



# ผลกระทบของปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกัดของวัสดุเชิงประกอบโดยการออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล

ชัยณรงค์ ศรีวะบุตร<sup>1\*</sup> ชาตรี หอมเขียว<sup>1,2</sup> และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

<sup>2</sup> หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 มิถุนายน 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 4 พฤศจิกายน 2565; วันที่ตอบรับบทความ: 29 พฤศจิกายน 2565

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 26 ธันวาคม 2565

**บทคัดย่อ:** การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal Design) ถูกใช้เพื่อหาผลกระทบของปัจจัยการทดลอง (ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก) และสภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) โดยมีส่วนผสม คือ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene; HDPE) ปริมาณ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) และขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) ปริมาณ 40 wt% ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมด้วยกระบวนการอัดรีดเกลียวหนอนคู่ (Extrusion) และการอัดร้อน (Compression Molding Machine) ผลการทดลองทั้ง 24 สภาวะการทดลองถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) จากผลการทดลอง พบว่า ปัจจัยทั้งหมดในการทดลองมีผลกระทบต่อค่าความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) กล่าวคือ เมื่อความเร็วรอบของการกัดเพิ่มขึ้นจาก 220 ถึง 720 รอบ/นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลงอย่างชัดเจน และเมื่ออัตราป้อนและระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs ทุกสภาวะการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มิลลิเมตร/นาที และระยะป้อนลึก 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** การทดลองแบบไอ-ออปติมอล; โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง; ขี้เลื่อยไม้ยางพารา; ค่าความขรุขระผิว; พื้นผิวตอบสนอง

# Effect of Factors and Optimal Condition in Milling Process of Composites Using I-Optimal Experimental Design

Chainarong Srivabut<sup>1\*</sup>, Chatree Homkhiew<sup>1,2</sup> and Surasit Rawangwong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

<sup>2</sup> Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

\* Corresponding author, E-mail: chainarong.s@rmutsv.ac.th

Received: 3 June 2022; Revised: 4 November 2022; Accepted: 29 November 2022

Online Published: 26 December 2022

**Abstract:** The I-Optimal experimental design was used to study the effect of factors (speed, feed rate, and depth of cut) and optimal condition on the surface roughness of wood-plastic composites (WPCs). Mixture ratios were high-density polyethylene (HDPE) with 60 percent by weight (wt%) and rubberwood sawdust (RWS) with 40 wt%. The WPC samples were prepared from the extrusion and compression molding machine. The experimental results were evaluated using analysis of variance (ANOVA) and optimized using response surface methodology (RSM). The results displayed that all of the factors significantly ( $p < 0.05$ ) affected on surface roughness of WPCs. The increased speed from 220 to 720 rpm resulted in a decrease for surface roughness values. In addition, it found that the increased feed rate and depth of cut resulted in increase for surface roughness values. The optimal condition for side and face milling of WPCs for all of the conditions was 720 rpm speed, 200 mm/min feed, and 3 mm depth of cut, respectively.

**Keywords:** I-Optimal design; High-density polyethylene; Rubberwood sawdust; Surface roughness; Response surface methodology



## 1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ขึ้นรูปได้ง่าย ปราศจากเชื้อรา และปลอดภัยจากแมลงต่างๆ [1, 2] กระบวนการขึ้นรูป WPCs สามารถกระทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เช่น วัสดุโครงสร้างจะมีการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด (Extrusion) หรือการอัดร้อน (Hot Press) และหากเป็นผลิตภัณฑ์ของใช้ทั่วไปจะมีการขึ้นรูปด้วยการฉีด (Injection Molding) เป็นต้น [3, 4] อัตราส่วนและสภาวะของการผสม WPCs ขึ้นอยู่กับวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) สารเสริมแรง (Reinforcement) และส่วนประกอบอื่นๆ ที่นำมาผสม นอกจากนี้ อาจจะมีสารเติมแต่งเพื่อช่วยในการผสมเพื่อให้ WPCs มีสมบัติที่ดีขึ้นตามความต้องการของผู้ผลิต WPCs มีข้อดีหลายประการ เช่น มีความทนทาน มีต้นทุนการผลิตและบำรุงรักษาต่ำ ดูดซับน้ำน้อย ด้านทานเชื้อราสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5]

การออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal Design) คือ การออกแบบการทดลองแบบครั้งเดียวหรือแบบต่อเนื่องโดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรหรือปัจจัยนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่จะศึกษา เช่น สัดส่วนการผสม [6, 7] เป็นต้น โดยปัจจัยนำเข้าจากการศึกษานั้นจะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์หรือผลตอบสนอง (Output or Response) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ตัวแปร (ปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables) หรือ

ตัวแปร (ปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้ (Design Variables) และตัวแปร (ปัจจัย) ที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Variables) ตามลำดับ [8]

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) ของผลการทดลอง เป็นการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลเชิงสถิติเพื่อจะช่วยให้การสรุปผลที่ได้เหมาะสมกับเหตุและผล โดยการทดลองจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางวิชาการมากกว่าการสรุปผลเชิงพรรณนา โดยมีเครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) โดยเปรียบเทียบปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อการทดลองจากการตั้งสมมติฐาน [9, 10] นอกจากนี้ ยังใช้การวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมของการทดลองโดยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลการตอบสนองโดยการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขหรือปัจจัยนำเข้าที่กำหนด [11, 12] โดยทำการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบกราฟหรืออาจนำเสนอในรูปแบบจำลอง (Empirical Models) ซึ่งผลคำตอบจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบที่มีนัยสำคัญกับผลการตอบสนอง (Response) และควรตรวจสอบความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์โดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการทดลอง (Residual Analysis) และตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) [8, 13]

ผลิตภัณฑ์ของ WPCs ที่เข้ามามีบทบาทในเชิงอุตสาหกรรม คือ การแทนที่ไม้จากธรรมชาติ เนื่องจากมีสมบัติในการใช้งานที่ดีกว่าไม้หลายประการ และสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนายังมีการใช้ในงานวัสดุก่อสร้างเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการใช้



