

Research Article

การศึกษาปัจจัยการกัดร่องที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัดวัสดุเชิงประกอบ
พลาสติกและไม้A Study of Slot Milling Factors Affecting the Machined Surface Quality of
Wood - Plastic Composites

วิมเนศ เพชรสุวรรณ และ กุลภัทร์ ทองแก้ว *

Wikanet Phetsuwan and Kunlapat Thongkaew *

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-03-26

Revised: 2024-05-24

Accepted: 2024-05-28

Keywords:

slot milling;

wood-plastic composite;

experimental design;

surface roughness;

burr formation

Wood-plastic composites require a molding process to fabricate composite wood products which limits the ability to create basic forms. To develop complex items, manufacturers must use a milling process, which can create for several patterns. Therefore, this research aims to investigate the milling parameters that influence the machined surface quality of composite made from rubber wood powder and recycled polypropylene. This material has advantages in high strength and moisture resistance. The milling parameters considered were spindle speeds of 330, 610, and 850 revolutions per minute, feed rates of 43, 120, and 200 mm/min, and cutting depths of 1, 3, and 5 mm. The impact of milling parameters on surface roughness and burr formation was investigated. The results revealed that surface irregularity decreased with an increase in spindle speed, but decreased with a reduction in feed rate and cutting depth. By increasing the feed rate and spindle speed while decreasing the cutting depth, burr formation was reduced. Burr formation was greater in up milling compared to down milling due to the direction of the cutting edge's rotation direction being opposite to the feed direction of the workpiece. The recommended milling parameters were as follows: a spindle speed of 850 RPM, a feed rate of 43 mm/min, and a cutting depth of 1 mm, resulting in a surface roughness of about 6.575 μm . The minimum burr formation was approximately 0.770 mm in up milling and 0.256 mm in down milling, under the conditions of a 850 RPM spindle speed, 120 mm/min feed rate and 1 mm cutting depth. The average differences between the predicted and actual milling results were 2.136% for surface roughness, 1.639% for burr formation in up milling, and 1.87% in down milling. These results can applied to improve the milling wood and plastic composites and forecast the quality of the milled surface.

* Corresponding author.

E-mail address: kunlapat.t@psu.ac.th

Cite this article as:

Phetsuwan, W. and Thongkaew, K. 2025. A Study of Slot Milling Factors Affect the Machined Surface Quality of Wood - Plastic Composite. **Recent Science and Technology** 17(2): 262664.

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เป็นการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ทำให้มีข้อจำกัดด้านรูปทรง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงซับซ้อนวัสดุนี้จำเป็นต้องมีการกัดชิ้นงานเนื่องจากสามารถตัดเฉือนได้หลากหลายรูปทรง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาปัจจัยการกัดร่องที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัดวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและทนทานต่อความชื้น พิจารณาปัจจัยการกัดประกอบด้วย ความเร็วรอบ 330, 610 และ 850 rpm อัตราป้อน 43, 120 และ 200 mm/min และระยะป้อนลึก 1, 3 และ 5 mm ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการเกิดเศษเสี้ยน ผลจากการทดลองพบว่าความหยาบผิวจะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นแต่อัตราป้อนและระยะป้อนลึกลดลง การเกิดเศษเสี้ยนจะลดลงเมื่อความเร็วรอบและอัตราป้อนเพิ่มขึ้นแต่ระยะป้อนลึกลดลง การเกิดเศษเสี้ยนแบบกักขังมีค่ามากกว่าและการกัดลงเนื่องจากการหมุนของคมตัดที่สวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงาน เงื่อนไขการกัดที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ 850 rpm อัตราป้อน 43 mm/min และระยะป้อนลึก 1 mm ทำให้ความหยาบผิวมีค่าประมาณ 6.575 μm การเกิดเศษเสี้ยนต่ำสุดในการกัดชิ้นคือ 0.770 mm และกัดลง 0.256 mm อยู่ภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบ 330 rpm อัตราป้อน 200 mm/min และระยะป้อนลึก 1 mm สมการทำนายค่าความหยาบผิวและการเกิดเศษเสี้ยนพบว่าค่าเฉลี่ยความแตกต่างของค่าความหยาบผิวคือ 2.136% การเกิดเศษเสี้ยนกักขัง 1.639% และกัดลง 1.878% ตามลำดับ งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการแปรรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้และทำนายคุณภาพรอยกัดได้

คำสำคัญ: การกัดร่อง, วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้, การออกแบบการทดลอง, ความหยาบผิว, เศษเสี้ยน

1. บทนำ

ไม้ยางพาราเป็นทรัพยากรที่สำคัญของประเทศ ปัจจุบันมีการเพาะปลูกยางพาราโดยรวม 24.1 ล้านไร่ โดยส่วนใหญ่ปลูกในภาคใต้คิดเป็น 57.6% ของพื้นที่ทั้งหมด (Ministry of Commerce, 2022) มีการนำไม้ยางพารามาแปรรูปหลากหลาย และมีการนำเศษเหลือจากการแปรรูปไม้ไปผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) (Srivabut *et al.*, 2018) ได้เข้ามามีบทบาทแทนที่ไม้ยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นในงานด้านโครงสร้าง การทำเฟอร์นิเจอร์ ของเล่นเด็ก และอุปกรณ์ตกแต่งอาคารสถานที่ เป็นต้น WPCs มีมูลค่าถึง 7 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี 2565 และมีอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Acumen research and consulting, 2022) เพราะมีคุณสมบัติเด่น เช่น มีความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ไม่ก่อให้เกิดเชื้อรา ขึ้นรูปได้ง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Smith and Wolcott, 2006; Ratanawilai and Taneerat, 2018; Ammar *et al.*, 2022) WPCs สามารถผลิตได้โดยการนำซีลี้อยไม้และพลาสติก สามารถผสมกับพลาสติกได้หลายชนิด เช่น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP), พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) และ อะคริโลไนไตรล์ - สไตรีน (Acrylonitrile-Styrene; AS-SAN) ในการขึ้นรูปวัสดุด้วยวิธีการอัดร้อน (Huang *et al.*, 2013) หรือการฉีดเข้าแม่พิมพ์แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตามลักษณะที่ต้องการ (Cheewawuttipong *et al.*, 2022) อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมานั้นยังไม่สามารถใช้งานได้ทันทีเนื่องจากมีขนาดและรูปทรงจำกัด ดังนั้นหากต้องการสร้างเป็นชิ้นส่วนรูปทรงเฉพาะต้องมีการตัดเฉือนหลังการขึ้นรูป

