมดุลในทั้งสองทิศทาง คือ ด้านบวกและด้านลบ และจากการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนพบว่า P-value เท่ากับ 0.635 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่าค่าเศษเหลือมีความแปรปรวนเท่ากัน ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนของค่าเศษเหลือ

เพื่อทดสอบว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ จึงทำการทดสอบด้วย Runs Test ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดสอบความเป็นอิสระของค่าเศษเหลือ

จากรูปที่ 7 พบว่า P-Value เท่ากับ 0.497 ซึ่งมากกว่านัยสำคัญที่ 0.05 แสดงว่าแหล่งที่มาของค่าเศษเหลือ มีความเป็นอิสระต่อกัน

ดังนั้นข้อมูลนี้มีค่าเศษเหลือแจกแจงแบบปกติ มีความแปรปรวนเท่ากัน และมีความเป็นอิสระต่อกัน จึงทำให้ ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ สามารถนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

3.2.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่อค่าความหยাবผิว แสดงผลการทดสอบดังรูปที่

Response Surface Regression: Roughness(Ra) versus WP, FR, SD, TA					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	4.51587	0.26564	12.06	0.000
Linear	5	3.90257	0.78051	35.43	0.000
WP	1	1.26960	1.26960	57.63	0.000
FR	1	1.69070	1.69070	76.74	0.000
SD	1	0.31510	0.31510	14.30	0.001
TA	2	0.62716	0.31358	14.23	0.000
Square	3	0.42856	0.14285	6.48	0.002
WP*WP	1	0.00625	0.00625	0.28	0.599
FR*FR	1	0.15185	0.15185	6.89	0.014
SD*SD	1	0.28505	0.28505	12.94	0.001
2-Way Interaction	9	0.18474	0.02053	0.93	0.514
WP*FR	1	0.01763	0.01763	0.80	0.379
WP*SD	1	0.00053	0.00053	0.02	0.878
WP*TA	2	0.11148	0.05574	2.53	0.098
FR*SD	1	0.03101	0.03101	1.41	0.246
FR*TA	2	0.01756	0.00878	0.40	0.675
SD*TA	2	0.00653	0.00327	0.15	0.863
Error	27	0.59485	0.02203		
Lack-of-Fit	21	0.48831	0.02325	1.31	0.393
Pure Error	6	0.10653	0.01776		
Total	44	5.11072			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.148430	88.36%	81.03%	65.60%	

รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากรูปที่ 8 สรุปผลดังนี้

- ปัจจัยแรงดันน้ำ (WP) มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากค่า P-Value < 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05
- ปัจจัยความเร็วตัด (FR) มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวเนื่องจากค่า P-Value < 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05
- ปัจจัยระยะยกหัวตัด (SD) มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากค่า P-Value = 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05
- ปัจจัยชนิดทราย (TA) มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากค่า P-Value < 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05
- การกระทำร่วมกันระหว่างปัจจัยแรงดันน้ำ (WP) กับปัจจัยความเร็วตัด (FR) ไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากค่า P-Value = 0.379 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05
- การกระทำร่วมกันระหว่างปัจจัยแรงดันน้ำ (WP) กับปัจจัยระยะยกหัวตัด (SD) ไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากค่า P-Value = 0.878 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05
- การกระทำร่วมกันระหว่างปัจจัยแรงดันน้ำ (WP) กับปัจจัยชนิดทราย (TA) ไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากค่า P-Value = 0.098 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05