วัสดุทดแทนนั้นยังให้ความสำคัญเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระแสโลกร้อน จึงทำให้ WPCs เข้ามาทดแทนวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างแบบเดิมๆ [14, 15] อย่างไรก็ตามเมื่อมีการนำ WPCs มาประยุกต์ใช้ในงานโครงสร้างแล้ว โดยทั่วไปจำเป็นต้องเลือกลักษณะรูปทรงของวัสดุเพื่อให้เหมาะสมแก่การใช้งาน ซึ่ง WPCs โดยทั่วไปแล้วจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น ซึ่งยังไม่มีหลากหลายของรูปทรงในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งการนำผลิตภัณฑ์ WPCs ไปใช้ประโยชน์ให้มีความหลากหลายมากขึ้นจำเป็นต้องแปรรูป WPCs ให้มีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกันไป และเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานและความต้องการของผู้บริโภค อีกทั้งการขึ้นรูปให้มีส่วนโค้ง เว้า และรูปทรงต่างๆ โดยกระบวนการกัด (Milling) เป็นต้น [5, 16] ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลและกายภาพของชิ้นงาน ดังนั้น ในกระบวนการผลิตหรือการแปรรูป WPCs ให้มีรูปร่างตามที่ต้องการและยังคงไว้ซึ่งสมบัติที่ดีของวัสดุจึงเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญและจำเป็นต้องศึกษา [17, 18]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งมีส่วนผสมคือ พอลิเอธิลีนและผงไม้ยางพารา โดยวัสดุเสริมแรงเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการส่งเสริมการใช้งานจากวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิต โดยทำการออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล โดยวิธีการนี้เป็นวิธีการที่น่าสนใจและยังมีการศึกษาที่น้อย จากนั้น ทำการศึกษาผลกระทบต่อความขรุขระผิว (Ra) ของ WPCs ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และระยะป้อนลึก จากกระบวนการกัด

ด้านข้างและด้านหน้าของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งผลจากการวิจัยนี้จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จาก WPCs ที่มีผิวชิ้นงานที่ดีและมีคุณภาพเหมาะแก่การประยุกต์ใช้ WPCs ให้มีความหลากหลายมากขึ้น

## 2. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกติกและไม้ มีส่วนผสมของวัสดุ 2 ชนิด คือ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene; HDPE) ปริมาณ 60 wt% ทำหน้าที่เป็นวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) และขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Rubberwood Sawdust; RWS) ปริมาณ 40 wt% ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับพลาสติก ก่อนการผสมขี้เลื่อยไม้ยางพาราถูกนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 Mesh (<250 ไมโครเมตร) เป็นเวลา 20 นาที จากนั้น ทำการอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชม. [2] ตามลำดับ

### 2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal Experimental Design) โดยใช้โปรแกรม Design Expert (Version 8.0.6, Stat-Ease, Inc.) ซึ่งกำหนดปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และระยะกินลึก (Depth of Cut) [17] โดยมีระดับของสภาวะทั้งหมด 24 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งระดับของสภาวะในการทดลองนั้น ผู้วิจัยได้ศึกษาจากการทบทวนวรรณกรรมและการทำการทดลองเบื้องต้น (Pre-Lab)



### ตารางที่ 1 ระดับของสภาวะในการทดลองสำหรับการกัด WPCs

Factors	(-1)	(0)	(+1)
Speed (A) (rpm)	220	480	720
Feed Rate (B) (mm/min)	200	300	400
Depth of Cut (C) (mm)	3	5	7

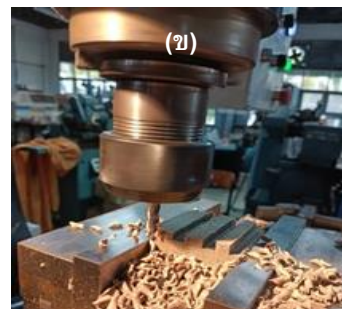
### 2.3 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ

กระบวนการเตรียมชิ้นงานเพื่อใช้ในกระบวนการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs มี 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ (1) ขั้นตอนการผสม โดยนำส่วนผสมทั้ง 2 ชนิด คือ พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง ปริมาณ 60 wt% และซีลีโยไมยางพารา ปริมาณ 40 wt% ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ (Twin-Screw Extruder) โดยมีช่วงอุณหภูมิในการผสมระหว่าง 160-190 °C อัตราป้อน 50 รอบ/นาที แรงดัน 0.1 MPa ตามลำดับ และ (2) ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยการนำเม็ด WPCs มาทำการอัดด้วยเครื่องอัดร้อน (Compression Molding Machine) โดยมีขนาดชิ้นงานตัวอย่าง คือ 100 × 100 × 30 mm<sup>3</sup> (กว้าง × ยาว × หนา) โดยมีอุณหภูมิในการอัดร้อน 180 °C แรงดัน 6.89 MPa เป็นเวลา 15 นาที และทำการหล่อเย็นด้วยอากาศ เป็นเวลา 5 นาที [2, 10] ตามลำดับ จะได้ชิ้นงานตัวอย่างเพื่อใช้ในกระบวนการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs และใช้ในการวัดค่าความขรุขระผิวต่อไป

### 2.4 กระบวนการกัดด้านหน้าและด้านข้างของ WPCs

กระบวนการกัดด้านหน้าและด้านข้างของ WPCs ทำการทดสอบด้วยเครื่องกัดกึ่งอัตโนมัติ ยี่ห้อ ObraeciStrojie รุ่น FGV32 (ประเทศเยอรมัน) ช่วงของความเร็วรอบ 45 - 2,000 รอบ/นาที ช่วงของอัตราป้อนตามขั้นของเฟืองทดโต๊ะงาน 14 - 900 มม./นาที แสดงดังรูปที่ 1

เครื่องมือตัดที่ใช้ในการทดลองเป็นดอกเอ็นมิล (End Mill) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 และ 16 มม. จำนวน 4 คมตัด ยี่ห้อ S.A.P. (ประเทศไทย) 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



รูปที่ 1 (ก) เครื่องกัดแบบกึ่งอัตโนมัติและ (ข) กระบวนการกัดชิ้นงานตัวอย่าง



## 2.5 การทดสอบความขรุขระผิวของ WPCs

การวัดค่าเฉลี่ยของความขรุขระผิวของชิ้นงาน (Average Roughness; Ra) โดยทำการวัดบนผิวชิ้นงานทดสอบ สำหรับการทดลองนี้จะทำการวัดความขรุขระผิวด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs เป็นระยะทาง 10 มม. โดยกำหนดจุดวัดทั้งหมด 3 จุด คือ ที่ระยะห่างจากขอบของชิ้นงานทั้ง 2 ด้าน จำนวน

2 จุด และที่ตำแหน่งกึ่งกลางของชิ้นงาน จำนวน 1 จุด และมีค่า Cut-off Length คือ 0.8 มม. โดยใช้เครื่องวัดความขรุขระผิว ยี่ห้อมิตูโตโย รุ่น SJ-210 (ประเทศไทย) และทำการวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกัด โดยในแต่ละค่าของสภาวะทดลองจะวัด 5 ซ้ำ โดยค่าเฉลี่ยของ Ra แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองและค่าการตอบสนองของแต่ละสภาวะการทดลอง

