



KKU Res.j. 2014; 19(2) : 261-221

<http://resjournal.kku.ac.th>

การทำนายความหยาบผิวในงานกัดอะลูมิเนียมผสม เกรด 6061-T6 โดยใช้ตัวแบบสมการถดถอย

Surface Roughness Prediction of 6061-T6 Aluminum Alloy in Milling Using Regression Model

สมเลียง จันทาสี^{1*} และศิริชัย ปันสมสกุล²Somsiang Chantasee^{1*} and Sirichai Punsomsakul²^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอมือ จังหวัดชลบุรี 20131^{*}Correspondent author: somsiang@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่กัดปาดหน้าด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบแนวตั้ง โดยนำหลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 แบบเพิ่มจุดกึ่งกลางเป็นแบบการทดลอง โดยมีปัจจัยศึกษาคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความหยาบผิวคือ อัตราป้อน และปัจจัยร่วมคือ ระยะป้อนลึกมีปฏิริยสัมพันธ์กับอัตราป้อน โดยมีผลต่อความหยาบผิวชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ผลที่ได้จากการทดลองสามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวดำที่สุดคือ ความเร็วรอบ 1,250 รอบต่อนาที อัตราป้อน 150 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะป้อนลึก 1.25 มิลลิเมตร และเมื่อทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความหยาบผิวที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันสมการ กับค่าที่ได้จากการแทนค่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้น พบว่าค่าทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าสมการถดถอยที่ได้จากผลการทดลองสามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าความหยาบผิวของชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 ได้

Abstract

This research aims to study the factors affecting the surface roughness of 6061-T1 aluminum and determine the regression model for predicting the surface roughness in precision milling process by CNC machining center machine. The 2^3 factorial design of experiments were conducted with center points. Three factors, namely spindle speed, feed rate and depth of cut were studied in the experimental design. The experimental results indicated that the significant factors were main effect of feed rate and interaction effect of depth of cut and feed rate. The regression model was established and used to determine the minimum surface roughness with depth of cut of 1.25 millimeter, spindle speed of 1250 revolution per minute and feed rate of 150 millimeter per minute. After verification experiments, the significance and validity of the models were confirmed. Therefore, it could be concluded that established regression model was the reliable tool to predict the surface roughness of 6061-T1 aluminum in precision milling process by CNC machining center machine.

คำสำคัญ: ความเร็วรอบ, อัตราการป้อน, ระยะป้อนลึก, ความหยาบผิว

Keywords: Spindle speed, Feed rate, Depth of cut, Surface roughness

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งเสริมการลงทุนภาคอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น อุตสาหกรรมงานขึ้นรูปความเที่ยงตรงสูง เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการขยายตัว และเป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนให้อุตสาหกรรมอื่นๆ นำชิ้นส่วนความเที่ยงตรงสูงไปประกอบการผลิตในขั้นต่อไป เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ ฯลฯ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตด้วยเครื่องจักรสมัยใหม่ต้องอาศัยความถูกต้องและความเที่ยงตรงสูงเป็นองค์ประกอบสำคัญ เครื่องจักรที่ใช้ในการตัดเฉือน เช่น เครื่องกลึง เครื่องกัด ฯลฯ ซึ่งความเที่ยงตรงจะวัดกันที่ความสำเร็จของชิ้นงานว่าอยู่ในช่วงพิสัยความเผื่อ (Tolerance) และความหยาบของผิวงาน (Surface roughness) ตามที่กำหนด ความหยาบของผิวงานอาจจะให้คำจำกัดความว่าเป็นความไม่สม่ำเสมอ หรือความไม่เรียบ ซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ของกรรมวิธีการผลิต โดยการตัดเฉือนซึ่งกระทำบนเครื่องจักร ความหยาบของผิวงานจะถูกกำหนด (R_a หรือ R_z) ในแบบงาน(1) ส่วนวัสดุทำแม่พิมพ์พลาสติกที่นิยมชนิดหนึ่งคือ อะลูมิเนียมผสม เพราะอะลูมิเนียมมีน้ำหนักเบา แข็งแรง และขึ้นรูปง่าย เช่น อะลูมิเนียมผสมเกรด 6061-T6 เนื่องจากเป็นเกรดอะลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นส่วนผสมสำคัญ สมบัติมีความแข็งแรงสูง ด้านทนต่อการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม(2) ฉะนั้นค่าความหยาบผิวในงานกัดแม่พิมพ์งานพลาสติกมีความสำคัญมากต่อความมั่นใจในการขึ้นรูปของแม่พิมพ์ ซึ่งต้องทราบปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความหยาบผิวก่อน จะได้ทำนายค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์ ทำให้การปฏิบัติงานได้สะดวกและง่ายขึ้น