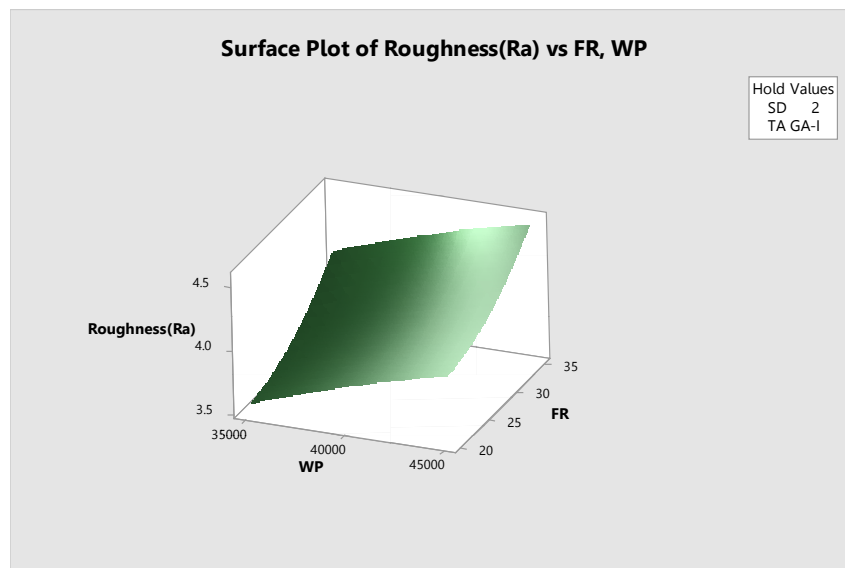
8) การกระทำร่วมกันระหว่างปัจจัยความเร็วตัด (FR) กับปัจจัยระยะยกหัวตัด (SD) ไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากค่า P-Value = 0.246 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05

9) การกระทำร่วมกันระหว่างปัจจัยความเร็วตัด (FR) กับปัจจัยชนิดทราย (TA) ไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากค่า P-Value = 0.675 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05

10) การกระทำร่วมกันระหว่างปัจจัยระยะยกหัวตัด (SD) กับปัจจัยชนิดทราย (TA) ไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อค่าความหยาบผิว เนื่องจากค่า P-Value = 0.863 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05

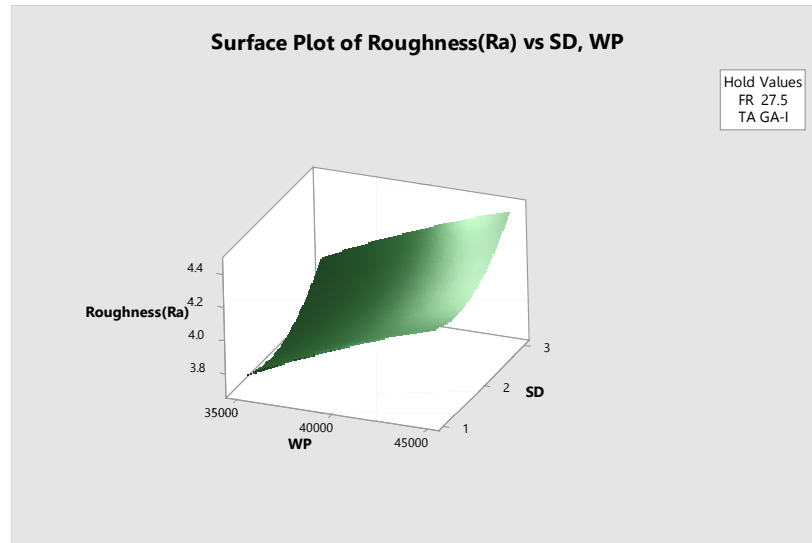
3.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย

สามารถแสดงได้ในลักษณะของพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface) ดังนี้