Run	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Ra ( $\mu\text{m}$ )			
				Side Milling		Face Milling	
				End Mill 12	End Mill 16	End Mill 12	End Mill 16
1	220	200	3	2.933	3.111	4.096	5.261
2	480	400	7	3.041	2.928	4.058	5.119
3	480	300	3	2.689	2.813	3.827	4.863
4	480	200	3	2.642	2.619	3.863	4.818
5	720	200	5	2.471	2.874	3.212	4.912
6	220	300	5	3.308	3.268	4.413	5.763
7	220	200	5	3.009	3.171	4.194	5.641
8	720	300	3	2.637	2.882	3.391	5.129
9	480	400	3	3.014	2.857	4.023	4.932
10	720	400	7	2.921	3.153	3.853	5.324
11	220	300	3	3.001	3.182	4.327	5.389
12	720	400	5	2.879	3.096	3.628	5.268
13	220	400	3	3.043	3.248	4.332	5.421
14	480	300	7	2.981	2.912	4.013	5.012
15	480	300	5	2.846	2.883	3.968	4.923
16	480	200	7	2.843	2.746	3.967	4.947
17	220	400	5	3.282	3.291	4.578	5.681
18	480	200	5	2.724	2.682	3.954	4.877
19	720	300	5	2.659	2.986	3.512	5.188
20	720	300	7	2.762	3.057	3.566	5.243
21	720	200	7	2.548	2.953	3.341	5.051
22	720	400	3	2.832	2.946	3.821	5.209
23	220	200	7	2.849	3.294	4.287	5.814
24	220	400	7	3.386	3.341	4.641	5.817



## 2.6 การทดสอบเชิงกลของ WPCs

ก่อนการทดลองกักชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของ WPCs ประกอบด้วย แรงดึง (ASTM D638) แรงดัด (ASTM D790) แรงอัด (ASTM D6108) และความแข็ง (ASTM D2240) ตามลำดับ ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของ WPCs

Tensile (MPa)	Flexural (MPa)	Compressive (MPa)	Hardness
20.05	34.86	22.43	76.50
0.18*	0.98*	0.15*	0.32*

หมายเหตุ: \* คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## 2.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองแบบไอ-ออปติมอล (I-Optimal Experimental Design) เพื่อหาผลกระทบของปัจจัยและหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง โดยนำไปสู่การวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นด้วยกระบวนการทางสถิติ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ความเพียงพอของรูปแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ของผลการทดลอง การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Model) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความขรุขระผิวที่น้อยที่สุด โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบสมการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่ได้จากการทำนาย (Prediction) และผลที่ได้จากการวัดค่าจริง (Observed) จากการทดลองของ WPCs

## 3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

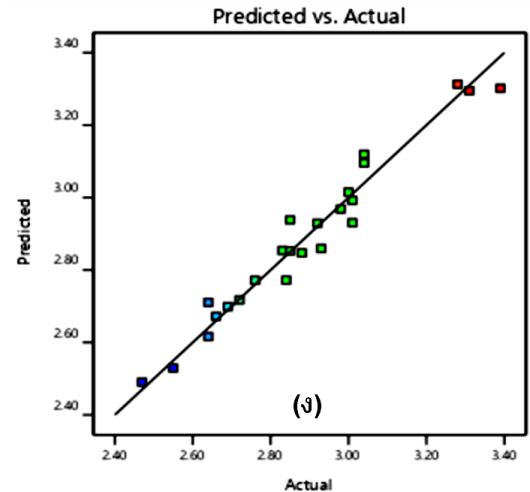
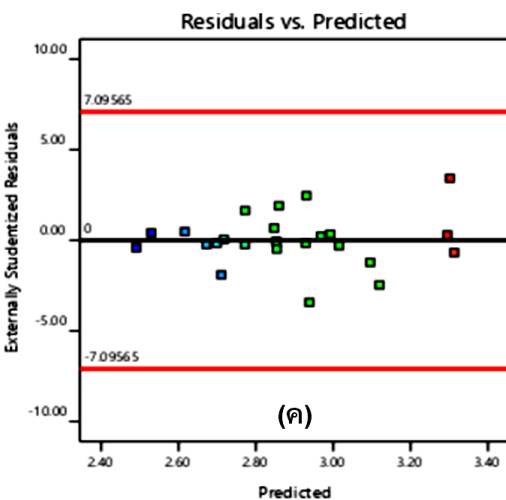
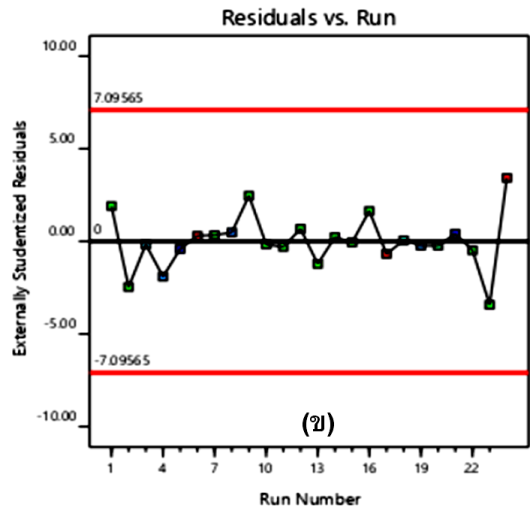
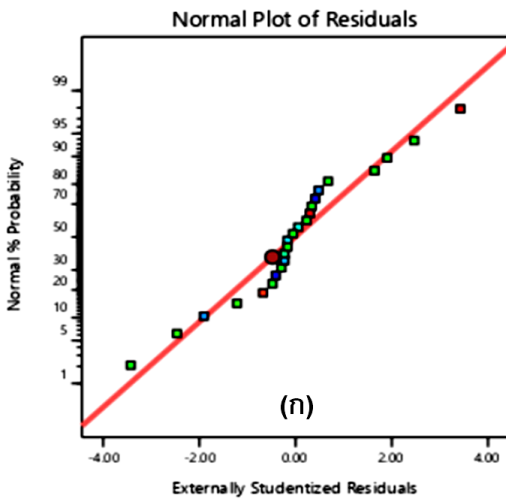
### 3.1 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Checking)