การใช้เครื่องจักรกลที่ควบคุมด้วยระบบเอ็นซีและซีเอ็นซีก็เป็นวิธีการผลิตต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก ให้สัมพันธ์กับเครื่องจักร จึงจะสามารถควบคุมเครื่องจักรกลให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังรวมไปถึงคุณภาพผิวของชิ้นงานสำเร็จ(3) สำหรับผลกระทบต่อความหยาบผิวงานอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 จากงานวิจัยของ Kadirgama และคณะ(4) พบว่าการปาดผิวอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061-T6 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิว

งานอย่างมีนัยสำคัญคือ อัตราป้อน งานวิจัยของ K.Kadirgama และคณะ(5) พบว่าการปาดผิวอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061-T6 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวงานอย่างมีนัยสำคัญคือ อัตราป้อน การวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นที่ผิวผลตอบ (Response surface method) และ Radian basis function network งานวิจัยของ Halil Demir, Süleyman Gündüz(6) พบว่าการปาดผิวอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061-T6 ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญคือ ความเร็วตัด งานวิจัยของ Mathew A. Kuttolamadom และคณะ(7) พบว่าที่ความเร็วรอบต่ำ อัตราป้อนต่ำสุดสูง มีแนวโน้มความหยาบผิวจะหยาบมากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มความเร็วยรอบสูงแนวโน้มความหยาบผิวคงที่และงานวิจัยของ W.Y.H. Liew(8) พบว่าการปาดผิวอะลูมิเนียมใช้แรงตัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงเสียดทานในการตัด จากงานวิจัยต่างๆ ดังกล่าวจะเห็นได้มีการศึกษาปัจจัยที่ผลต่อคุณภาพความหยาบผิวงานจากการปาดผิวที่เรียกว่าการกัด (Milling) มีจำนวนการศึกษาวิจัยกันไม่ไม่ครอบคลุมปัจจัยต่างๆ ที่เพียงพอ เช่น ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึกมีความสัมพันธ์กันอย่างไรและสัมพันธ์กันมากน้อยขนาดไหน

ดังนั้นคณะผู้วิจัยมีความสนใจทำการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมและตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายค่าความหยาบผิวของแม่พิมพ์โลหะอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^3 แบบมีจุดกึ่งกลางในแต่ละระดับของปัจจัย เพื่อเพิ่มความแม่นยำและเป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์ว่ามีลักษณะเป็นเส้นโค้งหรือไม่ และจำนวนการทดลองมีทั้งหมด 36 สถานะการทดลอง โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก

2. วิธีดำเนินการวิจัย

กำหนดวิธีการดำเนินงานและขั้นตอนการวิจัยเชิงทดลอง มุ่งศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวของอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 ในการกัดด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบแนวตั้ง ดังนั้นเพื่อให้การทำวิจัยเป็นไปด้วยความถูกต้อง และบรรลุตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ผู้ทำการวิจัยได้กำหนดขั้นตอนวิธีการดำเนินงานตามลำดับดังนี้

2.1 เครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้

สำหรับเครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

1. เครื่องเลื่อยสายพาน เพื่อใช้ตัดเตรียมวัสดุชิ้นงานให้ได้ความยาวประมาณ 57 มิลลิเมตร

2. เครื่องกัด (Milling machine) เพื่อเตรียมวัสดุงานให้เที่ยงตรง ขนาด (กว้างxยาวxหนา) 55x55x50 มิลลิเมตร

3. เครื่องกัดซีเอ็นซีแบบแนวตั้ง ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวในการกัดชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 เครื่องหมายการค้า CINCINNATI รุ่น ARROW 500 บอร์ดควบคุม: HUST CNC H4CL-M SYSTEM

4. เครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงาน เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้หาขนาดความหยาบผิวชิ้นงานในการทดลอง เครื่องหมายการค้า MITUTOYO รุ่น SurfTest SV-500

