

สภาวะที่เหมาะสมต่อความขรุขระผิวในการกัดข้างของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีน
ความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพาราโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

**Optimal Condition on Surface Roughness in Side Milling of High Density
Polyethylene and Rubberwood Flour Composites using Response Surface Methodology**

ชัยณรงค์ ศรีวະบุตร^{1,*}, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2}, ชาทรี หอมเขียว^{1,2} และ จุลาลักษณ์ โรจนานุกุล¹

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บ่อหยาง เมือง สงขลา 90000

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บ่อหยาง เมือง สงขลา 90000

Chainarong Srivabutr^{1,*}, Surasit Rawangwong^{1,2}, Chatree Homkhiew^{1,2} and Julaluk Rodjananugoon¹

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

² Materials 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: Sep 24, 2021; **Revised:** Dec 06, 2021; **Accepted:** Dec 28, 2021

บทคัดย่อ

การพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ยางพารา ถูกออกแบบการทดลองแบบบล็อก-เบห์เคนและวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด จากการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักทั้ง 3 อย่าง มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุ ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างวัสดุเชิงประกอบ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที อัตราป้อน 315 มิลลิเมตร/นาที และความลึกในการตัด 1.0 มิลลิเมตร ได้ค่าความขรุขระผิว เท่ากับ 2.865 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ เท่ากับ 100% นอกจากนี้ เพื่อยืนยันผลการทดลองและเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการถดถอย เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองมีค่าผิดพลาดเฉลี่ย เท่ากับ 1.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

คำสำคัญ: เครื่องกัด, วัสดุเชิงประกอบ, ความขรุขระผิว, บล็อก-เบห์เคน, วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง

Abstract

Surface roughness prediction in side milling of high density polyethylene and rubberwood flour composites was designed by Box-Behnken and analyzed using Response Surface Methodology. Factors in this study are speed, feed rate, and depth of cut. From the experiment, it was found that all of the factors affected on the surface roughness properties. The

result of optimal condition analysis with the factors on side milling of composites found that the optimal condition was 1,000 rpm speed, 315 mm/min feed rate, and 1.0 mm depth of cut. This condition generates the surface roughness of 2.865 μm with desirability score 100%. Additionally, the real test value and the predicted response were compared to verify the accuracy of the mathematical model of the regression model. The result shows that the bias of those methods is 1.95% in which is within acceptable criteria. It was found that the optimal condition in side milling of composites obtained from the mathematical model were reliable. It is optimal for use in predicting surface roughness in composites.

Keywords: Milling, Composite Materials, Surface Roughness, Box–Behnken, Response Surface Methodology

1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีแนวโน้มในการประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อทดแทนไม้ในธรรมชาติ เนื่องจากปัจจุบันมีการตัดไม้จำนวนมากเพื่อตอบสนองต่อความต้องการทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และเชิงพาณิชย์ ทำให้ไม้มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไป WPCs มีการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ด้านการก่อสร้าง การทำเฟอร์นิเจอร์ ของเล่นเด็กและผู้สูงอายุ และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น [1],[2] นอกจากนี้ ข้อดีของการใช้งาน WPCs คือ ราคาถูก ขึ้นรูปได้ง่าย มีความคงทน ต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือผลิตภัณฑ์สีเขียว เป็นต้น [3],[4]

ผลิตภัณฑ์ WPCs ประกอบด้วยวัสดุหลักอย่างน้อย 2 ชนิด ได้แก่ พลาสติกหรือพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นเนื้อหลักใน WPCs เรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และไม้หรือเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีอนุภาคเล็กๆ และกระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักเหล่านั้น เรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) [5],[6] นอกจากนี้ กระบวนการผลิต WPCs สามารถใช้สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในกระบวนการผลิต WPCs โดยข้อดีของการเติมสารเติมแต่ง คือ เพิ่มสมบัติเชิงกล กายภาพ และความร้อน ให้ดียิ่งขึ้น อาทิเช่น โลหะ เซรามิก และวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น [7]

กระบวนการขึ้นรูป WPCs สามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น การฉีด (Injection) การอัดรีด (Extrusion) และการกดอัดในแม่พิมพ์ (Compression) [4] นอกจากนี้ การแปรรูป WPCs เพื่อให้ได้รูปทรงตามความต้องการของผู้ผลิตและนำไปใช้งานได้เหมาะสมสามารถทำได้โดย

