

อิทธิพลของพารามิเตอร์ในการกัดต่อความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล

Influence of Milling Parameters on Surface Roughness of Wood-Plastic Composites Applying I-Optimal Experimental Design

ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร^{1,*}, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2} และ ชาตรี หอมเขียว^{1,2}

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อया เมืองสงขลา สงขลา 90000

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อया เมืองสงขลา สงขลา 90000

Chainarong Srivabut^{1,*}, Surasit Rawangwong^{1,2} and Chatree Homkhiew^{1,2}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

²Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th

Received: Jun 02, 2022; Revised: Aug 06, 2022; Accepted: Aug 16, 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อความขรุขระผิวจากกระบวนการกัดของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal) โดยมี 3 ปัจจัยการทดลอง คือ ความเร็วรอบ (220 480 และ 720 รอบ/นาที) อัตราป้อน (200 300 และ 400 มิลลิเมตร/นาที) และระยะป้อนลึก (3 5 และ 7 มิลลิเมตร) ทำการผสมและการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการอัดรีดเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) และกระบวนการอัดร้อน (Hot-Press) ตามลำดับ จากนั้น ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และหาสภาวะของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ซึ่งความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 480 เป็น 720 รอบ/นาที ทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่ออัตราป้อนและความลึกในการตัดลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง นอกจากนี้ พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มิลลิเมตร/นาที ความลึกในการตัด 3 มิลลิเมตร ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิวด้านข้าง เท่ากับ 2.580 และ 2.790 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 92.33% และ 93.93% ตามลำดับ

คำสำคัญ: กระบวนการกัด, วัสดุเชิงประกอบ, ความขรุขระผิว, ไอ-ออปติมอล, วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง

Abstract

This research is to study the influence of parameters on surface roughness from milling process of wood-plastic composites (WPCs) applying I-Optimal experimental design. Three factors in this study were speed (200, 480, and 720 rpm), feed rate (200, 480, and 720 mm/min), and depth of cut (3, 5, and 7 mm). The WPC specimens were mixed and compressed by twin screw extruder and hot-press, respectively. In addition, the experimental results were analyzed by Analysis of Variance (ANOVA) and optimized using Response Surface Methodology (RSM). The results can be summarized that increased speed resulted in a decrease in surface roughness, which the speed increased from 480 to 720 rpm, causing the surface roughness to be slightly increased. Moreover, it found that the decreased feed and depth of cut resulted in a decrease in surface roughness. The optimum parameter for side and face milling of WPCs was 720 rpm speed, 200 mm/min feed, and 3 mm depth of cut with a surface roughness condition generates of 2.580 μm and 2.790 μm with desirability score of 92.33% and 93.93%, respectively.

Keywords: Milling, Composite Materials, Surface Roughness, I-Optimal Design, Response Surface Methodology

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำเครื่องจักรมาใช้แทนแรงงานของคนในอุตสาหกรรมการผลิตมากขึ้นเพราะมีความแม่นยำสูงในการปฏิบัติงาน มีความรวดเร็วในการผลิต และสามารถผลิตงานในปริมาณมากๆ ก่อนที่จะใช้เครื่องจักรในการผลิตนั้นผู้ใช้ต้องดูความเหมาะสมของงานและความสามารถของเครื่องนั้นๆ เพื่อให้เหมาะสมในการใช้งาน เพราะเครื่องจักรที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมนั้นมีหลายประเภท ได้แก่ เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องไส เครื่องเจาะ เป็นต้น [1] หากใช้เครื่องจักรผิดประเภทการใช้งานนั้นจะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรหรือชิ้นงานได้ เครื่องกัด (Milling Machine) เป็นเครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตที่หลากหลาย และมีความแม่นยำเที่ยงตรงสูง ด้วยการใช้เครื่องมือที่ของใบมีดในทิศทางที่กำหนดให้ชิ้นงานมีรูปทรงที่เป็นไปตามความต้องการของการผลิตและขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการกัด ประกอบด้วย ความเร็วรอบตัด อัตราป้อน ระยะป้อนลึก ขนาดดอกกัด จำนวนคมตัด และชนิดของวัสดุ [2] ปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อค่าความขรุขระผิว ค่าความแข็ง ค่าความร้อน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัด โดยเครื่องกัดนี้สามารถกัดวัสดุได้หลายชนิด เช่น เหล็ก อลูมิเนียม และวัสดุเชิงประกอบ เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เริ่มมีการนำมาใช้ทดแทนไม้ในธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ดูดซับความชื้นน้อย ไม่ก่อให้เกิดเชื้อรา ย่อยสลายได้ง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ยังสามารถเพิ่มหรือลดความแข็งแรงของวัสดุได้โดยการเติมสารเสริมแรงจำพวกเส้นใยหรือขี้เลื่อยไม้ลงไป ในวัสดุเชิงประกอบพลาสติก [3],[4] เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการใช้งาน รวมถึงการขึ้นรูปให้มีขนาดและรูปร่างเป็นไปตามที่ต้องการใช้งานได้ง่ายและยังสามารถนำมาผ่านกรรมวิธีการผลิตได้หลายประเภท เช่น งานกลึง งานกัด งานตัด งานเจาะ เป็นต้น [5] วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ สามารถผลิตได้โดยการนำเส้นใย ผงไม้ หรือขี้เลื่อยมาผสมกับพลาสติก โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) จากนั้นขึ้นรูปวัสดุเหล่านี้ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การอัดรีดร้อน (Hot Press) การอัดรีด (Extrusion) หรือการฉีดเข้าเป้า (Injection Molding) เป็นต้น [6],[7] ซึ่ง WPCs และไม้ที่ผ่านการขึ้นรูปนั้นยังไม่สามารถใช้งานได้ทันที เนื่องจากยังมีรูปทรงหรือขนาดไม่ตรงกับความต้องการของผู้ผลิต ดังนั้น เพื่อการประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม วัสดุดังกล่าวต้องผ่านกรรมวิธีการผลิตเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างให้เป็นไปตามความต้องการสำหรับการใช้งาน ซึ่งงานกัดเป็นกรรมวิธีการผลิตอย่างหนึ่งที่มีความเหมาะสมและนิยมใช้กันมากในการแปรรูปวัสดุนี้ [8],[9]