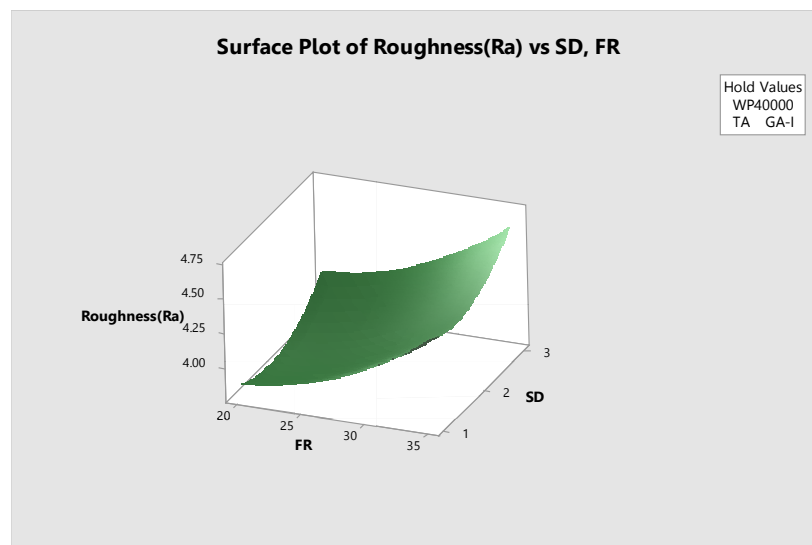
รูปที่ 9 ค่าความหยาบผิว (Ra) เทียบกับ FR WP

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว (Ra) เทียบกับ แรงดันน้ำ (WP) กับความเร็วตัด (FR) โดยสามารถเปลี่ยนแปลงระดับได้ และให้ระยะยกหัวตัด (SD) คงไว้ที่ระดับกลาง ดังรูปที่ 9 พบว่าถ้า FR อยู่ระดับสูง WP อยู่ระดับกลาง จะทำให้ได้ค่าความหยาบผิว (Ra) อยู่ในระดับสูง และถ้า FR อยู่ระดับต่ำ WP อยู่ระดับสูง จะทำให้ได้ค่าความหยาบผิว (Ra) อยู่ในระดับต่ำ



รูปที่ 10 ค่าความหยาบผิว (Ra) เทียบกับ SD WP

เมื่อนำเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว (Ra) เทียบกับแรงดันน้ำ (WP) กับระยะยกหัวตัด (SD) โดยสามารถเปลี่ยนแปลงระดับได้ และให้ความเร็วตัด (FR) คงไว้ที่ระดับกลาง ดังรูปที่ 10 พบว่าถ้า SD อยู่ระดับสูง WP อยู่ระดับต่ำ จะทำให้ได้ค่าความหยาบผิว (Ra) อยู่ในระดับสูง และถ้า SD อยู่ระดับต่ำ WP อยู่ระดับสูง จะทำให้ได้ค่าความหยาบผิว (Ra) อยู่ในระดับต่ำ

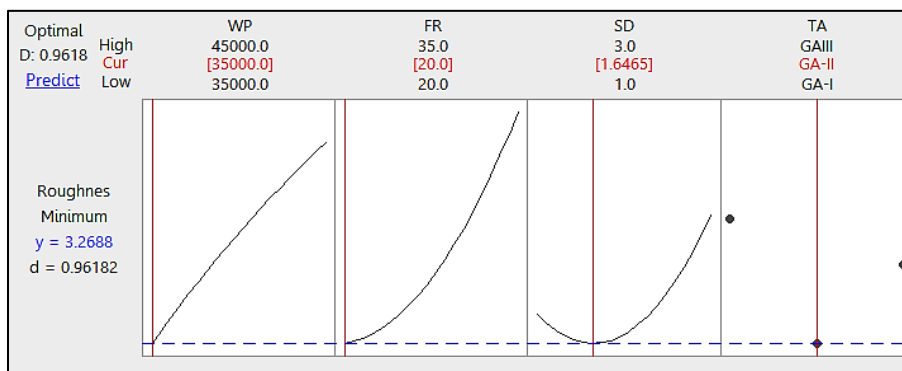


รูปที่ 11 ค่าความหยาบผิว (Ra) เทียบกับ FR SD

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความหยาบผิว (Ra) เทียบกับ ความเร็วตัด (FR) กับระยะยกหัวตัด (SD) โดยสามารถเปลี่ยนแปลงระดับได้ และให้แรงดันน้ำ (WP) คงไว้ที่ระดับกลาง ดังรูปที่ 11 พบว่าถ้า SD อยู่ระดับสูง FR อยู่ระดับต่ำ จะทำให้ได้ค่าความหยาบผิว (Ra) อยู่ในระดับสูง และถ้า SD อยู่ระดับต่ำ FR อยู่ระดับสูง จะทำให้ได้ค่าความหยาบผิว (Ra) อยู่ในระดับต่ำ