เช่น การกัด การเจาะ การกลึง เพื่อแปรรูปให้ได้ขนาดและรูปร่างตามต้องการสำหรับการใช้งาน ซึ่งงานกัดร่องเป็นวิธีการตัดเฉือนอย่างหนึ่งที่นิยมในอุตสาหกรรมแปรรูปวัสดุเชิงประกอบ (Ratanawilai and Taneerat, 2018) มีหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดเพื่อแปรรูปไม้ (Yabo *et al.*, 2022; Hajiahmadi, 2019; Saha *et al.*, 2023) Srivabut *et al.* (2022a) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการกัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene; HDPE) และซีลี้อยไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อความเร็วรอบกัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง แต่ต้องทำการลดอัตราป้อนและความลึกในการตัดเพื่อให้ค่าความหยาบผิวลดลง Srivabut *et al.* (2022b) ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมสภาวะที่เหมาะสมต่อความหยาบผิวในการกัดข้างของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมของการกัดที่ทำให้เกิดค่าความหยาบผิวประมาณ 2.865 μm คือ ความเร็วรอบ 1,000 rpm อัตราป้อน 315 mm/min และความลึกในการตัด 1 mm Meiqi *et al.* (2023) ได้ทดลองกัดวัสดุผสมจากไม้ไฟและพลาสติกเพื่อหาผลกระทบของจำนวนคมมีดกัดความเร็วในการกัด และความลึกในการกัดที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงและอุณหภูมิการกัดพบว่า จำนวนคมมีดกัดมีส่งผลต่อแรงกัดและอุณหภูมิการกัดสูงที่สุด ตามด้วยความลึกและความเร็วในการกัด Ratanawilai *et al.* (2023) ได้เปรียบเทียบประเภทวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก คือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE), พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) และ พอลิไวนิลคลอไรด์

(Polyvinylchloride; PVC) ที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวในการกัดผิวหน้า และพบว่าวัสดุเชิงประกอบ PP ให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุด เนื่องจากการทดลองที่ต่างกันจะขึ้นอยู่กับสองปัจจัยหลักคือ คุณสมบัติเฉพาะตัวของพลาสติก เช่น อัตราการไหล ความหนาแน่น อุณหภูมิหลอมเหลว และความเข้ากันได้กับวัสดุเสริมแรง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมที่ต่างกันของพลาสติก

จากการสำรวจงานวิจัยข้างต้น พบว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาปัจจัยการกัด เช่น การกัดผิวหน้าที่ส่งผลต่อความหยาบผิววัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับการกัดร่องมีลักษณะเฉพาะและนิยมประยุกต์ใช้ในการผลิตภัณฑ์ประเภทงานสวมประกอบ เช่น เฟอ์นเจอร์ ของเล่นเด็ก และของตกแต่งภายในอาคาร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาปัจจัยการกัดร่องที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ พิจารณาปัจจัยความเร็วรอบ อัตราการป้อน และระยะป้อนลึก ที่ส่งผลต่อคุณภาพการกัดประกอบด้วย ค่าความหยาบผิวและการเกิดเสี้ยนบน

ชิ้นงาน ซึ่งผลจากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้แปรรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้สำหรับการเลือกเงื่อนไขการกัดร่องได้เหมาะสม ผลิตได้คุณภาพ ลดการผลิตชิ้นงานเสีย และให้มีความหลากหลายมากขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1. วัสดุและอุปกรณ์

2.1.1 วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

งานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ซึ่งถูกพัฒนาโดย Srivabut *et al.* (2019) มีส่วนประกอบหลัก รายละเอียดดัง Table 1 คุณสมบัติ ทนแรงกระแทกได้ทนทานต่อความชื้น และไม่ก่อให้เกิดเชื้อรา มีความต้านแรงดึง 24.82 MPa, โมดูลัสแรงดึง 1.20 GPa, กำลังอัด 22.88 MPa และโมดูลัสอัด 1.32 GPa ขนาด 55 × 55 × 18 mm ดังแสดงใน Figure 1 (Srivabut *et al.*, 2019).

Table 1 Components of RWF wood and rPP plastic composites (Srivabut *et al.*, 2019)

Mixture component	wt%
Recycled polypropylene; rPP	51.8 %
Rubberwood flour; RWF	35.9 %
Calcium carbonate; CC	7.2 %
Maleic anhydride-grafted polypropylene; MAPP	3.9 %
Ultraviolet; UV	0.2 %
Lubricant; Lub	1.0 %

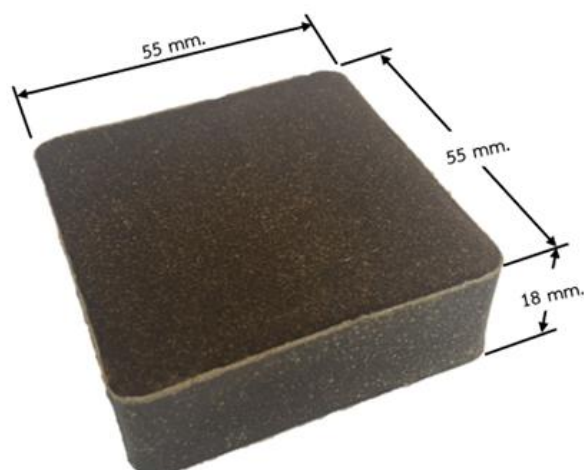


Figure 1 A sample of wood plastic composite



Figure 2 (A) a vertical milling machine and (B) an end mill.

Table 2 Slot milling parameters

Slot milling parameters	Unit	Level		
		Low	Medium	High
Speed (S)	rpm	330	610	850
Feed Rate (F)	mm/min	43	120	200
Depth of Cut (D)	mm	1	3	5

2.1.2 เครื่องกัดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องกัดแนวตั้ง มีความเร็วรอบสูงสุด 1,250 rpm อัตราป้อนสูงสุด 875 mm/min (Figure 2 (A)) ใช้ดอกกัดไม้ แบบ 3 คมตัด ผลิตภัณฑ์จากวัสดุสังเคราะห์คาร์ไบด์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm (Figure 2 (B))

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) เพื่อศึกษาผลกระทบหลัก (Main Factor) และผลกระทบของปัจจัยร่วม (Interaction Factors) ของตัวแปรการกัดทุกเงื่อนไข (Ratanawilai *et al.*, 2023) กำหนดปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ เนื่องจากต้องการทราบแนวโน้มของปัจจัยการกัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการเกิดเศษเสี้ยน มีเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 27 สภาวะ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 81 การทดลอง พิจารณาช่วงตัวแปรการกัดจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้พบว่า ตัวแปรการกัดที่แนะนำคือ ความเร็วรอบ (Speed) ในช่วง 200-900 rpm อัตราป้อน (Feed rate) ในช่วง 40-400 mm/min และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ในช่วง 1-7 mm (Srivabut *et al.*, 2022b) ดัง Table 2