การตรวจสอบความเพียงพอของข้อมูลถูกวิเคราะห์เพื่อยืนยันความถูกต้องและแม่นยำของการออกแบบการทดลอง โดยยกตัวอย่างการวิเคราะห์ความเพียงพอของข้อมูลความขรุขระผิวในการกักชิ้นข้าง โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. แสดงดังรูปที่ 2 โดยรูปที่ 2 (ก) คือ กราฟแสดงความเป็นปกติของข้อมูล (Normal Probability) พบว่า การกระจายของข้อมูลเป็นแบบปกติ ตลอดจนข้อมูลมีการแนบชิดกับเส้นตรง (มีแนวโน้มแสดงเป็นเส้นตรง) และไม่พบค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้น สรุปได้ว่า ข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ รูปที่ 2 (ข) คือ กราฟแสดงค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) พบว่า ค่าเศษเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้น สรุปได้ว่า ข้อมูลของการทดลองทั้ง 2 ส่วนเป็นอิสระต่อกัน รูปที่ 2 (ค) คือ กราฟแสดงค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย (Residuals vs. Predicted) จะเห็นได้ว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวของข้อมูลนั้นไม่สามารถคาดการณ์ได้ และค่าเศษเหลือมีการกระจายอยู่รอบๆ ค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน และรูปที่ 2 (ง) คือ กราฟแสดงค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง (Predicted vs. Actual) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากการทำนายโดยรูปแบบจำลองการถดถอยและการทดลองจริง พบว่า ข้อมูลมี



ความสัมพันธ์กันค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งสมการการถดถอยเหล่านี้สามารถทำนายค่าจากการทดลองได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ สามารถนำข้อมูลจากการทำนายไปใช้เพื่อคาดการณ์ผลลัพธ์ในอนาคตได้

ดังนั้น จากการวิเคราะห์ทั้ง 4 กราฟ จะเห็นได้ว่าข้อมูลเหล่านี้มีความเพียงพอกับการทดลองและสามารถนำไปใช้ในการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมได้



**รูปที่ 2** การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบจำลองการถดถอย:

- (ก) กราฟความเป็นปกติของข้อมูล (ข) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง
- (ค) กราฟค่าเศษเหลือต่อค่าที่ทำนาย และ (ง) กราฟค่าที่ทำนายต่อค่าการทดลองจริง





### 3.2 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวจากกระบวนการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs แสดงดังตารางที่ 4 โดยยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวจากกระบวนการกัดด้านข้างโดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. พบว่า R-Square ( $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 0.9347 และ Adjusted R-Square (Adj- $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 0.9116 ซึ่งมีค่าสูงและใกล้เคียงกันสามารถสรุปได้ว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสมต่อการทดลอง และค่าความขรุขระผิวมีผลกระทบจากปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และระยะป้อนลึก มีค่า 93.47% และ 91.16% ตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าทั้ง 2 ควรจะมีค่าเกิน 0.7500 หรือ 75.00% นอกจากนี้ Predicted-Square (Pred- $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 0.8719 หรือ 87.19% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า  $R^2$  และ Adj- $R^2$  เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า จำนวนข้อมูลในการทดลองมีเพียงพอต่อการใช้ในการทำนายโดยมีความน่าเชื่อถือเท่ากับ 87.19% นอกจากนี้ค่า Coefficients of Variation (C.V.) ของทุกสภาวะการทดลอง มีค่าอยู่ระหว่าง 3.19-4.31% ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่า C.V. ควรจะมีค่าต่ำกว่า 10% แสดงให้เห็นว่า การทดลองมีการตรวจวัดสมบัติของวัสดุที่มีความถูกต้องและแม่นยำที่ดี [16, 17]

### 3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการการถดถอยที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวสำหรับการกัดด้านข้างของ WPCs

จากผลการตรวจสอบความเพียงพอของข้อมูลพบว่า ข้อมูลมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลการวัดค่าความขรุขระผิวมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษามีผลต่อค่าความขรุขระผิวหรือไม่ โดยกำหนดที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ( $P < 0.05$ ) ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert แสดงดังตาราง 5 พบว่า ค่าความขรุขระผิวมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลอง 2FI จะเห็นได้ว่า รูปแบบจำลองทั้งหมดนั้น มีค่า  $P < 0.0001$  [17, 19] สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก มีอิทธิพลต่อค่าความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยสัญลักษณ์ความเร็วรอบ A(1) และ A(2) เป็นความละเอียดของการวิเคราะห์สมการถดถอยที่ออกแบบการทดลองโดยไอ-ออปติมอล (I-Optimal Design) นอกจากนี้ การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมของการทดลอง พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และอัตราป้อน (B) ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และระยะป้อนลึก (C) มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ต่อค่าความขรุขระผิว ยกเว้นปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ต่อค่าความขรุขระผิว สำหรับการกัดด้านข้างของ WPCs โดยใช้ End Mill ขนาด 12 และ 16 มม. ตามลำดับ



ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติ

Sources	Side Milling		Face Milling	
	End Mill 12	End Mill 16	End Mill 12	End Mill 16
Std. Dev.	0.669	0.0395	0.0849	0.1051
MEAN	2.90	3.01	4.09	5.23
R <sup>2</sup>	0.9347 (93.47%)	0.9522 (95.22%)	0.9251 (92.51%)	0.9187 (91.87%)
Adj-R <sup>2</sup>	0.9116 (91.16%)	0.9424 (94.24%)	0.9030 (90.30%)	0.8900 (89.00%)
Pred-R <sup>2</sup>	0.8719 (87.19%)	0.9241 (92.41%)	0.8738 (87.38%)	0.8364 (83.64%)
C.V.%	3.57	4.31	3.19	4.01

นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์สมการถดถอยในแต่ละปัจจัยของการทดลอง ก่อนนำมาวิเคราะห์เพื่อเป็นประโยชน์ในการระบุผลกระทบสัมพัทธ์ของปัจจัยโดยการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วยรอบในการตัด (A) มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) สรุปได้ว่า ความเร็วยรอบในการตัดมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความขรุขระผิว ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Coded Equation ได้ ดังสมการที่ (1) และ (2)

### 3.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการการถดถอยที่เหมาะสมของความขรุขระผิวสำหรับการกัดด้านหน้าของ WPCs

การวิเคราะห์ความแปรปรวนและสมการการถดถอยที่เหมาะสมของความขรุขระผิวสำหรับการกัดด้านหน้าของ WPCs แสดงดังตารางที่ 5 โดยกำหนด รัศมีนัยสำคัญที่ 0.05 ( $P < 0.05$ ) พบว่า ค่าความขรุขระผิวมีรูปแบบจำลองที่เหมาะสม คือ รูปแบบจำลอง 2FI กล่าวคือรูปแบบจำลองนั้นมีค่ารัศมีนัยสำคัญคือ  $P < 0.0001$  [17, 19] สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักที่มีผล