จากการศึกษางานวิจัย พบว่า WPCs ที่ผ่านกรรมวิธีการกีด นั้นถูกนำมาใช้ทดสอบค่าความขรุขระผิวโดยปัจจัยที่ส่งผล ต่อค่าความขรุขระผิวในการกีดนั้น คือ ความเร็วรอบตัด อัตรา ป้อน ระยะป้อนลึก โดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาผลการ ตอบสนองและสภาวะที่เหมาะสมในการกีด ดังนั้น งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาโดยการนำปัจจัยในการกีดมาประยุกต์ใช้กับ การออกแบบการทดลองแบบ ไอ-ออปติมอล (I-Optimal Design) ซึ่งมีความแตกต่างกับการออกแบบการทดลองวิธี อื่นๆ คือ ได้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ละเอียดและแม่นยำใน การศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการกีดของ WPCs ต่อ ความขรุขระผิวของวัสดุซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการนำมาใช้งาน

2. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ คือ ไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) จากบริษัทศรีพุทธตรง พารา กรู๊ป จำกัด (จังหวัดตรัง ประเทศไทย) ซึ่งเป็นของเสียที่ เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ ก่อนการผสม RWS ถูกนำไปคัดแยกขนาดโดยการร่อนเพื่อให้ได้ขนาด 40 Mesh (400 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 15 นาที และอบเพื่อลด ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พลาสติก พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene; HDPE) ผลิตจากบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิ คอล จำกัด (จังหวัดระยอง ประเทศไทย) ก่อนการผสม HDPE ถูกนำไปอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็น เวลา 8 ชั่วโมง [10] จากนั้นทำการซีลเก็บไว้เพื่อรอการผสม โดยหลังจากการผสม วัสดุที่ใช้ในการทดลองสำหรับการ กีด มีขนาด 100 × 100 × 40 มม.³ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงานสำหรับการกีด

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องกีดแนวตั้ง ยี่ห้อ Full mark รุ่น FM-18/20 Series (Kaiserslautern, Germany)

2) เครื่องมือตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นดอกเอ็นมิล (End Mill) ยี่ห้อ S.A.P. บริษัท เจพีพี แมชชีน แอนด์ ทูลส์ จำกัด (จังหวัดกรุงเทพฯ ประเทศไทย) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม. (3 ฟัน) โดยมี Helix Angle คือ 30 องศา ค่า Corner Radius คือ 5 มม. ค่า Overall Length คือ 100 มม. และ ค่า Neck Length คือ 30 มม. ตามลำดับ

3) เครื่องทดสอบความขรุขระผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 จากบริษัท สุมิพล คอร์ปอเรชั่น จำกัด (จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย)

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบการทดลองในรูปแบบ ไอ-ออปติมอล (I-Optimal) และทำการวิเคราะห์เพื่อพยากรณ์ สภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) [4],[11] โดยใช้ อัตราส่วนผสมของ WPCs คือ RWS ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (wt.%) และ HDPE ปริมาณ 60 wt.% โดยมี พารามิเตอร์ คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และระยะป้อนลึก (Depth of Cut) โดยแต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ โดยปัจจัยการผสมและสภาวะที่ใช้ในการ ออกแบบการทดลองเกิดจากการทบทวนวรรณกรรมที่ เกี่ยวข้องและการทดลองเบื้องต้นเพื่อให้ได้ถึงตัวแปรต่างๆ และระดับของแต่ละปัจจัยการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งระดับ ของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง แสดงดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกำหนดปัจจัยและระดับการทดลอง

Parameters	(ต่ำ)	(กลาง)	(สูง)
Speed (A) (rpm)	220	480	720
Feed Rate (B) (mm/min)	200	300	400
Depth of Cut (C) (mm)	3	5	7

3.2 การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

นำส่วนผสมในปริมาณที่กำหนดไว้คือ RWS ปริมาณ 40 wt.% และ HDPE ปริมาณ 60 wt.% ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ โดยสภาวะในการผสม คือ ช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว ระหว่าง 160–180°C ความเร็วเกลียว 50 rpm อัตราป้อน 10 รอบ/นาที และแรงดัน 6.89 MPa จากนั้น ทำการอัดเข้าแม่พิมพ์สี่เหลี่ยม ขนาด $100 \times 100 \times 40$ มม.³ เพื่อเตรียมชิ้นงานในการกัด

3.3 การวัดค่าความขรุขระผิว

เมื่อทำการออกแบบการทดลองในรูปแบบ I-Optimal ซึ่งมีทั้งหมด 24 สภาวะ (Run) ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดลองและทำการกัดเรียบร้อยแล้ว จากนั้น ทำการวัดค่าเฉลี่ยของความขรุขระผิว (Average Roughness; Ra) ด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs เป็นระยะทาง 10 มม. และมีค่า Cut-off Length คือ 0.8 มม. โดยกำหนดจุดวัด จำนวน 5 จุด ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางและขอบของชิ้นงาน ตามลำดับ โดยทำการวัดค่าความขรุขระผิวในทิศทางขนานกับทิศทางการกัดโดยในแต่ละค่าของสภาวะการกัดจะวัด 5 ครั้ง (5 ซ้ำ) ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ของแต่ละการทดลอง เพื่อหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของค่า Ra และเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกัด WPCs