3.4 การวิเคราะห์เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม

ในการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดเป็นหลักด้วยการใช้หลักการ Optimization ฟังก์ชัน Response optimization ของโปรแกรม Minitab โดยในการพิจารณาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมนี้ ก็จะพิจารณาผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนอง ค่าความหยาบผิว (Ra) แสดงผลดังนี้



รูปที่ 12 แสดงการเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม

จากรูปที่ 12 พบว่าความหยาบผิวน้อยสุด เกิดขึ้นเมื่อใช้ระดับปัจจัยแรงดันน้ำ 35,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วตัด 20 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะยกหัวตัด 1.65 มิลลิเมตร และใช้ทรายโกเมน II ให้ความหยาบผิวน้อยสุดอยู่ที่ประมาณ 3.26879 ไมโครเมตร โดยมีระดับความพึงพอใจ (Desirable) อยู่ที่ 96.18%

4. วิจัยผลการดำเนินงาน

ผลลัพธ์จากการทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยแรงดันน้ำ ความเร็วตัด ระยะยกหัวตัด และชนิดของสารขัด มีผลต่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า SKD 11 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) โดยค่าความหยาบผิวที่ได้อยู่ระหว่าง 3.21 ถึง 4.75 ไมโครเมตร โดยสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chandar et al. (2024) และ Salian et al. (2024) ที่รายงานว่า การเพิ่มแรงดันน้ำและลดความเร็วตัดส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [4,12]

จากผลการทดลองพบว่า การลดแรงดันน้ำจาก 45,000 Psi เป็น 35,000 Psi สามารถลดค่าความหยาบผิวได้ถึงร้อยละ 36.72 และการลดความเร็วตัดจาก 35 mm/min เหลือ 20 mm/min ช่วยลดความหยาบผิวเฉลี่ยร้อยละ 28.90 นอกจากนี้ การเลือกใช้สารขัดโกเมน II ร่วมกับระยะยกหัวตัดต่ำ (1.65 mm) ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Venkatesh (2024) และ Halim et al. (2024) ที่ระบุว่าสมบัติของสารขัดและระยะยกหัวตัดมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเรียบของผิวชิ้นงาน [9,13] ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สนับสนุนผลการวิจัย โดยแบบจำลองมีความแม่นยำสูง ($R^2 = 88.36\%$ และ Adjusted $R^2 = 81.03\%$)

5. สรุปผล

ผลการวิจัยจากการวิเคราะห์ ANOVA สรุปได้ว่า ปัจจัยแรงดันน้ำ ความเร็วตัด ระยะยกหัวตัด และชนิดของสารขัด มีผลต่อค่าความหยาบผิวของเหล็กกล้า SKD 11 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) โดยค่าความหยาบผิวที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 3.21 ถึง 4.75 ไมโครเมตร ซึ่งพบว่าเงื่อนไขที่ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุด คือ แรงดันน้ำ 35,000 Psi