การทดลองนี้จะทำการกัดร่องชิ้นงาน ตามขนาดความกว้างดอกกัดคือ 8 mm กัดชิ้นงานตามทิศทางการ

ป้อน (workpiece feed) เป็นระยะทาง 55 mm การกัดขึ้น (Up milling) คมตัดหมุนสวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงาน และการกัดลง (Down milling) คมตัดหมุนไปในทิศทางการป้อนชิ้นงาน (Figure 4) ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการกัดแต่ละเงื่อนไขประมาณ 1 นาที ซึ่งเมื่อทำการทดลองทั้งหมดจะมีการกัดรวมประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ข้อกำหนดของอายุการใช้งานดอกกัดที่แนะนำคือ 75 ชั่วโมง (End mill, 2022) ดังนั้นปัจจัยการสึกหรอของดอกกัดจึงไม่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัด

2.3 วิธีการประเมินคุณภาพรอยกัดชิ้นงาน

งานวิจัยนี้มีการประเมินคุณภาพรอยกัด 2 ส่วน คือ ค่าความหยาบผิวและการเกิดเศษเสี้ยนของชิ้นงาน สำหรับการวัดค่าความหยาบผิวได้ใช้เครื่องวัดความหยาบผิว (Mitutoyo Corporation, 2023) มีช่วงความละเอียดจาก 0.002 μm ถึง 360 μm (Figure 3 (A)) ได้ถูกนำมาใช้ในการวัดคุณภาพรอยกัด โดยกำหนดระยะการวัดประมาณ 17.5 mm วัดซ้ำ 3 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัดได้ (R_a) เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตดัง Figure 4 สำหรับการพิจารณาคุณภาพรอยกัดและการเกิดเศษเสี้ยนได้มีการใช้กล้องไมโครสโคปแบบใช้แสงสะท้อนอเนกประสงค์กำลังขยายในช่วง 10x ถึง 100x (Figure 3 (B)) เพื่อวัดความกว้างของเศษเสี้ยน (Burr) โดยจะทำการวัดพิจารณาจาก 2 ส่วน คือ การกัดขึ้น (Up-milling) และการกัดลง (Down-milling)

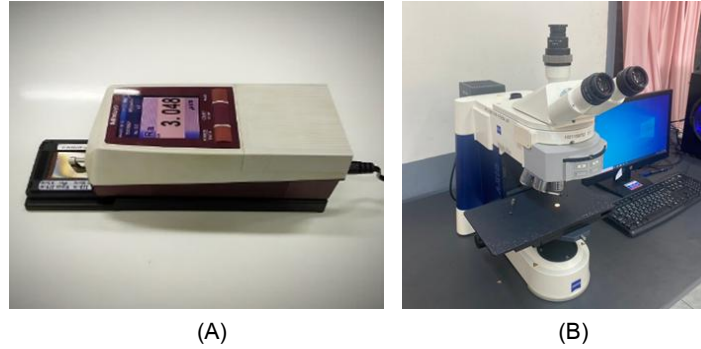


Figure 3 Equipment for workpiece quality measurement: (A) a surface roughness tester and (B) a microscope

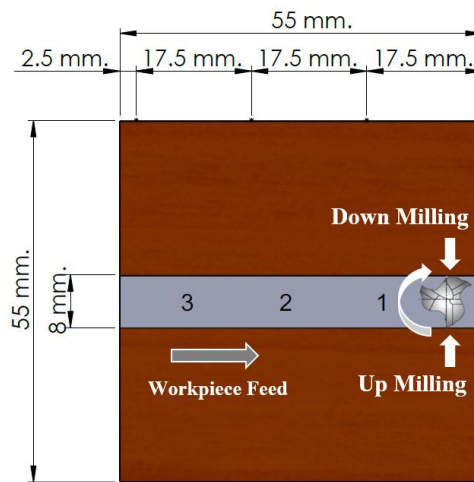


Figure 4 Diagram of slot milling operation.

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 ลักษณะรอยกัดร่องประกอบพลาสติกและไม้

ลักษณะรอยกัดร่องวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ดัง Figure 5 โดยหากใช้ความเร็วรอบต่ำที่ 330 rpm อัตราป้อนสูงที่ 200 mm/min และระยะป้อนลึก 5 mm ทำให้เห็นรอยกัดชิ้นงานชัดเจนและมีค่าความหยาบผิวอยู่ที่ประมาณ 14.943 μm (Figure 5(A)) แต่ไม่มีการเกิดเศษเสี้ยน สาเหตุของความหยาบผิวสูง เนื่องจากอัตราป้อนและระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นทำให้ต้องตัดเฉือนชิ้นงานในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามหากมีการปรับความเร็วรอบสูงที่ 850 rpm ลดอัตราป้อน 43 mm/min และกำหนดระยะป้อนลึก 1 mm จะทำให้ค่าความหยาบผิวลดลงอย่างชัดเจน (Figure 5 (B)) แต่ส่งผลให้เกิดเศษเสี้ยนด้านบนชิ้นงาน (Saha *et al.*, 2023) โดยเฉพาะเสี้ยนบริเวณการกัดชิ้น ($Burr_1$) จะมีปริมาณมากกว่าการกัดลง ($Burr_2$) เนื่องจากคมตัดหมุนสวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงาน (Yabo *et al.*, 2022)

3.2 การวิเคราะห์ปัจจัยก่อกำเนิดที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิว

ผลจากการทดลองการกัดร่องภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ถูกวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) โดยใช้โปรแกรม Design-Expert Version 12 (Stat Ease, 2023) ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบความปกติของข้อมูลความหยาบผิว

การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลความหยาบผิวเพื่อยืนยันดัง Figure 6 พบว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ (Figure 6 (A)) กระจายตัวของข้อมูลเป็นอิสระ (Figure 6 (B)) มีความเสถียรภาพของความแปรปรวน (Figure 6 (C)) และข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นซึ่งสามารถพยากรณ์ค่าจากการทดลองได้ (Figure 6 (D)) ดังนั้นสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิวได้ (Ratanawilai *et al.*, 2023)

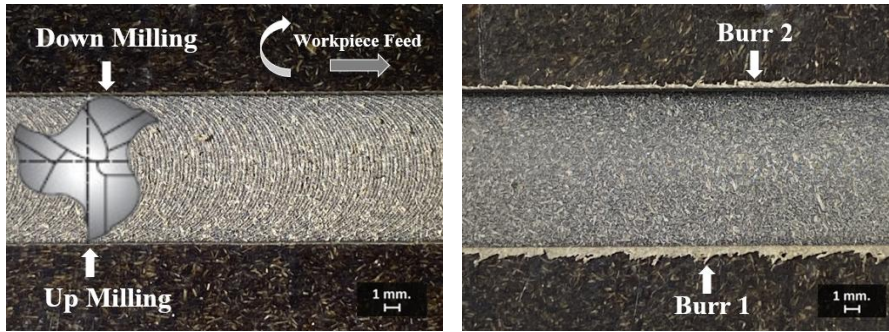


Figure 5 Characteristics of machined surface finish in slot milling (A) a case of no burr generation (B) a case of burr generation.