กระบวนการกลึง การตัด และการกัด เป็นต้น การกัด (Milling) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น โลหะ ไม้ พลาสติก และวัสดุผสม ซึ่งมีความแม่นยำเที่ยงตรงสูงด้วยการเคลื่อนที่ของใบมีดในทิศทางที่กำหนดให้ชิ้นงานมีรูปทรงที่เป็นไปตามความต้องการของการผลิตและขึ้นรูปวัสดุชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี เช่น กัดปาดผิวด้านบนชิ้นงาน กัดผิวหน้าขนาน กัดผิวข้างเรียบ เป็นต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการกัดคือ ความเร็วรอบตัด อัตราป้อน ความลึก ขนาดดอกกัด จำนวนคมตัด และชนิดวัสดุที่นำมากัด [6]

พลาสติกหรือพอลิเมอร์ โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ เทอร์โมเซต (Thermoset) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่งพลาสติกที่ได้รับความสนใจและมีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมคือ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride; PVC) และพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่น คือ ทนความร้อนสูงและมีความหนาแน่นต่ำ สามารถนำไปขึ้นรูปและใช้งานในลักษณะต่างๆ ได้ เช่น บรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุปกรณ์ห้องปฏิบัติการ และชิ้นส่วนรถยนต์ [8],[9] วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ที่นำมาใช้ในการผสมกับพลาสติก คือ ฝงไม้หรือเส้นใยธรรมชาติ เช่น ไม้ยางพารา ปาล์ม ข้าวโพด ฟางข้าว และขุยมะพร้าว จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เช่น การทำเฟอร์นิเจอร์ วัสดุโครงสร้าง และการใช้งานด้านอื่นๆ ส่งผลทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตนั้นมีจำนวนเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งของเสียเหล่านี้เป็นส่วนผสมหลักในการผลิต WPCs เป็น

การลดของเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม ลดการเผาไหม้ขยะในสังคม และสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่องค์กร [10],[11]

เนื่องจากเป้าหมายของงานวิจัยนี้เป็นการขึ้นรูป WPCs โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตสู่การนำใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขสถานที่ร่มโล่งแจ้ง หรือสัมผัสกับความชื้นสูง ทำให้มีข้อจำกัดต่อการใช้งานและเงื่อนไขหลักที่มีผลต่อ WPCs คือ อุณหภูมิ ความชื้น และเวลาการใช้งาน ส่งผลให้ WPCs มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล ชีวภาพ และเคมี [12] จากที่กล่าวข้างต้น WPCs มีแนวโน้มของการประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และในการประยุกต์ใช้งานมีความจำเป็นต้องแปรรูป WPCs เป็นรูปร่างต่างๆ ทำให้การกระบวนการกัดข้างเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจมาใช้ในการแปรรูปวัสดุชนิดนี้ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผลสำเร็จของ WPCs มีคุณภาพหรือมีความขรุขระน้อยที่สุด การศึกษาผลกระทบของปัจจัยการกัดข้างที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาหาสภาวะการกัดที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่สำคัญ ดังนั้น ในบทความวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพยากรณ์ความขรุขระผิวในการกัดด้านข้างของ WPCs เนื่องจาก กระบวนการกัดเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตที่สำคัญในการแปรรูปวัสดุที่นิยมใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น โครงสร้าง เฟอร์นิเจอร์ และของเล่นเด็ก เป็นต้น นอกจากนี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

2. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานตัวอย่างเพื่อทดสอบค่าความขรุขระผิว คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE) เกรด V1160 ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) ในวัสดุผสม ผลิตโดยบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ผงไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้กับพลาสติก และสารคู่ควบ (Coupling Agent) ที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์และผงไม้ในงานวิจัยนี้ คือ มาเลอิก

แอนไฮไดรด์กราฟฟอเลทิลีน (Maleic Anhydride-Grafted Polyethylene; MAPE) ก่อนการผสมเม็ดพลาสติก HDPE ถูกนำไปอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อเตรียมการผสม และผงไม้ยางพาราถูกนำไปร่อนเพื่อคัดแยกขนาดผ่านตะแกรงขนาด 80 Mesh (<180 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชม.