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal) เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวและหาสภาวะของการทดลอง ซึ่งการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการนี้มีข้อดีและความแตกต่างกับงานวิจัยอื่นๆ คือ ได้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ เช่น สมการถดถอย (Regression Model) ที่มีความละเอียดและแม่นยำกว่าวิธีการอื่นๆ โดยทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการทางสถิติ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ความเพียงพอของข้อมูล (Model Checking) การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ของผลการทดลอง การนำค่าการตอบสนองไปวิเคราะห์ด้วยแบบสมการถดถอย และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว จากนั้น ตรวจสอบความถูกต้อง

ของตัวแบบสมการถดถอยโดยการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการพยากรณ์ (Prediction) และผลจากการวัดค่าจริง (Observation) ของ WPCs เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการทดลอง

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยเป็นการอธิบายผลการทดลอง ซึ่งจะอธิบายถึงผลกระทบและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในการกัด คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และระยะป้อนลึก (Depth of Cut) ต่อค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness; Ra) ของ WPCs แสดงดังตารางที่ 2 ตลอดจนการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้า

4.1 หลักการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของพารามิเตอร์ต่อความขรุขระผิวการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs

การออกแบบการทดลองมีตัวแปรหรือปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ซึ่งสามารถออกแบบสภาวะที่ใช้ในการทดลองได้ทั้งหมด 24 Run เช่นเดียวกันค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดลอง คือ ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness; Ra) และการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบการจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสม โดยค่า Sequential Model Sum of Squares จะต้องมีนัยสำคัญ ค่า Adjusted Coefficient of Determination ($Adj-R^2$) และค่า Predicted Coefficient of Determination ($Pred-R^2$) จะต้องมีค่าสูงกว่า 75% [1] นอกจากนี้ ค่าความขรุขระผิวจากการออกแบบการทดลองเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองแบบ 2FI เพราะจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติต้องการทราบถึงปัจจัยต่างๆ รวมไปถึงปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยค่า R^2 , ค่า $Adj-R^2$ และค่า $Pred-R^2$ ถูกใช้เพื่อนำมาวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมเช่นกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ค่า $Adj-R^2$ ของค่าความขรุขระผิวจะต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็น

ว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม ใน ส่วนของค่า $Pred-R^2$ อาจมีค่าต่ำกว่าค่า R^2 และ ค่า $Adj-R^2$ เล็กน้อย ซึ่งรูปแบบจำลองที่ได้นี้สามารถประมาณการหรือ อธิบายความผันแปรในข้อมูลได้ นอกจากนี้ ค่า Coefficients

of Variation (C.V.) ของค่าความขรุขระผิวควรมีค่าต่ำ โดย ปกติไม่ควรให้ค่านี้เกินร้อยละ 10 หรือ 10% โดย CV หมายถึง การตรวจวัดสมบัติของวัสดุมีความแม่นยำที่ดี และ สามารถใช้เป็นข้อมูลในการสร้างรูปแบบการจำลองได้ [12]

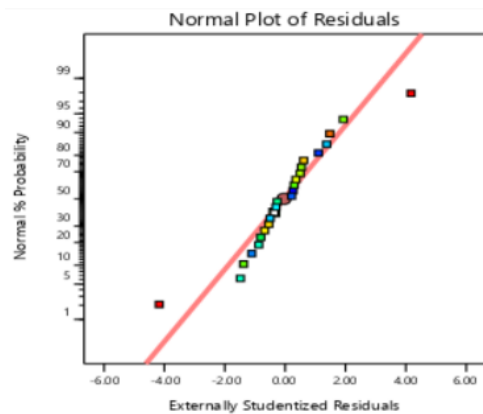
ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออฟติมอล และการหาค่าความขรุขระผิว (Ra) ในการกัดด้านข้างและหน้าของ WPCs

Run	Factors			Surface Roughness (Ra)	
	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Side Milling (μm)	Face Milling (μm)
1	220	200	3	3.049	3.710
2	480	400	7	3.123	3.772
3	480	300	3	2.952	3.122
4	480	200	3	2.831	3.104
5	720	200	5	2.747	2.789
6	220	300	5	3.152	4.060
7	220	200	5	3.138	3.830
8	720	300	3	2.723	2.934
9	480	400	3	3.012	3.606
10	720	400	7	3.057	3.195
11	220	300	3	3.074	4.040
12	720	400	5	2.893	3.107
13	220	400	3	3.162	3.811
14	480	300	7	3.087	3.594
15	480	300	5	3.039	3.495
16	480	200	7	2.893	3.389
17	220	400	5	3.212	3.927
18	480	200	5	2.849	3.242
19	720	300	5	2.771	3.045
20	720	300	7	2.828	3.100
21	720	200	7	2.791	2.931
22	720	400	3	2.922	3.082
23	220	200	7	3.268	4.000
24	220	400	7	3.273	4.120

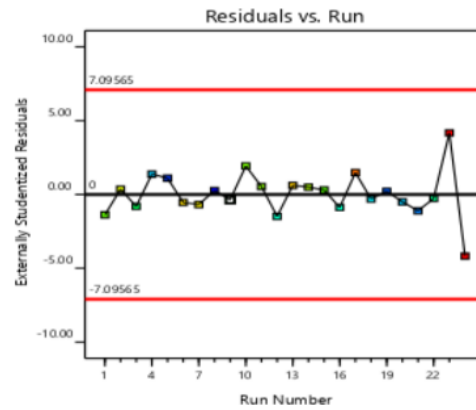
4.2 การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลในการกัก ด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs

การตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลถูกวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ของการกระจายของข้อมูลเพื่อยืนยันความเพียงพอและความน่าเชื่อถือของข้อมูลจากการทดลอง โดยยกตัวอย่างการตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูลในการกักด้านข้างของ WPCs แสดงดังรูปที่ 2 จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า รูปที่ 2 (ก) แสดงกราฟ Normal Probability ของความขรุขระผิวในการกักด้านข้างของ WPCs จะเห็นได้ว่า การกระจายของข้อมูลเป็นแบบปกติตลอดจนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรง (มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง) และไม่พบค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้นสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ รูปที่ 2(ข) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) พบว่า ค่าเศษเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการ

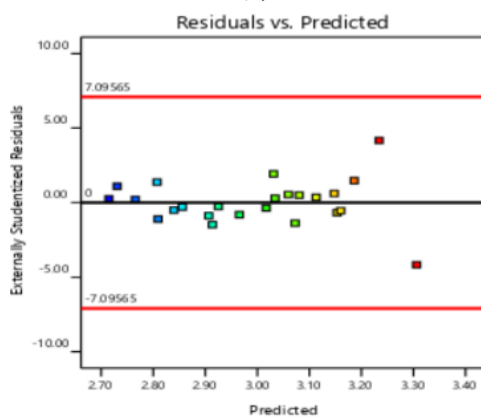
ทดลองที่เป็นแนวโน้ม หรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ รูปที่ 2(ค) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย (Residuals vs. Predicted) พบว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายของข้อมูลนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ เช่นเดียวกับค่าเศษเหลือมีการกระจายรอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน และ รูปที่ 2(ง) แสดงกราฟ ค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง (Predicted vs. Actual) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการพยากรณ์โดยรูปแบบจำลองการถดถอย และการทดลองจริง พบว่า ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งสมการถดถอยเหล่านี้สามารถพยากรณ์ค่าจากการทดลองได้อย่างแม่นยำ ดังนั้น จากการวิเคราะห์ทั้ง 4 กราฟ และข้อมูลเหล่านี้ สามารถสรุปได้ว่า รูปแบบจำลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือและมีความพอเพียง [12],[13]



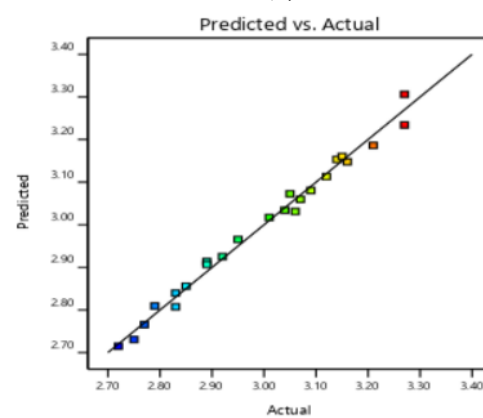
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอย (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (ข) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (ค) กราฟค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย และ (ง) กราฟค่าทำนายต่อค่าการทดลองจริง

4.3 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของความขรุขระผิว

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า Adj-R² จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่า R² ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองให้เห็นว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า R² ของการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs มีค่าเท่ากับ 0.9088 และ 0.9507 ซึ่งมีค่าสูง สามารถสรุปได้ว่า ค่าความขรุขระผิวมีผลกระทบจากปัจจัยที่กำหนด คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก ซึ่งมีค่า 90.88% และ 95.07% ตามลำดับ ส่วนอีก 9.12% และ 4.93% เป็นผลจากปัจจัยอื่นๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่นเดียวกันค่า Adj-R² ของการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs มีค่าเท่ากับ 0.8766 (87.66%) และ 0.9333 (93.33%) ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า Pred-R² เล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8199 (81.99%) และ 0.9032 (90.32%) แสดงให้เห็นว่า จำนวนข้อมูลในการทดลองมีความเพียงพอต่อการทดลอง นอกจากนี้ พบว่า ค่า C.V. ของความขรุขระผิว มีค่าเท่ากับ 3.39% และ 3.13% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำและน้อยกว่า 10% สรุปได้ว่า การตรวจวัดสมบัติของวัสดุมีความแม่นยำสูง [13]

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอย

Sources	Side Milling	Face Milling
Std. Dev.	0.5780	0.1083
Mean	2.99	3.46
C.V.%	3.39	3.13
R ²	0.9088	0.9507
Adj-R ²	0.8766	0.9333
Pred-R ²	0.8199	0.9032

4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการถดถอยของค่าความขรุขระผิว

เมื่อตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล แล้วพบว่า ข้อมูลที่ได้มีความเพียงพอและน่าเชื่อถือ จึงนำข้อมูลมาทำ

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีผลต่อความขรุขระผิวหรือไม่ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($P < 0.05$) ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert (Version 8) แสดงดังตารางที่ 4 และ 5 พบว่า ค่าความขรุขระผิวจากกระบวนการกัดทั้ง 2 กระบวนการ มีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลอง 2FI จะเห็นได้ว่ารูปแบบจำลองนั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ซึ่งมีค่า $P < 0.0001$ และ $P = 0.0003$ ตามลำดับ สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก มีผลต่อค่าความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) นอกจากนี้ จากสมการถดถอยในแต่ละปัจจัยของการทดลองเพื่อระบุผลกระทบสัมพัทธ์ของปัจจัยโดยการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วรอบ (A) มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) สรุปได้ว่าความเร็วในการตัดมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความขรุขระผิว [14],[15] ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Coded Equation ได้ดังสมการ (1) และ (2)

$$Ra \text{ (Side Milling)} = 2.99 + 0.1807A(1) - 0.0101A(2) - 0.0733B(1) - 0.0081B(2) - 0.0578C(1) - 0.0119C(2) + 0.0537A(1)B(1) - 0.0481A(2)B(1) - 0.0126A(1)B(2) + 0.0567A(2)B(2) - 0.0219A(1)C(1) + 0.0096A(2)C(1) + 0.0056A(1)C(2) + 0.0048A(2)C(2) - 0.0011B(1)C(1) - 0.013B(2)C(1) + 0.0063B(1)C(2) + 0.0144B(2)C(2) \quad (1)$$

$$Ra \text{ (Face Milling)} = 3.48 + 0.5050A(1) - 0.0234A(2) - 0.1691B(1) + 0.0485B(2) - 0.1231C(1) - 0.0044C(2) + 0.0323A(1)B(1) - 0.0410A(2)B(1) + 0.1191A(1)B(2) - 0.0999A(2)B(2) - 0.0067A(1)C(1) - 0.0546A(2)C(1) - 0.0400A(1)C(2) + 0.0522A(2)C(2) + 0.0149B(1)C(1) - 0.0386B(2)C(1) - 0.0180B(1)C(2) + 0.0108B(2)C(2) \quad (2)$$