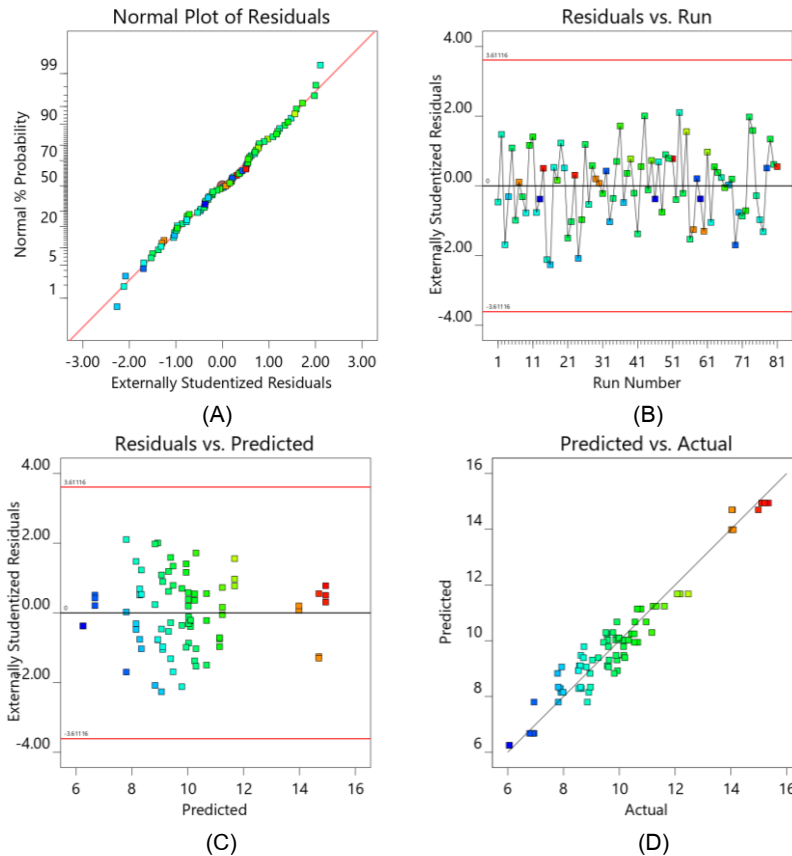


Figure 6 Normality analysis for surface roughness (A) normal probability examination (B) residuals vs. run examination (C) residuals vs. predicted response examination and (D) actual vs. predicted response examination.

3.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหยาบผิว โดยพิจารณาผลกระทบหลักของปัจจัยการกัด คือ ความเร็วรอบ (S) อัตราป้อน (F) และระยะป้อนลึก (D) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Table 3) พบว่าปัจจัยการกัดทั้งหมดมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความเร็วรอบมีผลต่อค่าความ

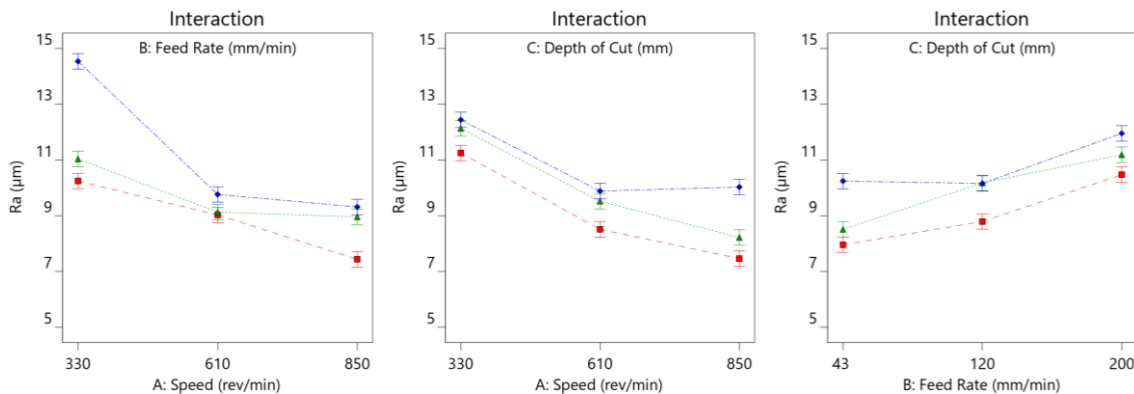
หยาบผิวมากที่สุด นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยร่วม คือ ความเร็วรอบกับอัตราป้อน (SF) ความเร็วรอบกับระยะป้อนลึก (SD) และอัตราป้อนกับระยะป้อนลึก (FD) พบว่ามีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srivabut *et al.* (2022c) รายงานว่าปัจจัยหลักมีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05

Table 3 Variance analysis (ANOVA) for surface roughness

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	342.90	26	13.19	40.90	< 0.0001*
S	169.70	2	84.85	263.11	< 0.0001*
F	73.68	2	36.84	114.23	< 0.0001*
D	39.50	2	19.75	61.24	< 0.0001*
SF	40.98	4	10.24	31.77	< 0.0001*
SD	7.79	4	1.95	6.04	0.0004*
FD	7.27	4	1.82	5.64	0.0007*
SFD	3.98	8	0.4978	1.54	0.1642
Pure Error	17.41	54	0.3225		
Cor Total	360.32	80			

R² = 89.88

Note: * Refers to a significant factor

**Figure 7** Analysis of factors affecting surface roughness values. (A) speed and feed rate (B) speed and depth of cut and (C) feed rate and depth of cut.