ความเร็วตัด 20 mm/min ระยะยกหัวตัด 1.64 mm และใช้สารขัดโกเมน II มีค่าความแม่นยำของแบบจำลองเท่ากับ $R^2 = 88.36\%$ และ Adjusted $R^2 = 81.03\%$ โดยมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวมากที่สุดคือ ความเร็วตัด (FR) F-Value = 76.74 รองลงมาคือ แรงดันน้ำ (WP) F-Value = 57.63 ระยะยกหัวตัด (SD) F-Value = 14.30 และชนิดทราย (TA) F-Value = 14.23 ตามลำดับ ซึ่งผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัดวัสดุด้วยแรงดันน้ำสูงเพื่อควบคุมคุณภาพผิวงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือ เครื่องจักร และวัสดุการทดลองจากสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. M. Medibew, D. Zielinski, S. W. Agebo, and M. Deja, “Recent Research Progress in the Abrasive Machining and Finishing of Additively Manufactured Metal Parts,” *Materials*, vol. 18, no. 6, p. 1249, 2025.
- [2] S. Khetre, S. Pachpute, V. Birajdar, and M. Ovhal, “Chapter 12 An Insight into The Kerf Taper, Surface Properties, And Delamination in Abrasive Water–Jet Machining (AWJM) Process,” in *Abrasive Water Jet Machining of Composites: Empirical and Analytical Modelling*, S. Salunkhe, V. Sisodia, and J. P. Davim, Eds. Berlin, Boston: De Gruyter, 2024, pp. 233–262.
- [3] R. Kumar et al., “Hand and Abrasive Flow Polished Tungsten Carbide Die: Optimization of Surface Roughness, Polishing Time and Comparative Analysis in Wire Drawing,” *Materials*, vol. 15, no. 4, p. 1287, 2022.
- [4] J. B. Chandar, N. Lenin, and C. Rathinasuriyan, “Exploring Surface Integrity: Experimental Investigation into Abrasive Waterjet Deep Hole Drilling on Ss 316L For Biomedical Applications,” *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, vol. 8, p. 100109, 2024.
- [5] W. N. F. W. Mohamad, M. S. Kasim, R. Alias, and R. I. Raja, “Investigation of Surface Roughness Inconel 718 In Waterjet Turning,” *Jurnal Tribologi*, vol. 41, pp. 113–128, 2024.
- [6] K. Gnanasekaran, M. Rajesh, and V. Hariram, “Advanced Material Processing: Optimization of Abrasive Water Jet Parameters for Metal–Stacked Hybrid Fiber Laminate,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 1–14, 2024.
- [7] S. Sathees Kumar et al., “Examination of Abrasive Water Jet Machining for Al Hybrid Composites Using RSM–Central Composite Design,” *Interactions*, vol. 245, no. 1, p. 220, 2024.
- [8] R. Bhat, V. Tandon, and S. A. S. Ahmad, “Optimizing Abrasive Water Jet Machining for Enhanced Machining Of 316 Stainless Steel,” *Journal of Computers, Mechanical and Management*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2024.

- [9] N. H. A. Halim et al., “Multi-Objectives Optimization of Abrasive Water Jet Machining (AJWM) On Mild Steel,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 16, no. 5, pp. 187–200, 2024.
- [10] T. K. Kumar, and A. K. Kaviti, “An Advanced Study on The Application of Artificial Neural Networks in The Abrasive Waterjet Machining of Titanium Nanocomposites,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, pp. 1–8, 2024.
- [11] K. Fuse et al., “Abrasive Waterjet Machining of Titanium Alloy Using an Integrated Approach of Taguchi-Based Passing Vehicle Search Algorithm,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, pp. 1–15, 2024.
- [12] P. Salian, V. Dillibabu, S. Srinivas, and M. A. Khan, “Optimising Abrasive Water Jet Cutting Parameters for Direct Metal Laser Sintered Inconel 718: A Study of Cutting Efficiency and Surface Quality,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, pp. 1–17, 2024.
- [13] R. Venkatesh, “Magnesium Alloy and Silicon Nitrides Composite Study: Synthesis and Abrasive Water Jet Machining Behavior and Optimization,” *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 18, no. 2, pp. 1–8, 2024.
- [14] K. N. Kumar, and P. D. Babu, “Improving The Machining Performance of Polymer Hybrid Composite by Abrasive Water Jet Machining for Precise Machining,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, no. 11, pp. 15347–15366, 2024.
- [15] B. A. Ahmed, M. A. Abdullah, and S. K. Ghazi, “Surface Roughness of Aluminum Alloy 7024 Predicted by Linear Regression and Neural Network Model in Abrasive Water Jet Machining,” *Al-Bahir Journal for Engineering and Pure Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 132–141, 2024.
- [16] F. Malm, “Abrasive Waterjet Process Parameters Optimization,” Master's Thesis, Western Carolina University, Cullowhee, NC, USA, 2024.