$$\begin{aligned} Ra \text{ (End Mill 12 mm)} = & 2.91 + 0.2296A(1) - \\ & 0.0126A(2) - 0.1437B(1) - 0.0148B(2) - \\ & 0.0870C(1) + 0.0096C(2) + 0.0185A(1)B(1) + \\ & 0.0107A(2)B(1) + 0.0552A(1)B(2) - \\ & 0.0615A(2)B(2) - 0.0648A(1)C(1) + \\ & 0.0007A(2)C(1) + 0.0152A(1)C(2) + \\ & 0.0196A(2)C(2) + 0.0474B(1)C(1) - \\ & 0.0370B(2)C(1) - 0.0281B(1)C(2) - \\ & 0.0004B(2)C(2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Ra \text{ (End Mill 16 mm)} = & 3.01 + 0.2378A(1) - \\ & 0.1992A(2) - 0.1022B(1) + 0.0244B(2) - \\ & 0.0778C(1) + 0.0089C(2) + 0.0450A(1)B(1) - \\ & 0.0317A(2)B(1) - 0.0013A(1)B(2) + \\ & 0.0250A(2)B(2) + 0.0106A(1)C(1) + \\ & 0.0239A(2)C(1) - 0.0128A(1)C(2) - \\ & 0.0011A(2)C(2) - 0.0011B(1)C(1) + \\ & 0.0006B(2)C(1) - 0.0094B(1)C(2) + \\ & 0.0039B(2)C(2) \end{aligned} \quad (2)$$



อย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs [1, 17, 20] เช่นเดียวกันกับการกัดด้านหน้าของ WPCs นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ปัจจัยร่วมของการทดลอง พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และอัตราป้อน (B) และปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อน (B) และระยะกินลึก (C) มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs ยกเว้น ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และระยะกินลึก (C) มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ต่อค่าความขรุขระผิว สำหรับการกัดด้านหน้าของ WPCs โดยใช้ End Mill ขนาด 12 มม. เนื่องจาก End Mill ขนาด 12 มม. มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการกัด WPCs ดังนั้น เมื่อมีการปรับความเร็วรอบ (A) ให้มีความสัมพันธ์กับอัตราป้อน (B) ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ ปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และอัตราป้อน (B) และปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบ (A) และระยะป้อนลึก (C) มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ต่อค่าความขรุขระผิวของทุกสภาวะการทดลองสำหรับการกัดด้านหน้าของ WPCs ยกเว้นปัจจัยร่วมระหว่างอัตราป้อน (B) และระยะกินลึก (C) มีผลอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ต่อค่าความขรุขระผิว โดยใช้ End mill ขนาด 16 มม. นอกจากนี้ จากสมการถดถอยค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วรอบในการตัด (A) มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) สรุปได้ว่า ความเร็วในการตัดมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความขรุขระผิว เช่นเดียวกับการกัดด้านข้างของ WCs แสดงดังสมการ (3) และ (4)

$$\begin{aligned} Ra \text{ (End Mill 12 mm)} = & 4.09 + 0.2574A(1) + 0.0493A(2) - 0.1389B(1) + 0.0330B(2) - 0.0989C(1) + 0.0270C(2) - 0.0007A(1)B(1) + 0.0174A(2)B(1) + 0.0236A(1)B(2) - 0.0178A(2)B(2) + 0.0193A(1)C(1) - 0.0559A(2)C(1) - 0.0267A(1)C(2) + 0.0493A(2)C(2) + 0.0122B(1)C(1) - 0.0130B(2)C(1) - 0.0137B(1)C(2) + 0.0044B(2)C(2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Ra \text{ (End Mill 16 mm)} = & 5.23 + 0.3933A(1) - 0.2907A(2) - 0.1062B(1) + 0.0289B(2) - 0.1359C(1) + 0.0159C(2) + 0.0454A(1)B(1) + 0.0428A(2)B(1) + 0.0156A(1)B(2) - 0.0420A(2)B(2) - 0.1346A(1)C(1) + 0.0628A(2)C(1) + 0.0502A(1)C(2) - 0.0263A(2)C(2) - 0.0148B(1)C(1) - 0.0002B(2)C(1) - 0.0039B(1)C(2) + 0.0113B(2)C(2) \end{aligned} \quad (4)$$

### 3.5 ปัจจัยที่มีผลตอบสนองของค่าความขรุขระผิวและการหาค่าพื้นผิวตอบสนอง

ผลกระทบของปัจจัยหลัก ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (A) และอัตราป้อน (B) และระยะป้อนลึก (C) ที่มีผลต่อการตอบสนอง คือ ความขรุขระผิวของ WPCs แสดงดังรูปที่ 3 โดยยกตัวอย่างการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองของการกัดข้าง โดยใช้ End mill ขนาด 16 มม. จากการศึกษา พบว่า เมื่อความเร็วรอบของการกัดเพิ่มขึ้นจาก 220 เป็น 480 รอบ/นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจาก ความเร็วรอบในช่วงนี้ไม่ส่งผลต่อ



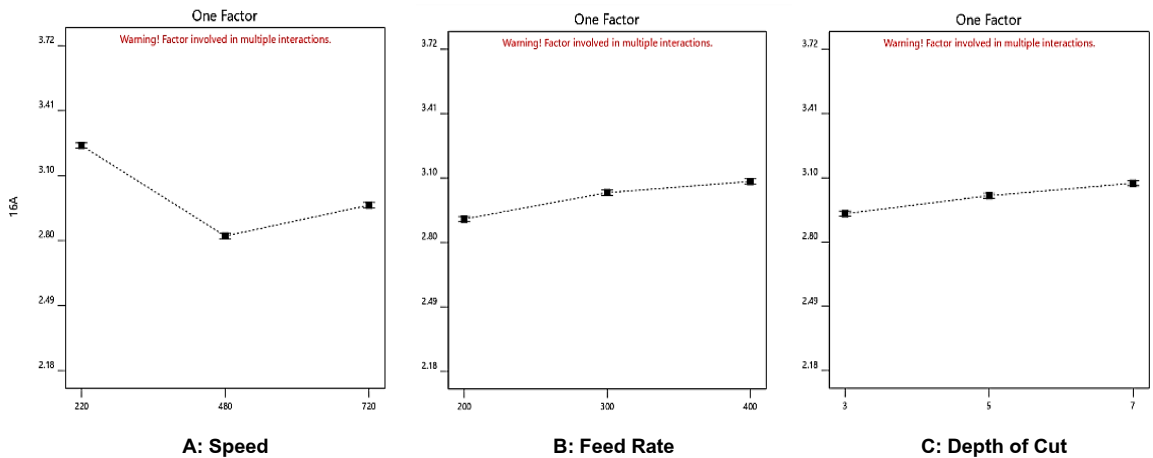
การหลอมเหลวของพลาสติกและเป็นช่วงความเร็วรอบที่เหมาะสม และเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 480 เป็น 720 รอบ/นาที ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเกิดจากความร้อนสะสมในชิ้นงานทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวบริเวณผิว ส่งผลให้เกิดความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 300 และ 400 มม./นาที ทำให้