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยจากการกัดด้านข้างของ WPCs

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.6351	18	0.0353	26.64	< 0.0001*	significant
A-Speed	0.4560	2	0.2280	146.30	<0.0001*	
B-Feed	0.0960	2	0.0480	30.81	0.0005*	
C-Depth	0.0609	2	0.0304	19.53	0.0061*	
AB	0.0437	4	0.0109	7.01	0.0278*	
AC	0.0031	4	0.0008	0.4958	0.7418	
BC	0.0024	4	0.0006	0.3822	0.8138	
Residual	0.0307	5	0.0018			
Cor Total	0.6429	23				

หมายเหตุ: * ค่า *P-value* น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยจากการกัดด้านหน้าของ WPCs

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	4.02	18	0.2231	42.51	0.0003*	significant
A-Speed	3.52	2	1.76	335.96	< 0.0001*	
B-Feed	0.2812	2	0.1406	26.82	0.0021*	
C-depth	0.2362	2	0.1181	22.53	0.0032*	
AB	0.1338	4	0.0335	6.38	0.0335*	
AC	0.0281	4	0.0070	1.34	0.3707	
BC	0.0112	4	0.0028	0.5321	0.7196	
Residual	0.0262	5	0.0052			
Cor Total	4.04	23				

หมายเหตุ: * ค่า *P-value* น้อยกว่า 0.05 หมายถึง ความมีนัยสำคัญ

4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองและพื้นผิวตอบสนองของค่าความขรุขระผิว

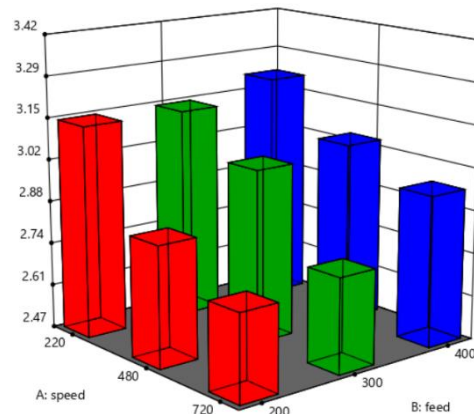
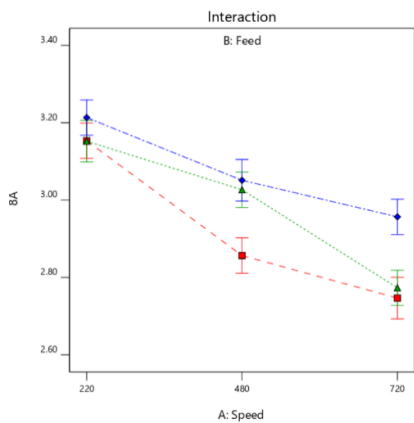
จากสภาวะของการทดลองในตารางที่ 2 นำมาทดสอบค่าความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสมการถดถอยเพื่อหาผลกระทบของพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวของ WPCs แสดงดังในรูปที่ 3-5 ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 220 เป็น 480 และ 720 รอบ/นาที ทำให้ความเร็วรอบของดอกกัดในการตัดเนื้อชิ้นงานสูงขึ้นเช่นกัน แสดงดัง

รูปที่ 3 ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลงอย่างชัดเจน เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 300 และ 400 มม./นาที ทำให้ความเร็วของการเดินชิ้นงานในการตัดเนื้อมากขึ้นเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 4 ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 5 และ 7 มม. ทำให้อัตราการคายเศษออกเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่าความขรุขระเพิ่มขึ้น [16] แสดงดังรูปที่ 5 ตามลำดับ

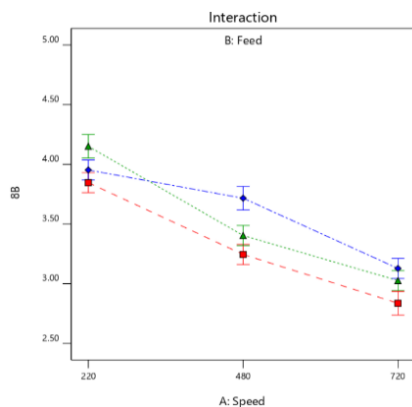
นอกจากนี้ ผลการทดลองสามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว แสดงดังรูปที่ 3-5 ตามลำดับ โดยรูปที่ 3-

5(ก) แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมและกราฟพื้นผิวตอบสนองของการกัดด้านข้างของ WPCs และรูปที่ 3-5(ข) แสดงผลกระทบของปัจจัยร่วมและกราฟพื้นผิวตอบสนองของการกัดด้านหน้าของ WPCs ตามลำดับ พบว่า ถ้าใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและอัตราป้อนลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ในทางตรงข้าม ถ้าใช้ความเร็วรอบลดลงและอัตราป้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดของปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและอัตราป้อน คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที และอัตราป้อนที่ 200 มม./นาที ตามลำดับ ถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้น และใช้ระยะป้อนลึกลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ในทางตรงข้าม ความเร็วรอบลดลงใช้ระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4 โดยสภาวะที่