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องกัดกึ่งอัตโนมัติ ยี่ห้อ Full Mark รุ่น FM-18S จากบริษัท เทค เอ็นซี จำกัด (กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย) ช่วงของความเร็วยรอบ 45–2,000 รอบ/นาที ช่วงของอัตราป้อนตามขั้นของเฟืองทดได้ใช้งาน 14–900 มม./นาที

2) เครื่องมือตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นดอกเอ็นมิล (End Mill) แบบ 2 คมตัด ยี่ห้อ S.A.P. จากบริษัท Supermill LLC. (Berlin, CT, USA) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. โดยมี Helix Angle คือ 30 องศา ค่า Corner Radius คือ 5 มม. และค่า Overall Length คือ 100 มม. ตามลำดับ

3) เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อมิคูโตโย รุ่น SJ-210 (มิคูโตโย จำกัด กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย)

4) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และผงไม้ยางพารา ขนาด 100 มม. × 100 มม. แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงานตัวอย่างในการทดสอบความขรุขระผิว

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบการทดลองด้วยวิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) และทำการวิเคราะห์เพื่อ

พยากรณ์สภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยใช้สูตรการผสมที่ดีที่สุดจากการทดลองก่อนหน้านี้ คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (66.0 wt%) พงไม้ยางพารา (30.0 wt%) และสารควบคู่ (4.0 wt%) [13] โดยการออกแบบการทดลองที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดไว้ โดยแต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Design-Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA) ปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกัดวัสดุและการทดลองเบื้องต้นเพื่อให้ได้ถึงตัวแปรต่างๆ และระดับของแต่ละปัจจัยการทดลองที่เหมาะสม ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) ระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 1 ผลตอบสนองของการทดลอง คือ ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness; Ra)

ตารางที่ 1 การกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง

Factors	(-1)	(0)	(+1)
Speed (X_1) (rpm)	500	710	1,000
Feed Rate (X_2) (mm/min)	315	450	630
Depth of Cut (X_3) (mm)	0.5	1.0	1.5

3.2 การวัดค่าความขรุขระผิว

เมื่อทำการกัดชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองซึ่งมีทั้งหมด 17 สภาวะการทดลอง (Run) เรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการถอดชิ้นงานออกมาเพื่อวัดหาค่าเฉลี่ยของความขรุขระผิว (Average Roughness; Ra) โดยทำการวัดบนผิวชิ้นงานตัวอย่าง WPCs สำหรับการทดลองนี้จะทำการวัดความขรุขระผิวด้านข้างเป็นระยะทาง 10 มม. โดยกำหนดจุดวัดที่ระยะห่างจากขอบของชิ้นงาน 20 50 และ 80 มม. และมีค่า Cut-off Length คือ 0.8 มม. ตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงานพอดี ใช้เครื่องวัดความขรุขระผิวโดยทำการวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกัดโดยใน

แต่ละค่าของสภาวะการกัดจะวัด 3 ครั้ง (3 ซ้ำ) ของแต่ละการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของค่า Ra และเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกัดข้าง WPCs

3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เพื่อหาสภาวะของการทดลองและนำไปสู่การวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการทางสถิติ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลอง การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง และนำค่าการตอบสนองไปวิเคราะห์ด้วยแบบสมการถดถอย (Regression Model) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบสมการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากสมการพยากรณ์ และผลจากการวัดค่าจริงของ WPCs

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

จากการออกแบบการทดลองแบบบ็อก-เบห์นเคน และการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวโดยใช้โปรแกรม Design-Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) เพื่อกำหนดลำดับการทดลอง โดยมี 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ มีการวิเคราะห์ผลดังนี้

4.1 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทาง

สถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

จากผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว โดยพิจารณาจากค่า Sequential Model Sum of Squares มีนัยสำคัญ Adjusted Coefficient of Determination (Adj-R^2) และ Predicted Coefficient of Determination (Pred-R^2) มีค่าสูง และค่า Lack- of-Fit ไม่มีนัยสำคัญ [14],[15] ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่า Ra มีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองเชิงเส้น ไค้หรือรูปแบบกำลังสอง (Quadratic Model) ซึ่งมีค่า

Adj-R² และ Pred-R² เท่ากับ 99.86% และ 99.63% ตามลำดับ โดยมีค่าใกล้เคียงกันและมากกว่ารูปแบบอื่นๆ และมีค่า *P-value* ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.6775 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ($P > 0.05$) ซึ่งหมายความว่า รูปแบบจำลอง

สมการถดถอยมีความสมรूपกับข้อมูล ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า รูปแบบเชิงเส้นโค้งหรือรูปแบบกำลังสองมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของ WPCs