ค่าความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต (R_a) หมายถึง ค่าความหยาบผิวที่หาได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (L_m) แสดงดังรูปที่ 1 โดยที่ค่าเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (mm)

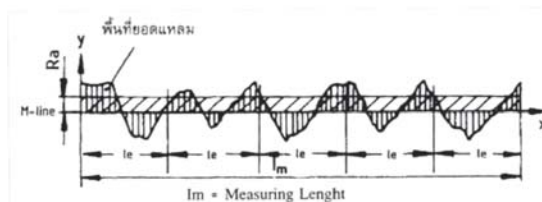
เครื่องวัดความหยาบผิว เป็นเครื่องมือวัดความหยาบผิวที่ทำงานด้วยระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถวัดค่าความหยาบผิวเป็นตัวเลขหรือแสดงเป็นกราฟก็ได้โดยสามารถบอกค่าความหยาบเป็น R_a, R_z, R_{max} ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3

5. ด้ามมีด เครื่องหมายการค้า SUMITOMO รุ่น WGC3025EW(9)

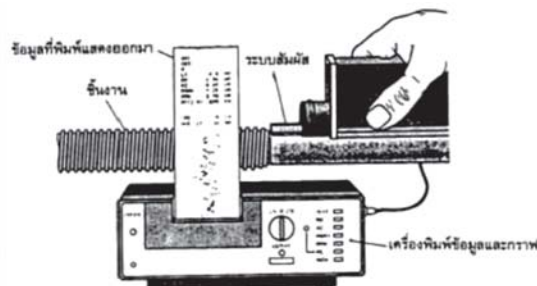
6. เม็ดมีดคาร์ไบด์ เครื่องหมายการค้า SUMITOMO รุ่น SEET0903AGFN-L(9)

7. อะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ขนาด (กว้างxยาวxหนา) 55x55x50 มิลลิเมตร

อะลูมิเนียมเกรด 6061 เป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่มีแมกนีเซียมและซิลิกอนเป็นส่วนผสมสำคัญ สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยวิธีการบ่มแข็ง จำหน่ายในสภาพผ่านกระบวนการบ่มแข็งและทำการดึงเพื่อคลายความเค้นตาม T6 เพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงสุด คุณลักษณะทั่วไปของอะลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 การวัดค่าความหยาบเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต (R_a)



รูปที่ 2 เครื่องวัดความหยาบผิวแบบพิมพ์ข้อมูลและกราฟความหยาบผิว



รูปที่ 3 เครื่องวัดค่าความหยาบผิว รุ่น SurfTest SV-500

2.2 วิธีดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินงานมี 7 ขั้นตอน สามารถเขียนเป็นแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังรูปที่ 4

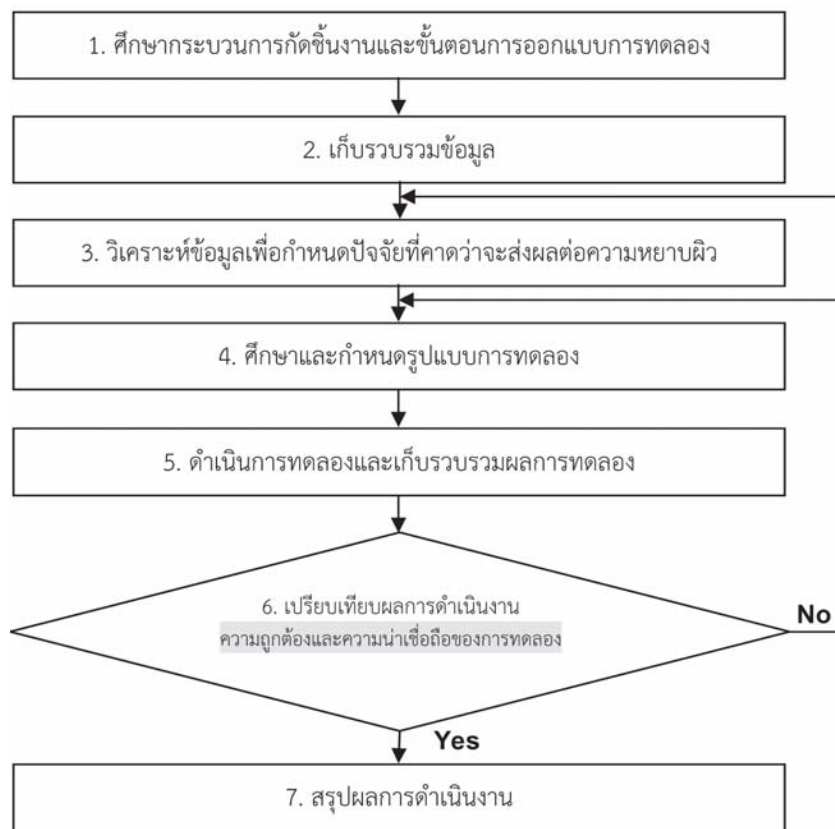
2.3 การกำหนดการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้หลักการออกแบบการทดลองซึ่งมีทั้งหมด 7 ขั้นตอน โดยสรุปดังนี้