ความเร็วของการเดินของชิ้นงานในการตัดเฉือนมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจาก เศษของผิวงานที่กีดเกาะติดอยู่บริเวณผิวชิ้นงาน ส่งผลให้เพิ่มความขรุขระของผิวชิ้นงาน และเมื่อระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 5 และ 7 มม. ทำให้อัตราการเอาน้ำออกเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย [20]

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองการถดถอยต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs

Sources	P-Value			
	Side Milling		Face Milling	
	End Mill 12 mm	End Mill 16 mm	End Mill 12 mm	End Mill 16 mm
Model	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*
A-Speed	< 0.0001*	<0.0001*	<0.0001*	<0.0001*
B-Feed	< 0.0001*	<0.0001*	< 0.0001*	0.0017*
C-depth	0.0002*	<0.0001*	0.0002*	0.0002*
AB	0.0107*	0.0074*	0.2348	0.0258*
AC	0.0209*	0.0465*	0.0482*	0.0057*
BC	0.0874	0.2012	0.7413	0.8015

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

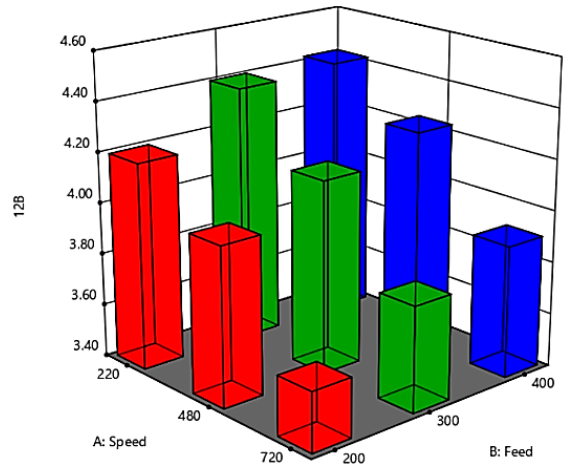
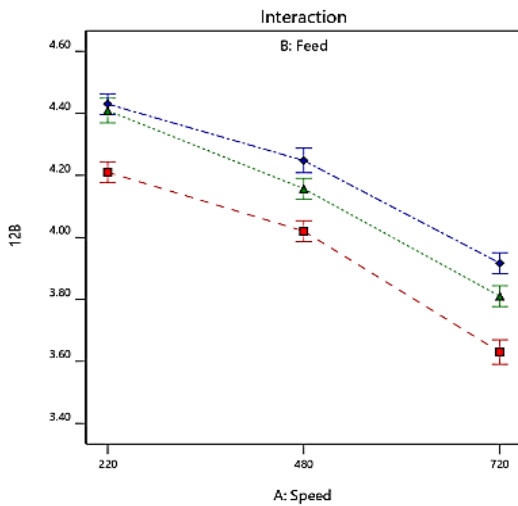


รูปที่ 3 ผลกระทบแต่ละปัจจัยต่อความขรุขระผิว



นอกจากนี้ ผลการทดลองสามารถนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) ทำนายค่าความขรุขระผิว [10, 16] โดยยกตัวอย่างปัจจัยที่มีผลค่าความขรุขระผิวและพื้นผิวตอบสนองของการกัดด้านหน้า โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. แสดงดังในรูปที่ 4 - 6 ตามลำดับ กล่าวคือ จากรูปที่ 4 แสดงความเร็วรอบและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs จะเห็นได้ว่า ถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและใช้อัตราป้อนลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง และถ้าใช้ความเร็วรอบลดลงและอัตราป้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยสุด คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที และอัตราป้อนที่ 200 มม./นาที จากรูปที่ 5 แสดงความเร็วรอบและระยะป้อนลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs จะเห็นได้ว่า ถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและใช้ระยะ

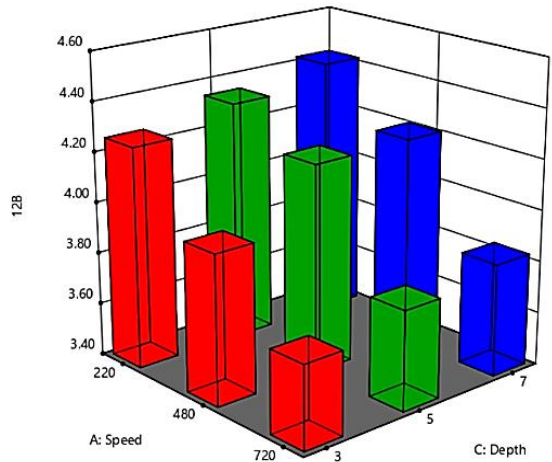
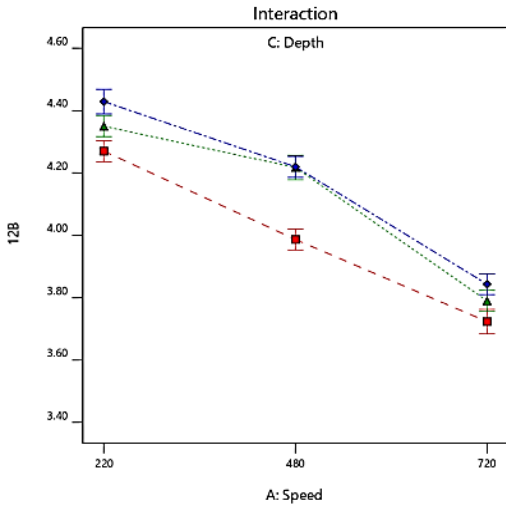
กินลึกลดลง ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง และถ้าใช้ความเร็วรอบลดลงและระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้น โดยพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยสุด คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. และจากรูปที่ 6 แสดงอัตราป้อนและระยะป้อนลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs จะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นและใช้ระยะป้อนลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่ออัตราป้อนลดลงและใช้ระยะกินลึกลดลง จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวดังตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ที่ให้ค่าความขรุขระผิวน้อยสุด คือ อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. ตามลำดับ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยร่วมดังกล่าวนำไปสู่การหาสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวของ WPCs