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองและค่าการตอบสนองของแต่ละสภาวะการทดลอง

Run	Factors			Surface Roughness			Average
	Speed	Feed Rate	Depth of Cut	Test 1	Test 2	Test 3	Ra (μm)
	(rpm)	(mm/min)	(mm)	(μm)	(μm)	(μm)	
1	1,000	450	1.5	3.414	3.483	3.408	3.435
2	500	450	1.5	3.822	4.110	4.167	4.033
3	710	630	0.5	2.984	3.527	3.223	3.245
4	500	630	1.0	3.497	4.170	3.537	3.734
5	710	315	0.5	3.171	2.956	2.927	3.018
6	710	450	1.0	3.393	3.418	3.403	3.405
7	710	450	1.0	3.468	3.451	3.411	3.443
8	1,000	315	1.0	2.831	2.915	2.858	2.868
9	710	450	1.0	3.441	3.404	3.395	3.413
10	500	450	0.5	3.394	3.237	3.461	3.364
11	710	450	1.0	3.316	3.423	3.499	3.412
12	710	315	1.5	3.734	3.429	3.491	3.551
13	710	450	1.0	3.582	3.262	3.457	3.434
14	1,000	450	0.5	2.932	2.927	2.758	2.872
15	1,000	630	1.0	3.438	3.372	3.733	3.515
16	500	315	1.0	3.731	3.460	3.643	3.611
17	710	630	1.5	4.100	3.770	4.096	3.988

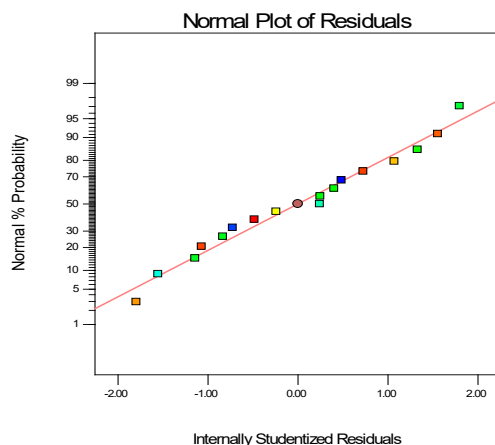
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดข้างของ WPCs

Source	Sequential P-value	Lack of Fit P-value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
Linear	< 0.0001	0.0007	0.9283	0.8769	
2FI	< 0.0001	0.0539	0.9933	0.9841	
Quadratic	0.0024	0.6775	0.9986	0.9963	Suggested
Cubic	0.6775	-	0.9983	-	Aliased

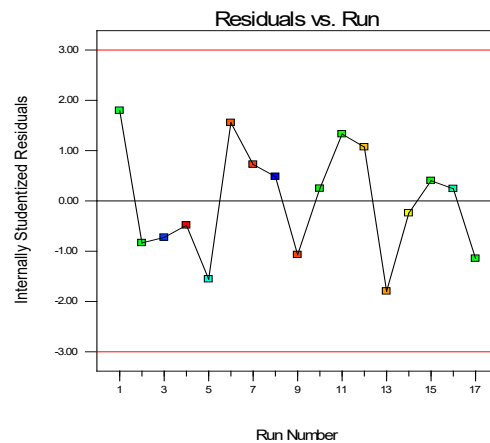
4.2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลอง

การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของรูปแบบจำลองเพื่อยืนยันความเพียงพอและความน่าเชื่อถือของรูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้รับจากการทดลอง จาก **รูปที่ 2(ก)** แสดงกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability) พบว่า ไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟตลอดจนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรงหรือแสดงเป็นเส้นตรง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ **รูปที่ 2(ข)** แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง พบว่า ค่าเศษเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ **รูป**