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักการกัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวดัง Figure 7 พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง (Figure 7 (A)) แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนและระยะป้อนลึกทำให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น (Figure 7 (B) และ (C)) สาเหตุเนื่องจากอัตราป้อนและระยะป้อนลึกที่ทำให้ต้องตัดเฉือนชิ้นงานในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srivabut *et al.* (2022c) เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง ปัจจัยอัตราป้อนและระยะป้อนลึกมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคืออัตราป้อนและระยะป้อนลึกต่ำส่งผลให้ค่าความหยาบผิวต่ำ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลกระทบปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวพบว่าความหยาบผิวที่ต่ำเกิดจากใช้ความเร็วรอบสูงแต่อัตราป้อนและระยะป้อนลึกต่ำ

3.2.3 การวิเคราะห์สมการถดถอยของความหยาบผิว

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตัวแปรการกัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวแล้วสามารถสร้างสมการถดถอยของความหยาบผิวเพื่อใช้ประโยชน์ในการทำนายค่าความหยาบผิว ดังแสดงในสมการที่ (1) โดยค่าความผันแปร R² มีค่า 89.88 และค่า Adjusted R² มีค่า 88.44 สามารถนำสมการไปทำนายผลเพื่อหาคำตอบได้

$$R_a = 9.94 + 2.00 S - 0.6336 F - 1.04 D - 0.2309 F D - 0.8647 D^2 + 0.0190 D^3 - 0.6585 S F + 0.7551 S F^2 - 0.6730 S F^3 + 0.0525 S F^4 \quad (1)$$

โดยตัวแปร R_a คือ ความหยาบผิว

มีการวิเคราะห์หาสมการที่เหมาะสมในการกัดร่องวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิว (R_a) มีค่าน้อยที่สุด พบว่าเงื่อนไขการกัดที่แนะนำเพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวต่ำสุดคือเงื่อนไขที่ค่าความเร็วรอบ 850 rpm อัตราป้อน 43 mm/min และระยะ

บ่อนลึก 1 mm ให้ค่าความหยาบผิวประมาณ 6.575 μm ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ต้องมีการปรับแต่งผิวหลังการกัดตามมาตรฐานความหยาบผิว ISO 1302 (ISO, 2002)

Srivabut *et al.* (2022c) พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง หากลดอัตราป้อนและระยะป้อนลึกลดลงส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง ผู้วิจัยทดลองสุ่มกัดทั้งหมด 10 เงื่อนไข คือค่าความเร็วรอบ 330, 610 และ 850 rpm อัตราการป้อน 43, 120 และ 200 mm/min และระยะป้อนลึก 1, 3 และ 5 mm ทำการประเมินผลการกัดเปรียบเทียบกับการทำนายพบว่า ความแตกต่างค่าทำนายความหยาบผิวและค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นจริงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.136% น้อยกว่า 5% ซึ่งสามารถยอมรับได้ดัง Table 4

3.3 การวิเคราะห์ปัจจัยการกัดที่ส่งผลต่อการเกิดเศษเสี้ยน

3.3.1 การตรวจสอบความปกติของข้อมูลการเกิดเศษเสี้ยน

การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลการเกิดเศษเสี้ยนด้านบนทั้ง 2 ส่วน คือ การกัดขึ้น (up-milling) และการกัดลง (down-milling) (Figure 8) and (Figure 9) พบว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ กระจายตัวของข้อมูลเป็นอิสระ มีความเสถียรภาพของความแปรปรวน และข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นเช่นเดียวกับค่าความหยาบผิว ซึ่งสามารถสรุปนำข้อมูลไปการวิเคราะห์ความแปรปรวนของของการเกิดเศษเสี้ยนของการกัดต่อไปได้

Table 4 Comparing calculated values from regression equations and actual measured values. (R_a)

No.	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Cal. R_a (F_t)	Actual R_a (d_t)	Error $e_t = d_t - F_t$	$\frac{ e_t }{d_t} \times 100$
1	850	43	1	6.250	6.254	0.004	0.064
2	610	120	1	8.282	8.243	-0.039	0.473
3	610	43	3	8.829	7.792	-1.037	13.309
4	850	43	3	6.678	6.797	0.119	1.751
5	610	43	5	10.099	9.989	-0.110	1.101
6	330	120	5	11.142	10.952	-0.190	1.735
7	850	120	1	7.800	7.811	0.011	0.141
8	330	43	1	9.477	9.611	0.134	1.394
9	610	200	5	10.248	10.233	-0.015	0.147
10	610	200	1	9.104	8.992	-0.112	1.246
						MAPE	2.136

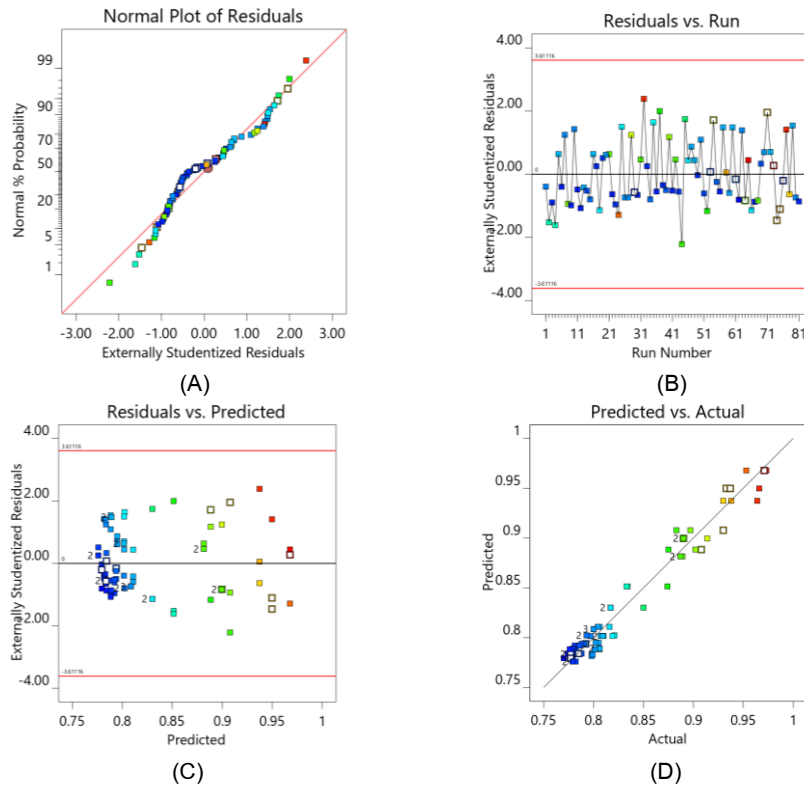


Figure 8 Normality analysis for burr formation (up-milling): (A) normal probability examination (B) residuals vs. run examination (C) residuals vs. predicted response examination and (D) actual vs. predicted response examination.