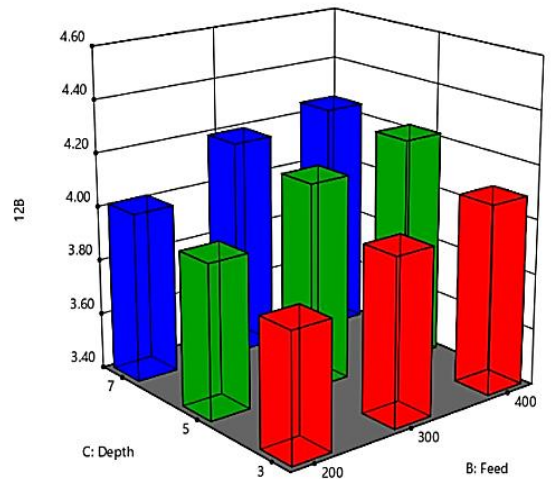
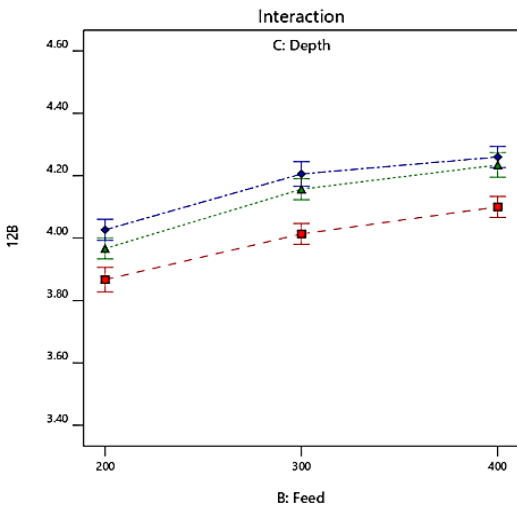
รูปที่ 4 อิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบและอัตราป้อนที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของการกัดด้านหน้าโดยใช้ End mill ขนาด 12 มม.



บทความวิจัย



รูปที่ 5 อิทธิพลของปัจจัยความเร็วรอบและระยะกินลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของการกัดด้านหน้าโดยใช้ End mill ขนาด 12 มม.



รูปที่ 6 อิทธิพลของปัจจัยอัตราป้อนและระยะกินลึกที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวของการกัดด้านหน้าโดยใช้ End mill ขนาด 12 มม.



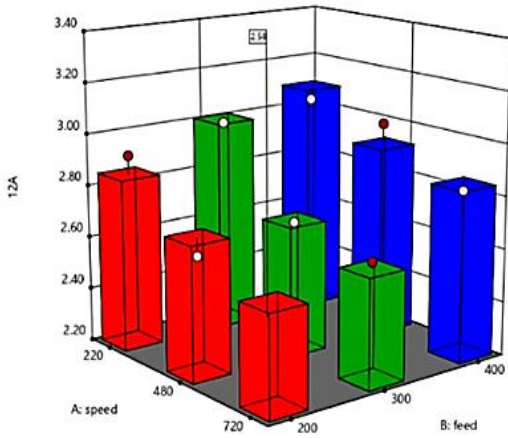
### 3.6 สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและกัดด้านหน้า

การวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดและการทำนายค่าความขรุขระผิวโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) [2, 5] เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์โดยเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวที่มีค่าน้อยที่สุด (Minimize) ของ WPCs แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ กล่าวคือ ประสิทธิภาพของผิวชิ้นงานที่ดีต้องมีค่าความขรุขระผิวที่น้อยที่สุดจากกระบวนการกัดของ WPCs โดยมีปัจจัยในการทดลอง คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert (Version 8) ได้สภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

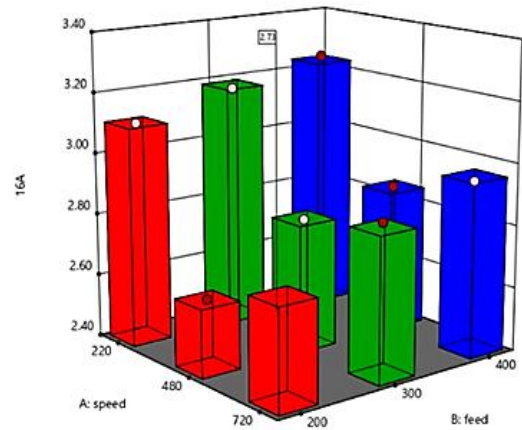
แสดงดังตารางที่ 6 โดยสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างของ WPCs โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. และ 16 มม. คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 2.580 และ 2.730 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 87.86% และ 85.42% ตามลำดับ นอกจากนี้ สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านหน้าของ WPCs โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. และ 16 มม. คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม. ได้ค่าพยากรณ์ความขรุขระผิว เท่ากับ 3.280 และ 4.860 ไมโครเมตร และค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 95.14 และ 95.83% ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ผลการตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดข้าง

END MILL	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Prediction (Ra)	Desirability (%)
Side Milling End Mill 12	720	200	3	2.580	87.86
Side Milling End Mill 16	720	200	3	2.730	85.42
Face Milling End Mill 12	720	200	3	3.280	95.14
Face Milling End Mill 16	720	200	3	4.860	95.83

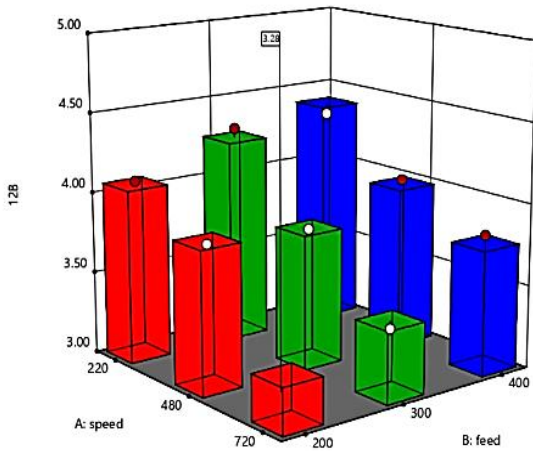


(ก)

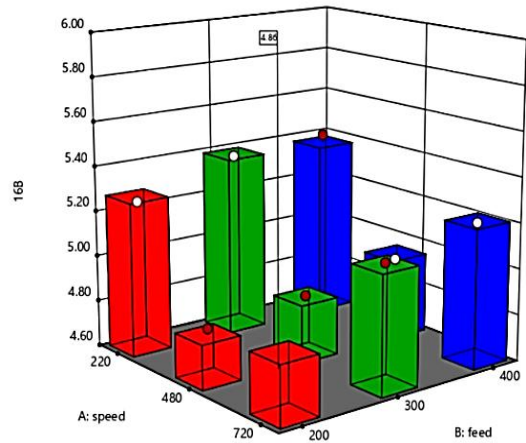


(ข)

รูปที่ 7 สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างของ WPCs: (ก) ใช้ดอก End mill ขนาด 12 มม. และ (ข) ใช้ดอก End mill ขนาด 16 มม.



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านหน้าของ WPCs: (ก) ใช้ดอก End mill ขนาด 12 มม. และ (ข) ใช้ดอก End mill ขนาด 16 มม.