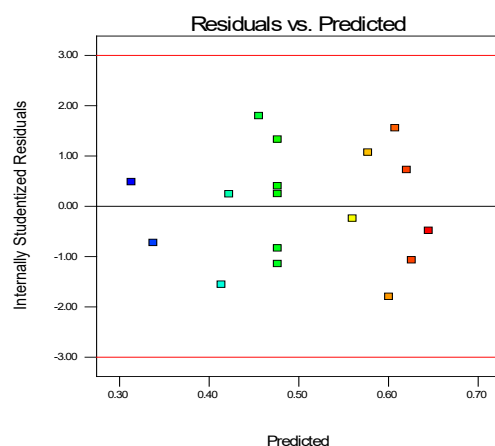
ที่ 2(ค) แสดงกราฟค่าเศษเหลือต่อค่าพยากรณ์ พบว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวที่ไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอนเช่นเดียวกันค่าเศษเหลือมีการกระจายรอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนและคุณสมบัติด้านความเป็นอิสระและ **รูปที่ 2(ง)** แสดงกราฟค่าพยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริงเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการพยากรณ์โดยรูปแบบจำลองการถดถอยและการทดลองจริง พบว่า ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรงซึ่งเป็นการยืนยันว่ารูปแบบจำลองการถดถอยเหล่านี้สามารถพยากรณ์ค่าจากการทดลองได้อย่างแม่นยำดังนั้นจากการวิเคราะห์กราฟทั้ง 4 และข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและมีความพอเพียง



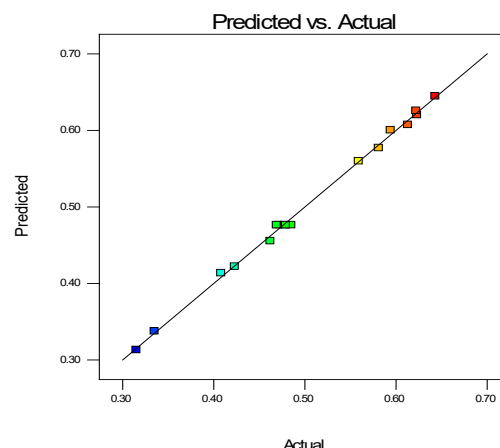
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2 การตรวจสอบความพอเพียงของรูปแบบจำลองการถดถอยของค่าความขรุขระผิว (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ(ข) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (ค) กราฟค่าเศษเหลือต่อค่าที่พยากรณ์ และ (ง) กราฟค่าพยากรณ์ต่อค่าการทดลองจริง

4.3 สมการถดถอย การวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลการตอบสนองของค่าความขรุขระผิว

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลและรูปแบบการทดลองการถดถอย พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยการยืนยันจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และสามารถนำข้อมูลการทดลองผลการวัดค่าความขรุขระผิวมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยทั้งหมดเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อความขรุขระผิวของ WPCs โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) และกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert Design-Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc) แสดงดังตารางที่ 4 จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความขรุขระผิวมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้งหรือกำลัง 2 (Quadratic Model) จะเห็นได้ว่า รูปแบบจำลองนั้นมีค่านัยสำคัญน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัดที่ทำการทดลองมีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs เนื่องจาก มีค่า P -Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ($P < 0.05$) นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์สมการถดถอยสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวและทำการลดรูปแบบจำลอง (Reduced Model) ของการทดลอง แสดงดังตารางที่ 5 โดยทั่วไป การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยจากการลดรูปแบบจำลองนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลจากการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่ไม่มีผลต่อการทดลอง คือ สมการกำลัง 2 ของทั้ง 3 ปัจจัยประกอบด้วย ความเร็วรอบ (X_1^2) อัตราป้อน (X_2^2) และความลึกในการตัด (X_3^2) เนื่องจาก มีค่า P -Value มากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ($P > 0.05$) แสดงดังตารางที่ 5 ตามลำดับ

นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของความลึกในการตัด (X_3) ของการทดลองมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วนรอบ (X_1) และอัตราป้อน (X_2) สามารถสรุปได้ว่า ความลึกในการตัดมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs อย่างชัดเจน ซึ่งการลดรูปสมการถดถอยของผลการทดลอง ดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} Ra = & 4.37157 - (2.38600 \times 10^{-3}) X_1 \\ & - (2.02381 \times 10^{-3}) X_2 + (0.4710) X_3 \\ & + (3.32698 \times 10^{-6}) X_1 X_2 \\ & - (2.12000 \times 10^{-4}) X_1 X_3 \\ & - (6.66667 \times 10^{-4}) X_2 X_3 \end{aligned} \quad (1)$$