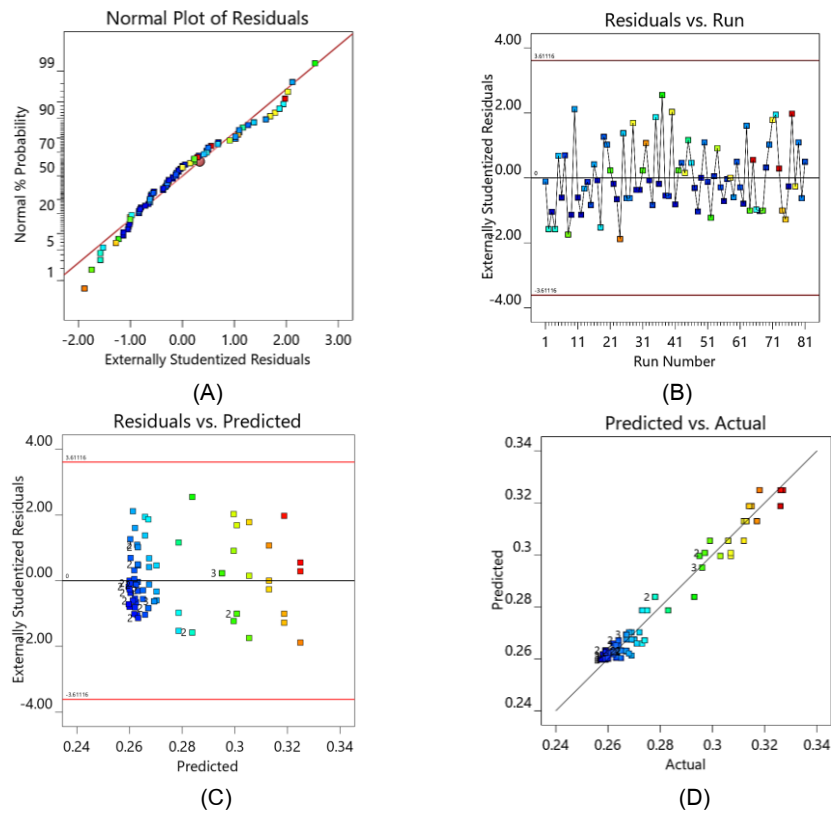


Figure 9 Normality analysis for burr formation (down-milling): (A) normal probability examination (B) residuals vs. run examination (C) residuals vs. predicted response examination and (D) actual vs. predicted response examination.

3.3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเกิด เศษเสี้ยน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเกิดเศษเสี้ยนโดยพิจารณาผลกระทบหลักของปัจจัยการกัด คือ ความเร็วรอบ (S) อัตราป้อน (F) และระยะป้อนลึก (D) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดัง Table 5 และ Table 6 พบว่า

ปัจจัยการกัดทั้งสามมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อการเกิดเศษเสี้ยนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอัตราป้อนมีผลต่อมากที่สุด นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยร่วม คือ ความเร็วรอบกับอัตราป้อน (SF) ความเร็วรอบกับระยะป้อนลึก (SD) และอัตราป้อนกับระยะป้อนลึก (FD) พบว่ามีผลต่อการเกิดเศษเสี้ยนอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05)

Table 5 Results of variance analysis for burr formation (up-milling)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	0.2755	26	0.0106	68.55	< 0.0001*
S	0.0215	2	0.0108	69.67	< 0.0001*
F	0.1173	2	0.0587	379.54	< 0.0001*
D	0.0458	2	0.0229	148.11	< 0.0001*
SF	0.0112	4	0.0028	18.15	< 0.0001*
SD	0.0365	4	0.0091	59.11	< 0.0001*
FD	0.0406	4	0.0101	65.63	< 0.0001*
SFD	0.0025	8	0.0003	2.03	0.0602
Pure Error	0.0083	54	0.0002		
Cor Total	0.2838	80			

R² = 92.22

Table 6 Results of variance analysis for burr formation (down-milling)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	0.0331	26	0.0013	69.72	< 0.0001*
S	0.0027	2	0.0013	73.77	< 0.0001*
F	0.0144	2	0.0072	395.06	< 0.0001*
D	0.0057	2	0.0029	156.80	< 0.0001*
SF	0.0012	4	0.0003	16.54	< 0.0001*
SD	0.0042	4	0.0010	57.32	< 0.0001*
FD	0.0047	4	0.0012	64.46	< 0.0001*
SFD	0.0002	8	0.0000	1.04	0.4180
Pure Error	0.0010	54	0.0000		
Cor Total	0.0341	80			

R² = 93.12

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักการกัดที่ส่งผลต่อค่าเกิดเศษเสี้ยนกัดขึ้นตั้ง Figure 10 และ Figure 11 พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 330 เป็น 850 rpm ส่งผลให้ค่าเกิดเศษเสี้ยนเพิ่มขึ้น (Figure 10 (A) และ 11 (A)) แต่เมื่อเพิ่มอัตราป้อนส่งผลให้ค่าเกิดเศษเสี้ยนลดลง (Figure 10 (B) และ 11 (B)) และเมื่อเพิ่มระยะป้อนลึกส่งผลให้ค่าเกิดเศษเสี้ยนเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้อัตราการตัดเฉือนชั้นงานมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าเกิด

เศษเสี้ยนเพิ่มขึ้น (Figure 10 (C) และ 11 (C)) ดังนั้นหากต้องการค่าการเกิดเศษเสี้ยนที่ต่ำต้องใช้ความเร็วรอบต่ำแต่ต้องกำหนดอัตราป้อนสูงและระยะป้อนลึกต่ำ การเกิดเศษเสี้ยนของการกัดขึ้นจะมีปริมาณมากกว่าการกัดลงเนื่องจากคมตัดหมุนสวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงาน (Yabo *et al.*, 2022) จึงทำให้เศษเสี้ยนกระจายออกไปด้านข้าง

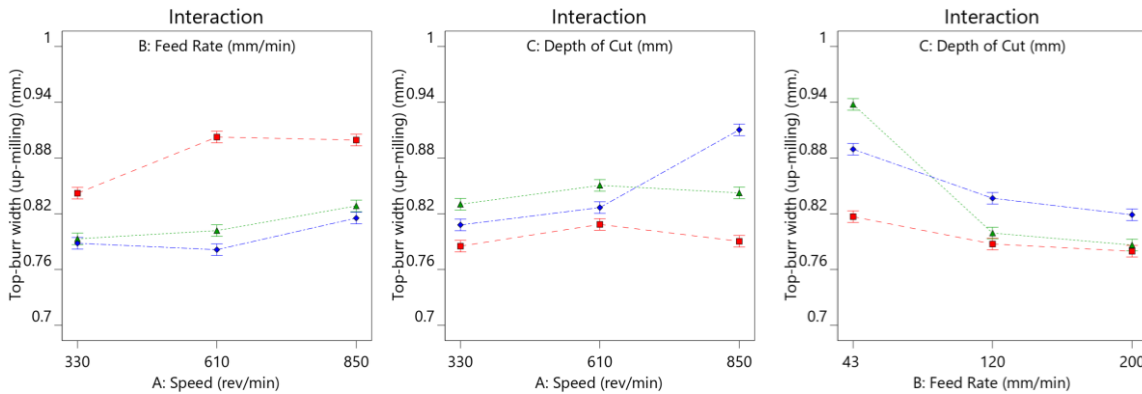


Figure 10 Analysis of factors affecting on the burr formation (up milling): (A) speed and feed rate (B) speed and depth of cut and (C) feed rate and depth of cut