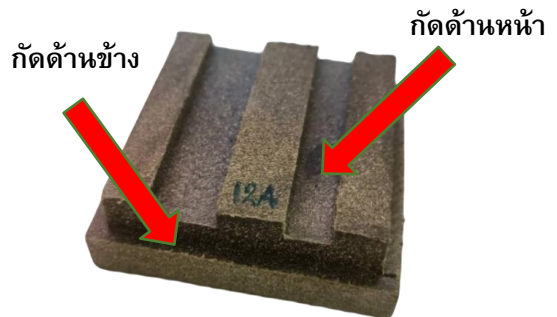




### 3.7 การตรวจสอบพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและกัดด้านหน้า

การตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ในการกัดของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่เหมาะสมที่สุดต่อค่าความขรุขระผิวว่าตรงตามการวิเคราะห์ทางสถิติหรือไม่ โดยสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs ของทุกสภาวะการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะกินลึก 3 มม.

แสดงดังรูปที่ 9 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยการเปรียบเทียบค่าจากการทำนายและค่าจริงจากการทดลอง โดยทำการขึ้นรูปทำการกัด และทำการทดลองค่าความขรุขระผิวทั้งหมด 5 ซ้ำ พบว่า ค่าจากการทำนายมีค่าแตกต่างกันสูงสุดจากค่าที่ได้จากการทดลองจริงควรไม่เกิน 5% ซึ่งหมายความว่า การทำนายค่าความขรุขระผิวมีความน่าเชื่อถือในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิว แสดงดังตารางดังตารางที่ 7



รูปที่ 9 การตรวจสอบพารามิเตอร์ในการกัดด้านข้างและกัดด้านหน้าของ WPCs

ตารางที่ 7 ผลการตรวจสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อค่าความขรุขระผิวในการกัดข้าง

END MILL	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Prediction (Ra)	Observed (Ra)	Percentage Error (%)
Side Milling End Mill 12	720	200	3	2.580	2.622	1.63
Side Milling End Mill 16	720	200	3	2.730	2.864	4.91
Face Milling End Mill 12	720	200	3	3.280	3.184	2.93
Face Milling End Mill 16	720	200	3	4.860	4.681	3.68



#### 4. สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัยการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก และการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าต่อค่าความขรุขระผิวของ WPCs โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ ไอ-ออปติมอล (I-Optimal Experimental Design) จากนั้น ทำการวิเคราะห์ปัจจัยการทดลองและสมการถดถอยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และทำการทำนายสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ผลการทดลอง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกัดด้านข้างและด้านหน้าของ WPCs ทุกสภาวะการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 720 รอบ/นาที อัตราป้อน 200 มม./นาที และระยะป้อนลึก 3 มม. สำหรับการกัดด้านข้าง โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. และ 16 มม. ได้ค่าการทำนายค่าความขรุขระผิว เท่ากับ 2.580 และ 2.730 ไมโครเมตร ตามลำดับ และสำหรับการกัดด้านหน้า โดยใช้ End mill ขนาด 12 มม. และ 16 มม. ได้ค่าการทำนายค่าความขรุขระผิว เท่ากับ 3.280 และ 4.860 ไมโครเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังมีการยืนยันผลการทดลองโดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted) และค่าจริง (Observed) ที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง 2 ค่า น้อยกว่า 5% สรุปได้ว่า กระบวนการออกแบบการทดลอง การขึ้นรูป การทดสอบ และการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของงานวิจัยมีความแม่นยำและเชื่อถือได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 (รหัสขอเสนอการวิจัย: DR256508012004) และขอขอบคุณหลักสูตร วิชาวิศวกรรมการผลิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรี ที่สนับสนุนเครื่องจักรและอุปกรณ์ดำเนินงานวิจัย

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.M. Smith and M.P. Wolcott, Opportunities for wood/natural fiber-plastic composites (WPCs) in residential and industrial applications, *Forest Products Journal*, 2006, 56(3), 4-11.
- [2] 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*, 2021, 23, 1503-1517.
- [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*, 2020, 33(5), 599-613.



- [4] C. Homkhiewa, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, Effects of ground rubber tire and natural rubber contents on mechanical properties of thermoplastic elastomer, *RMUTSV Research Journal*, 2021, 13, 553-567 (In Thai).
- [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*, 2014, 56, 350-357.
- [6] D. Akesson, T. Fuchs, M. Stoss, A. Root, E. Stanvall and M. Skrifvars, Recycling of wood fiber-reinforced HDPE by multiple reprocessing, *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(35), 43877.
- [7] C. Homkhiew and T. Ratanawilai, Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design, *KKU Research Journal*, 2014, 19, 780-793. (in Thai)
- [8] M.Y. Wang and H.Y. Chang, Experimental study of surface roughness in slot end milling AL2014-T6, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2004, 44(1), 51-57.
- [9] Z.H. Xu and Z.N. Kong, Mechanical and thermal properties of short-coir-fiberreinforced natural rubber/polyethylene composites, *Mechanics. Composite Materials*, 2014, 50(3), 353-358.
- [10] 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*, 2022, 35(3), 391-415.
- [11] 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*, 2016, 37(9), 2657-2672.
- [12] C. Homkhiewa, S. Rawangwong and W. Boonchouytan, Effects of ground rubber tire and natural rubber contents on mechanical properties of thermoplastic elastomer, *RMUTSV Research Journal*, 2021, 10, 553-567. (In Thai)



- [13] A. Zolfaghari, A.H. Behravesht and P. Shahi, Comparison of mechanical properties of wood–plastic composites reinforced with continuous and noncontinuous glass fibers, *Journal of Thermoplastic Composites Material*, 2015, 28(6), 791-805.
- [14] H. Essabir, R. Boujmal, M.O. Bensalah, D. Rodrigue, R. Bouhfid, and A.E.K. Qaiss, Mechanical and thermal properties of hybrid composites: oil-palm fiber/clay reinforced high density polyethylene, *Mechanics of Materials*, 2016, 98, 36-43.
- [15] 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, *RMUTSV Research Journal*, 2022, 14(11), 31-46. (In Thai).
- [16] T. Ratanawilaila, P. Pitsuwan, S. Jirasampata and C. Homkhiew, Influence of milling factors on surface finish of wood-plastic composites, *Ladkrabang Engineering Journal*, 2015, 32(2), 43–48.
- [17] 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, *Ladkrabang Engineering Journal*, 2022, 39(1), 23-34.
- [18] T. Ratanawilailai, 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*, 2014, 27(6), 719-730.
- [19] A. Ashori and S. Sheshmani, Hybrid composites made from recycled materials: Moisture absorption and thickness swelling behavior, *Bioresource Technology*, 2010, 101(2), 4717-4720.
- [20] C. Srivabut, T. Ratanawilailai, 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*, 2018, 162, 450-458.
- [21] 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*, 2011, 25(10), 3977-3988.