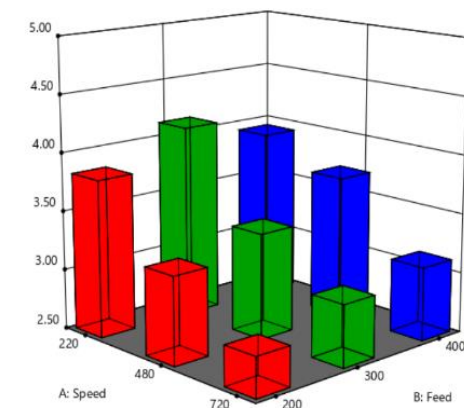
เหมาะสมที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดของปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและระยะป้อนลึก คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ นอกจากนี้ ถ้าอัตราป้อนเพิ่มขึ้นและใช้ระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม ถ้าใช้อัตราป้อนลดลงและใช้ระยะป้อนลึกลดลงจะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุดของปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อนและระยะป้อนลึก คือ อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สภาวะของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของกระบวนการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ [1],[13]



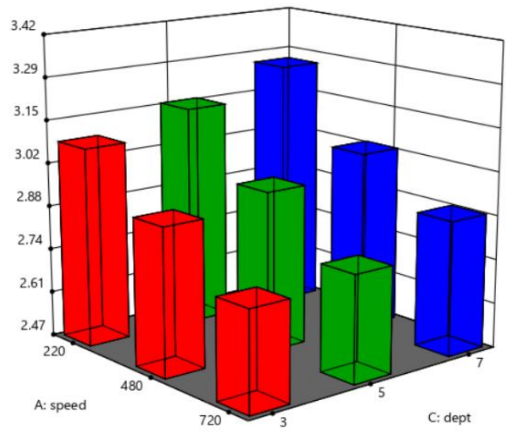
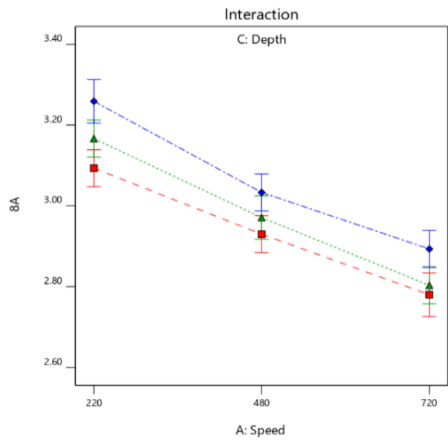
(ก)



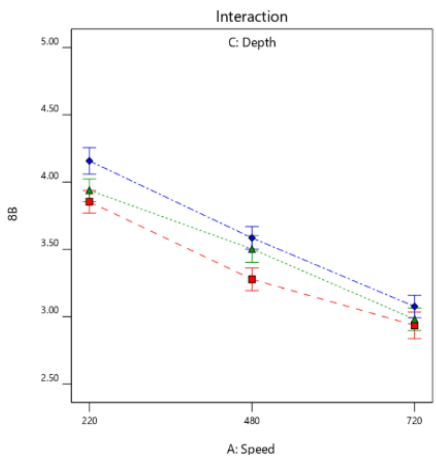
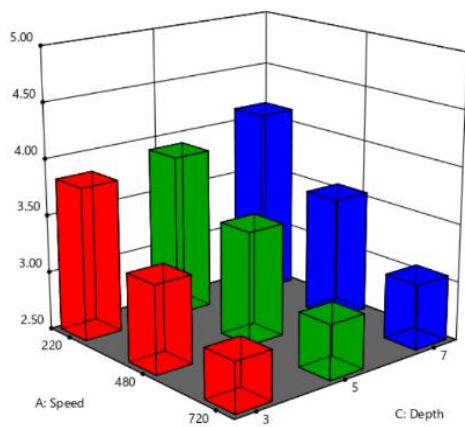
(ข)



รูปที่ 3 ปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว (ก) กัดด้านข้าง (ข) กัดด้านหน้า

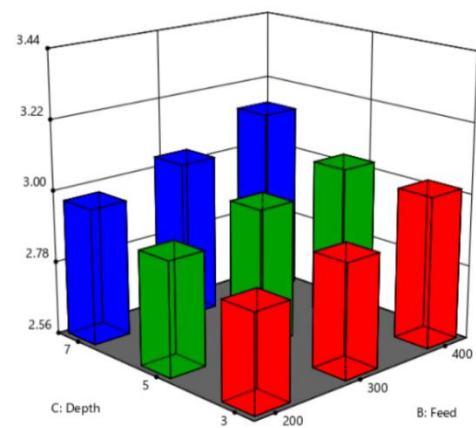
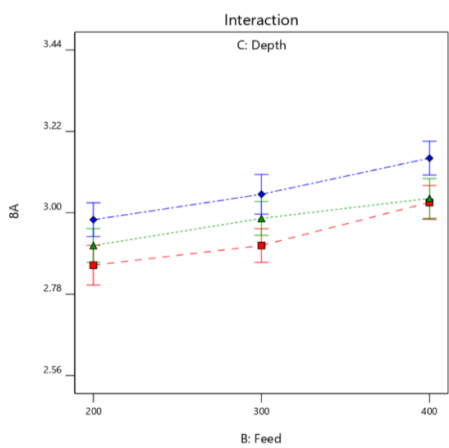


(ก)

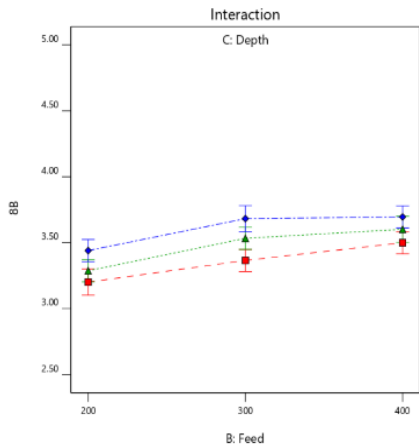


(ข)