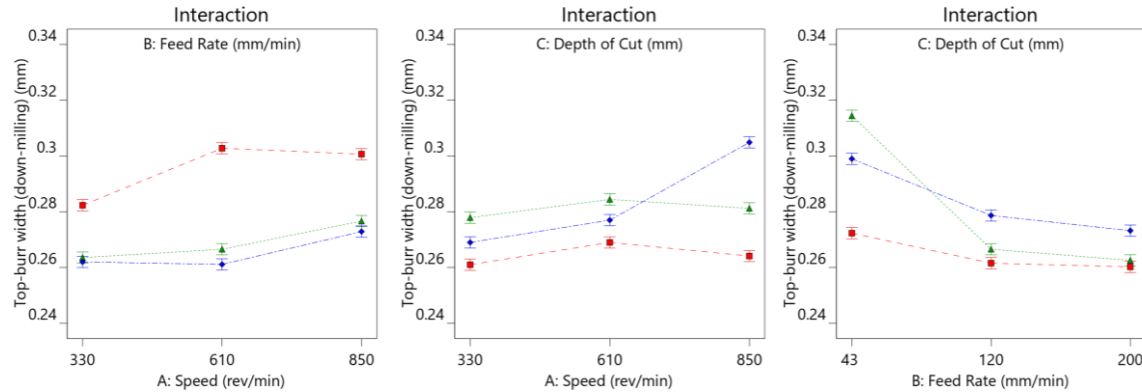


Figure 11 Analysis of factors affecting on the burr formation (down milling): (A) speed and feed rate (B) speed and depth of cut and (C) feed rate and depth of cut

3.3.3 การวิเคราะห์สมการถดถอยของการเกิดเศษเสี้ยน

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ตัวแปรการกัดที่ส่งผลต่อการเกิดเศษเสี้ยนสามารถสร้างสมการถดถอยที่ทำนายค่าเศษเสี้ยนกัดขึ้น ($Burr_1$) ดังแสดงในสมการที่ (2) โดยค่าความผันแปร R-square มีค่า 92.22 และค่า Adjusted R^2 มีค่าเท่ากับ 90.57 สามารถนำสมการไปทำนายผลเพื่อหาคำตอบได้

$$Burr_1 = 0.8280 - 0.0202 S + 0.0006 S + 0.0533 F - 0.0202 F - 0.0334 D + 0.0130 D + 0.0107 SD + 0.0133 SD + 0.0094 SD + 0.0089 SD - 0.0311 FD + 0.0130 FD + 0.0433 FD - 0.0216 FD \quad (2)$$

โดยตัวแปร $Burr_1$ คือ การเกิดเศษเสี้ยนกัดขึ้น

การทำนายค่าเศษเสี้ยนกัดลง ($Burr_2$) ดังแสดงในสมการที่ (3) โดยค่าความผันแปร R-square มีค่า 93.12

และค่า Adjusted R² มีค่า 91.66 สามารถนำสมการไปทำนายผลเพื่อหาค่าตอบได้

$$\begin{aligned} Burr_2 = & 0.2765 - 0.0072 S + 0.0003 S + 0.0188 \\ & F - 0.0076 F - 0.0118 D + 0.0047 D + 0.0035 SD + 0.0040 \\ & SD + 0.0039 SD + 0.0030 SD - 0.0111 FD + 0.0044 FD \\ & + 0.0145 FD - 0.0070 FD \end{aligned} \quad (3)$$

โดยตัวแปร $Burr_2$ คือ การเกิดเศษเสี้ยนกัดลง

มีการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดร่องวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่ส่งผลให้ค่าการเกิดเศษเสี้ยนมีค่าน้อยที่สุด พบว่าเงื่อนไขการกัดที่แนะนำ

เพื่อให้ได้ค่าการเกิดเศษเสี้ยนในการกัดขึ้นและกัดลงต่ำสุดคือ เงื่อนไขที่ค่าความเร็วรอบ 330 rpm อัตราป้อน 200 mm/min และระยะป้อนลึก 1 mm ให้ค่าการเกิดเศษเสี้ยนสำหรับการกัดขึ้นประมาณ 0.770 mm และการกัดลงประมาณ 0.256 mm ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ต้องมีการขัดปรับแต่งเศษเสี้ยนหลังการกัด ผู้วิจัยได้ทดลองการกัด 10 เงื่อนไข เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ความหยาบผิวพบว่า การเกิดเศษเสี้ยนการกัดขึ้นมีความแตกต่างค่าทำนายการเกิดเศษเสี้ยนการกัดขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 1.639% (Table 7) และการกัดลงเฉลี่ยเท่ากับ 1.878% (Table 8) ซึ่งน้อยกว่า 5% ซึ่งสามารถยอมรับได้

Table 7 Comparing calculated values from regression equations and actual measured values. (up-milling)

No.	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Cal. Burr (F _t)	Actual Burr (d _t)	Error e _t = d _t -F _t	$\frac{ e_t }{d_t} \times 100$
1	850	43	1	0.811	0.802	-0.009	1.122
2	610	120	1	0.795	0.816	0.021	2.574
3	610	43	3	0.968	0.951	-0.017	1.788
4	850	43	3	0.937	0.943	0.006	0.636
5	610	43	5	0.888	0.912	0.024	2.632
6	330	120	5	0.802	0.819	0.017	2.076
7	850	120	1	0.784	0.789	0.005	0.634
8	330	43	1	0.788	0.778	-0.010	1.285
9	610	200	5	0.783	0.792	0.009	1.136
10	610	200	1	0.779	0.799	0.020	2.503
MAPE							1.639

Table 8 Comparing calculated values from regression equations and actual measured values. (down-milling)

No.	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Cal. Burr (F _t)	Actual Burr (d _t)	Error e _t = d _t -F _t	$\frac{ e_t }{d_t} \times 100$
1	850	43	1	0.270	0.268	-0.002	0.746
2	610	120	1	0.263	0.267	0.004	1.498
3	610	43	3	0.325	0.317	-0.008	2.524
4	850	43	3	0.313	0.317	0.004	1.262
5	610	43	5	0.299	0.313	0.014	4.473
6	330	120	5	0.266	0.271	0.005	1.845
7	850	120	1	0.262	0.268	0.006	2.239
8	330	43	1	0.263	0.259	-0.004	1.544
9	610	200	5	0.262	0.266	0.004	1.504
10	610	200	1	0.260	0.263	0.003	1.141
MAPE							1.878