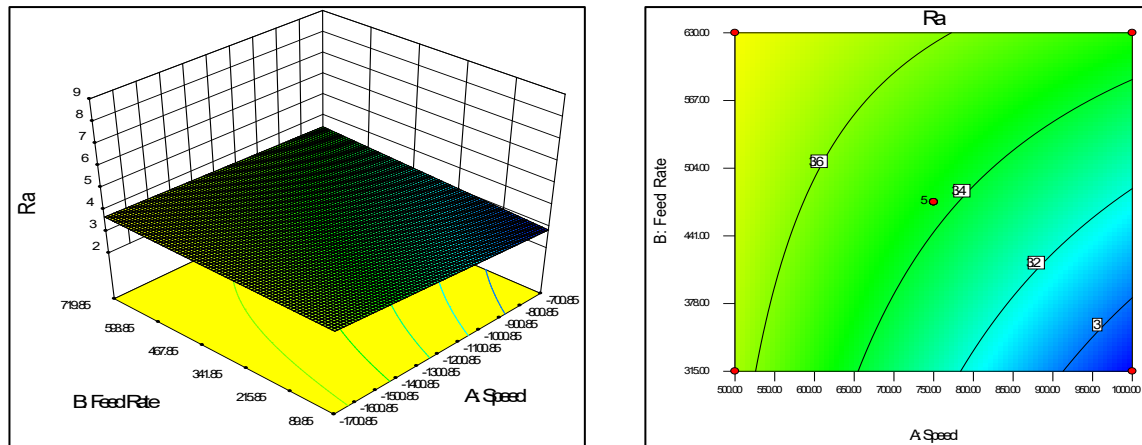
นอกจากสถานะของการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดข้าง WPCs ซึ่งเกิดจากปัจจัย 3 ชนิด คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกในการตัด (Depth of Cut) แล้ว การเปลี่ยนแปลงของค่าความขรุขระผิวในการกัดข้าง WPCs อาจเกิดจากปัจจัยส่วนผสมของ WPCs เช่น ปริมาณพลาสติก ยาง และเส้นใยหรือขนาดอนุภาคของเส้นใยในการผสม [14],[16] เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเกิดจากสารเสริมแรง (Reinforcement) ที่มีอนุภาคที่ใหญ่กว่าวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) นอกจากนี้ ผลการทดลองสามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) เพื่อพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3-5 ตามลำดับ กล่าวคือ จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ถ้าใช้ความเร็วรอบน้อยลงและใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมีค่ามากขึ้น และถ้าใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและอัตราป้อนน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ถ้าใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้นและใช้อัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น และถ้าใช้ความลึกในการตัดน้อยลงและอัตราป้อนน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง และจากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ถ้าใช้ความเร็วรอบน้อยลงและใช้ความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวมากขึ้น และถ้าใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและใช้ความลึกในการตัดน้อยลง จะทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง ตามลำดับ

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองต่อค่าความขรุขระผิว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
					Prob > F	
Model	1.68	9	0.19	1287.48	<0.0001	significant
X_1 -Cutting Speed	0.49	1	0.49	3391.19	<0.0001	
X_2 -Feed Rate	0.29	1	0.29	2020.37	<0.0001	
X_3 -Depth of Cut	0.78	1	0.78	5357.62	<0.0001	
$X_1 X_2$	0.077	1	0.077	530.67	<0.0001	
$X_1 X_3$	2.846×10^{-3}	1	2.846×10^{-3}	19.62	0.0030	
$X_2 X_3$	0.011	1	0.011	77.12	<0.0001	
X_1^2	4.444×10^{-3}	1	4.444×10^{-3}	7.63	0.1009	
X_2^2	4.137×10^{-4}	1	4.137×10^{-4}	2.85	0.1352	
X_3^2	1.161×10^{-3}	1	1.161×10^{-3}	8.00	0.1254	
Residual	1.016×10^{-3}	7	1.451×10^{-4}			
Lack-of-Fit	2.946×10^{-4}	3	9.819×10^{-5}	0.54	0.6775	not significant
Pure Error	7.210×10^{-4}	4	1.803×10^{-4}			
Cor Total	1.68	16				

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยจากการลดรูปแบบจำลอง (Reduced Model)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
					Prob > F	
Model	1.65	6	0.28	403.63	<0.0001	significant
X_1 -Cutting Speed	0.53	1	0.53	771.53	<0.0001	
X_2 -Feed Rate	0.26	1	0.26	376.79	<0.0001	
X_3 -Depth of Cut	0.79	1	0.79	1152.54	<0.0001	
$X_1 X_2$	0.069	1	0.069	100.62	<0.0001	
$X_1 X_3$	2.809×10^{-3}	1	2.809×10^{-3}	4.12	0.0699	
$X_2 X_3$	0.011	1	0.011	16.16	0.1204	
Residual	6.822×10^{-3}	10	6.822×10^{-4}			
Lack-of-Fit	5.769×10^{-3}	6	9.615×10^{-4}	3.65	0.1153	not significant
Pure Error	1.053×10^{-3}	4	2.633×10^{-4}			
Cor Total	1.66	16				



ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) ได้สภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที อัตราป้อน 315 มม./ต่อนาที และความลึกในการตัด 1.0 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.865 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 100% ตามลำดับจากสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวของ WPCs ได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลของปัจจัยว่าสอดคล้องกับการทดลองที่ได้จากค่าพยากรณ์หรือไม่ โดยทำการขึ้นรูป

ชิ้นงานตัวอย่างและทดสอบค่าความขรุขระผิวจากสภาวะที่เหมาะสมของการกีดขวางจากการพยากรณ์ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 6 โดยการทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าความขรุขระผิวจากการทดลองจริงและหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างค่าจากการพยากรณ์ (Predicted) และค่าจากการทดลองจริง (Observed) [5],[17],[18] แสดงดังตารางที่ 6 โดยกำหนดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการพยากรณ์สำหรับค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5% พบว่า ค่าจริงที่ได้จากการทดลองและค่าพยากรณ์ที่ได้จากสมการถดถอยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย เท่ากับ 1.95% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



รูปที่ 6 การยืนยันผลการทดลองจากสภาวะที่เหมาะสมจากการพยากรณ์ผลตอบสนอง

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวของสภาวะที่เหมาะสมระหว่างค่าที่ได้จากการพยากรณ์และผลการทดลองจริง

Factors	X_1 (rpm)	X_2 (mm/min)	X_3 (mm)	Test 1 (μm)	Test 2 (μm)	Test 3 (μm)	Ra (μm)
Observed	1,000	315	1.0	2.775	2.876	2.781	2.810
Predicted				-	-	-	2.865

5. สรุป

การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกีดขวางของ WPCs โดยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ทำการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ทำการพยากรณ์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) โดยสมการการพยากรณ์เป็นฟังก์ชันของปัจจัยการกีดขวาง WPCs ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัด การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มี

อิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิว พบว่า ปัจจัยที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที อัตราป้อน 315 มม./นาที และความลึกในการตัด 1.0 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.865 ไมโครเมตร และการทดสอบสมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว แสดงให้เห็นว่า สมการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวมีความแม่นยำและเชื่อถือได้จากผลการศึกษา สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้กับ WPCs สำหรับกระบวนการแปรรูปเพื่อใช้งานเป็นวัสดุ

ในรูปแบบต่างๆ เช่น วัสดุโครงสร้าง ของเล่นเด็กและ
ผู้สูงอายุ อุปกรณ์ตกแต่งอาคารสถานที่ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ที่สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Srivabut, T. Ratanawilai and S. Hiziroglu, "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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] C. Homkhiew, T. Ratanawilai and W. Thongruang, "The optimal formulation of recycled polypropylene/rubberwood flour composites from experiments with mixture design," *Composites Part B-Engineering*, vol. 56, pp. 350–357, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.08.041.
- [6] T. Ratanawilaia, P. Pitsuwan, S. Jirasampata and C. Homkhiew, "Influence of Milling Factors on Surface Finish of Wood-Plastic Composites," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 32, pp. 43–48, 2015.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] R. Z. Huang, B. J. Kim, S. Lee, Z. Yang and Q. L. 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.
- [10] T. Ratanawilai, P. Lekanukit, 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.
- [11] N. Ayilimis, 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.
- [12] 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,” *Journal of Polymer Composites*, vol. 37, no. 9, pp. 2657–2672, 2016, doi: 10.1002/pc.23460.
- [13] C. Homkhiew, S. Rawangwong, W. Boonchouytan and W. Thongruang, “Mechanical and physical properties of thermoplastic natural Rubber,” *SWU Engineering Journal*, vol. 13, no 1, 107–122, 2018.
- [14] 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*, doi: 10.1177/0892705719889988.
- [15] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, "Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design," *KKU Research Journal*, vol. 19, no. 6, pp. 780–793, 2014.
- [16] N. Ayrimis, 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, 887–892, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.04.011.
- [17] C. Srivabut, T. Ratanawilai, 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.
- [18] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, W. Thongruang, “Optimizing the formulation of polypropylene and rubberwood flour composites for moisture resistance by mixture design,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol 33, no. 9, pp. 810–823, 2018, doi: 10.1177/0731684413518362.