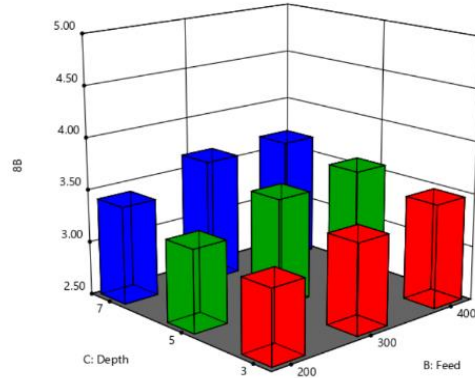
รูปที่ 4 ปัจจัยความเร็วรอบและระยะป้อนลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว (ก) กัดด้านข้าง (ข) กัดด้านหน้า



(ค)



(ข)

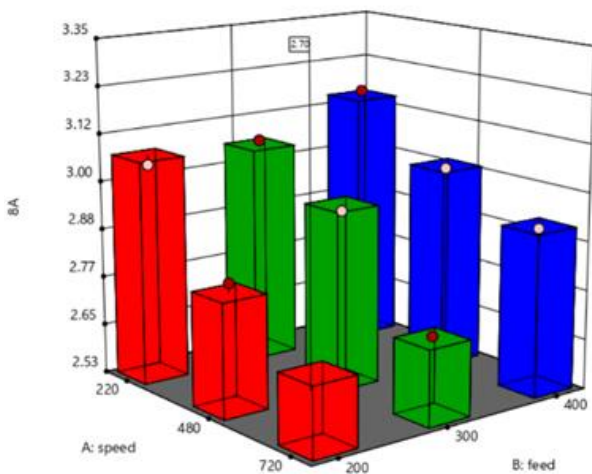


รูปที่ 5 ปัจจัยอัตราป้อนและระยะป้อนลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว (ก) กัดด้านข้าง (ข) กัดด้านบน

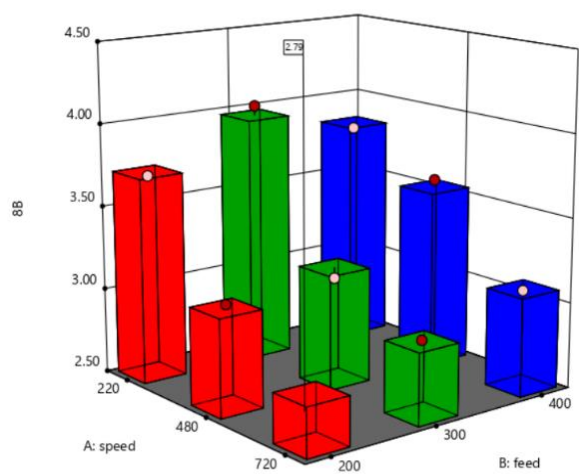
4.6 สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้าง และกัดด้านบน

การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดและการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์โดยเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวที่มีค่าน้อยที่สุด (Minimize) [17],[18] แสดงดังรูปที่ 6 กล่าวคือ ประสิทธิภาพต้องมีความขรุขระผิวน้อยที่สุดจากกระบวนการผลิต โดยมีปัจจัยในการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะกินลึก โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert

(Version 8) ได้สภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวแสดงดังตารางที่ 6 โดยสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.580 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 92.33% นอกจากนี้ สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านบนของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.790 และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 93.93% ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 สภาวะที่เหมาะสมในการกัดของ WPCs: (ก) การกัดด้านข้างและ (ข) การกัดด้านบน

ตารางที่ 6 สภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs

Process	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Prediction (Ra)	Desirability (%)
Side Milling	720	200	3	2.580	92.33
Face Milling	720	200	3	2.790	93.93

4.7 การตรวจสอบพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและกัดด้านหน้าของ WPCs

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs และเพื่อยืนยันความถูกต้องของกระบวนการออกแบบการทดลอง การทดสอบ และการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของงานวิจัย ดังนั้นผู้วิจัยได้ทวนสอบผลการทดลองโดยการนำสภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการพยากรณ์ (Predicted) คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ ผ่านกระบวนการขึ้นรูป การกัด และการทดสอบค่าความขรุขระ

ผิวอีกครั้งเพื่อหาค่าจริง (Observed) ที่ได้จากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 7 โดยทำการทดลอง 5 ซ้ำ ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ที่ได้จากการพยากรณ์มีค่าแตกต่างกันสูงสุดกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงไม่ควรเกิน 5% พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการพยากรณ์ (Predicted) และค่าจริง (Observed) ที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 2.17% สำหรับการกัดด้านข้างและ 3.33% สำหรับการกัดด้านหน้า ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวมีความน่าเชื่อถือในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวของกระบวนการกัดของ WPCs [19],[20]

ตารางที่ 7 ผลการตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs

Process	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Prediction (Ra)	Observed (Ra)	Percentage Error (%)
Side Milling	720	200	3	2.580	2.636	2.17
Face Milling	720	200	3	2.790	2.883	3.33

5. สรุปผล

งานวิจัยเป็นการศึกษาอิทธิพลปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs โดยการออกแบบการทดลองแบบ ไอ-ออปติมอล (I-Optimal) ทำการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และทำการพยากรณ์สภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวดตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยปัจจัยหลักที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึกในกระบวนการตัด การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ ได้ค่าพยากรณ์ความ