4. สรุป

การกัดร่องเป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้ในการแปรรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยการกัดร่องที่ส่งผลต่อคุณภาพรอยกัดวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึกที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและการเกิดเศษเสี้ยน ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการถดถอย ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก มีผลต่อคุณภาพรอยกัด โดยเงื่อนไขการกัดร่องที่เหมาะสมที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดคือ ความเร็วรอบ 850 rpm อัตราป้อน 43 mm/min และระยะป้อนลึก 1 mm เกิดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ 6.575 μm สามารถลดขั้นตอนการปรับแต่งผิวได้ เงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการเกิดเศษเสี้ยนน้อยที่สุด คือ ความเร็วรอบ 330 rpm อัตราป้อน 200 mm/min และระยะป้อนลึก 1 mm ซึ่งทำให้เกิดเศษเสี้ยนกัดขึ้น 0.784 mm และกัดลง 0.262 mm การเกิดเศษเสี้ยนในการกัดขึ้นมีค่ามากกว่ากัดลงเนื่องจากคมกัดส่วนสวนทางกับทิศทางการป้อนชิ้นงานทำให้เกิดแรงต้านและส่งผลต่อการเกิดเสี้ยนเพิ่มขึ้น เมื่อทำการพัฒนาสมการทำนายค่าความหยาบผิวและการเกิดเสี้ยนและทดสอบผลความแม่นยำพบว่าค่าความแตกต่างจากสมการทำนายเทียบกับจากการทดลองของค่าความหยาบผิวมีค่าเฉลี่ย 2.136% เศษเสี้ยนการกัดขึ้นมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.639% และเศษเสี้ยนการกัดลงมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.878% น้อยกว่า 5% แสดงให้เห็นว่าสมการมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ผลจากการศึกษาสามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับกระบวนการกัดแปรรูปวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เพื่อใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในรูปแบบต่าง ๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ ดำเนินงานวิจัย และสถานที่ในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

Acumen research and consulting. 2022. **Wood Plastic Composites Market Analysis - Global**

Industry Size, Share, Trends and Forecast

2022-2030. Available Source: <http://www.acumenresearchandconsulting.com/wood-plastic-composites-market>, September 8, 2022.

Ammar, H., Hitesh, P., Shanmugan, S., Muthuramalingam, T., Ahmed, M. and Ramesh, B. 2022. Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment. **Cleaner Engineering and Technology** 8(2022) 100450.

Cheewawuttipong, W., Homkhiew, C. and Rawangwong, S. 2022. A comparative study on the effect of oil palm fiber contents and types on properties of rubberwood sawdust polypropylene composites. **Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal** 14(11): 31-46. (in Thai)

End mill. 2022. **Wood cutter**. Available Source: <https://www.26works.com>, September 16, 2023.

Hajjahmadi, S. 2019. Burr size investigation in micro milling of stainless steel 316L. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture** 2(4): 296-304.

Huang, R., Kim, B.J., Lee, S., Yang, Z. and Wu, Q. 2013. Co-extruded wood-plastic composites with talc-filled shells: morphology, mechanical, and thermal expansion performance. **BioResources** 8(2): 2283-2299.

ISO. 2002. **ISO 1302:2002(E)**. Available Source: <https://www.sharificadcam.ir/uploaded/8ed0498b-0ddb-4d36-8914-03459fa70e1c.pdf>, September 16, 2023.

Meiqi, S., Dietrich, B., Yingyue, Y., Xiaohang, D., Xiaolei, G., Jinxin, W. and Zhaolong, Z. 2023. Effects of Tool Tooth Number and Cutting Parameters on Milling Performance for Bamboo-Plastic Composite. **International Journal of Forests** (14): 433.

Ministry of Commerce. 2022. **Conditions of the Thai rubber and rubber wood products industry 2022**. Available Source: <https://www.rubber.oie.go.th/box/Article/2566>, September 1, 2022.

Mitutoyo Corporation. 2023. **Portable Surface Roughness Tester SJ-210**. Available Source: <https://www2>

- mitutoyo.co.jp/eng/support/service/catalog/03/E15028.pdf, March 27, 2023.
- Ratanawilai, T. and Taneerat, K. 2018. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. **Construction and Building Materials** 172: 349-357.
- Ratanawilai, T., Jeenapong, S. and Srivabut, C. 2023. Suitable Condition for Face Milling of Wood-Plastic Composite Products on Surface Roughness. **Journal of Ladkrabang Engineering Journal** 40(1): 153-163. (in Thai)
- Saha, S., Ansary, S., Deb, S. and Bandyopadhyay, P.P. 2023. Influence of tool wear on chip-like burr formation during micro-milling, and image processing based measurement of inwardly-deflected burrs. **International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear** 530-531: 205024.
- Smith, P.M. and Wolcott, M.P. 2006. Opportunities for wood/natural fiber-plastic composites (WPCs) in residential and industrial applications. **Forest Products Journal** 56(3): 4-11.
- Srivabut, C., Ratanawilai, T. and Hiziroglie, S. 2018. Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber. **Construction and Building Materials** 162: 450-458.
- Srivabut, C., Ratanawilai, T. and Hiziroglie, S. 2019. Response surface optimization and statistical analysis of composites made from calcium carbonate filler-added recycled polypropylene and rubberwood fiber. **Journal of Thermoplastic Composites Materials** 35(3): 1-25.
- Srivabut, C., Homkhiew, C. and Rawangwong, S. 2022a. Effect of Factors and Optimal Condition in Milling Process of Composites Using I-Optimal Experimental Design. **Journal of Industrial Technology** 18(3): 260-279. (in Thai)
- Srivabut, C., Rawangwong, S., Homkhiew, C. and Rodjananugoon, J. 2022b. Optimal Condition on Surface Roughness in Side Milling of High Density Polyethylene and Rubberwood Flour Composites using Response Surface Methodology. **Journal of Ladkrabang Engineering Journal** 39(1): 23-34. (in Thai)
- Srivabut, C., Rawangwong, S. and Homkhiew, C. 2022c. Influence of Milling Parameters on Surface Roughness of Wood-Plastic Composites Applying I-Optimal Experimental Design. **Journal of Ladkrabang Engineering Journal** 39(4): 22-35. (in Thai)
- Stat Ease. 2023. **Design-Expert**. Available Source: [https:// www.statease.com/software/design-expert/](https://www.statease.com/software/design-expert/), March 27, 2023.
- Yabo, Z., Qingshun, B., Yangyang, S. and Donghai, L. 2022. Burr formation mechanism and machining parameter effect in slot micro-milling titanium alloy Ti6Al4V. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 123(5): 2073-2086.