ขรุขระผิว เท่ากับ 2.580 ไมโครเมตร สำหรับการกัดด้านข้าง และ 2.790 ไมโครเมตร สำหรับการกัดด้านหน้า นอกจากนี้ยังมีการยืนยันผลการทดลองด้วยค่าจริงของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การออกแบบการทดลอง การทดสอบ และการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของงานวิจัยมีความแม่นยำและเชื่อถือได้จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้กับ WPCs ที่ต้องอาศัยกระบวนการแปรรูปเพื่อใช้งานลักษณะต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม เช่น วัสดุโครงสร้าง เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 (รหัสข้อเสนองการ

วิจัย: DR256508012004) และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Ratanawilaia, P. Pitsuwan, S. Jirasampata and C. Homkhiew, "Influence of Milling Factors on Surface Finish of Wood-Plastic Composites," (in Thai), Ladkrabang Engineering Journal, vol. 32, no. 2, pp. 43–48, 2015.
- [2] C. Homkhiewa, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, "Effects of ground rubber tire and natural rubber contents on mechanical properties of thermoplastic elastomer," (in Thai), RMUTSV Research Journal, vol. 10, no. 3, pp. 553–567, 2021.
- [3] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglie, "Effect of nanoclay, talcum, and calcium carbonate as filler on properties of composites manufactured from recycled polypropylene and rubberwood fiber," Construction and Building Materials, vol. 162, pp. 450–458, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.048.
- [4] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, "Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design," (in Thai), KRU Research Journal, vol. 19, no. 6, pp. 780–793, 2014.
- [5] W. Cheewawuttipong, C. Homkhiew and S. Rawangwong, "A comparative study on the effect of oil palm fiber contents and types on properties of rubberwood sawdust-polypropylene composites," (in Thai), RMUTSV Research Journal, vol. 11, pp. 31–46, 2022.
- [6] N. Ayrilmis, U. Buyuksari and T. Dundar, "Waste pine cones as a source of reinforcing fillers for thermoplastic composites," Journal of Applied Polymer Science, vol. 117, no. 4, pp. 2324–2330, 2010, doi: 10.1002/app.32076.
- [7] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglie, "Response surface optimization and statistical analysis of composites made from calcium carbonate filler-added recycled polypropylene and rubberwood fiber," Journal of Thermoplastic Composites Material, vol. 35, no. 3, pp. 391–415, 2022, doi: 10.1177/0892705719889988.
- [8] R. Huang, B. -J. Kim, S. Lee, Z. Yang and Q. Wu, "Co-extruded wood-plastic composites with talc-filled shells: morphology, mechanical, and thermal expansion performance," BioResources, vol. 8, no. 2: pp. 2283–2299, 2013.
- [9] T. Ratanawilai and K. Taneerat, "Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering," Construction and Building Materials, vol. 172, pp. 349–357, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266.
- [10] S. Khamtree, T. Ratanawilai and S. Ratanawilai, "The effect of alkaline-silane treatment of rubberwood flour for water absorption and mechanical properties of plastic composites," Journal of Thermoplastic Composites Material, vol. 33, no. 5, pp. 599–613, 2020, doi: 10.1177/0892705718808556.
- [11] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglie, "Statistical modeling and response surface optimization on natural weathering of wood-plastic composites with calcium carbonate filler," Journal of Material Cycles and Waste Management, vol. 23, pp. 1503–1517, 2021, doi: 10.1007/s10163-021-01230-7.
- [12] C. Srivabut, C. Homkhiew and S. Rawangwong, "Optimal composition on surface roughness of wood-plastic composites using mixture design and response

- surface methodology,” (in Thai), Ladkrabang Engineering Journal, vol 38, no 4, pp. 151–165, 2021.
- [13] C. Srivabut, S. Rawangwong, C. Homkhiew and J. Rodjananugoon, “Optimal condition on surface roughness in side milling of high-density polyethylene and rubberwood flour composites using response surface methodology,” (in Thai), Ladkrabang Engineering Journal, vol 39, no 1, pp. 23–34, 2022.
- [14] T. Ratanawilai, P. Lekanukit and S. Urapantamas, “Effect of rubberwood and palm oil content on the properties of wood–polyvinyl chloride composites,” Journal of Thermoplastic Composites Material, vol. 27, no. 6, pp. 719–730, 2014, doi: 10.1177/0892705712454863.
- [15] E. O. Olakanmi, E. A. Ogunesan, E. Vunain, R. A. Lafia-Araga, M. Doyoyo and R. Meijboom, “Mechanism of fiber/matrix bond and properties of wood polymer composites produced from alkaline-treated daniella oliveri wood flour,” Polymer Composites, vol. 37, no.9, pp. 2657–2672, 2016, doi: 10.1002/pc.23460.
- [16] J. Lamaming, R. Hashim, O. Sulaiman, T. Sugimoto, M. Sato and S. Hiziroglu, “Measurement of some properties of binderless particleboards made from young and old oil palm trunks,” Measurement, vol 47, pp. 813–819, 2014, doi: 10.1016/j.measurement.2013.10.007.
- [17] S. Rimdusit, W. Smittakorn, S. Jittarom and S. Tiptipakorn, “Highly filled polypropylene rubber wood flour composites,” Engineering Journal, vol 15, no. 2, pp. 17–30, 2011, doi: 10.4186/ej.2011.15.2.17.
- [18] N. Ayrilmis, S. Korkut, E. Tanritanir, J. E. Winandy and S. Hiziroglu, “Effect of various fire retardants on surface roughness of plywood,” Building and Environment, vol. 41, no. 7, pp. 887–892, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.04.011.
- [19] C. Homkhiew, S. Rawangwong, W. Boonchouytan and W. Thongruang, “Mechanical and physical properties of thermoplastic natural Rubber,” (in Thai), Srinakharinwirot University Engineering Journal, vol. 13, no 1, pp. 107–122, 2018.
- [20] S. Tamrakar and R. A. Lopez-Anido, “Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties,” Construction and Building Materials, vol. 25, no. 10, pp. 3977–3988, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.031.