1. การทำวิจัยในครั้งนี้เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ในการกัดด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบแนวตั้ง แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความหยาบผิวของอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมเกรด 6061

ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)	Mg	Si	Cu	Cr	Al
	0.8 - 1.2	0.4 - 0.8	0.15 - 0.40	0.04 - 0.35	95.8 – 98.6
AA	6061				
ISO	AlMg 1 SiCu				
DIN	3.3211 (AlMg 1 SiCu)				
สภาพจำหน่าย	ผ่านการบ่มแข็ง และคลายความเค้น (T651) ความแข็งอย่างน้อย 90 HB				
อุณหภูมิหลอมเหลว	652 °C				
อุณหภูมิแข็งตัว	582 °C				
สัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ 20 องศาเซลเซียส	23.6 $\mu\text{m/m.K}$				
ความร้อนจำเพาะ	896 J/kg.K				
ความหนาแน่น	2.70 g/cm ³				
Temper	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Shear strength (MPa)	
O	124	55	25	83	
T4, T451	241	145	22	165	
T6, T651	310	276	12	207	



รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

2. เลือกผลตอบสนองสำหรับใช้ในการออกแบบแผนการทดลองของงานวิจัย โดยผลตอบสนองที่ทำการศึกษาคือ ความหยาบผิวของอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6

3. กำหนดค่าปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อความหยาบผิวของอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 ในการกัดด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีมีด้วยกัน 3 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก

4. ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^3 แฟคทอเรียล (10) ซึ่งปัจจัยแต่ละระดับมีการเพิ่มจุดกึ่งกลางเพื่อตรวจสอบความโค้งของการทดลอง

5. กำหนดลำดับการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 เป็นแบบสุ่มเพื่อเฉลี่ยผลของตัวแปรบกพร่องที่ควบคุมไม่ได้ และทำการทดลองตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้

6. วิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วยการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของการทดลองตามหลักการ $E_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง และนำผลมาวิเคราะห์ด้วยแบบสมการเส้นถดถอย (Regression) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายความหยาบผิวของอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ โดยนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในข้อ 6 มาสรุปผลและข้อเสนอแนะ

2.4 การกำหนดปัจจัยและผลตอบสนอง

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อกำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อความหยาบผิวของอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ในกระบวนการกัดปาดผิวหน้าด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลอง พบว่าการที่จะได้คุณภาพผิวชิ้นงานสำเร็จ คุณภาพสูงจำเป็นต้องเลือกใช้ค่าความเร็วรอบสูง ความลึกในการตัดเฉือนน้อย และอัตราป้อนต่ำ

ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงกำหนดปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยแบ่งออกเป็นสองระดับ คือ ค่าระดับที่ต่ำและสูง โดยการทดลองมีการเพิ่มจุดกลางที่แต่ละระดับของปัจจัย เพื่อเพิ่มความแม่นยำและเป็นการตรวจสอบความสัมพันธ์ว่ามีลักษณะเป็นเส้นโค้งหรือไม่ โดยที่ลำดับขั้นการทดลองเป็นการสุ่ม (Randomization) เพื่อเฉลี่ยผลของตัวแปรบกพร่องที่ควบคุมไม่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยและตัวแปรตอบสนองในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	
	Low (-)	High (+)
ระยะป้อนลึก	0.25	1.25
ความเร็วรอบ	1000	1500
อัตราป้อน	150	300
ตัวแปรตอบสนอง	ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน	

การคำนวณหาขนาดของสิ่งตัวอย่าง (Sample size) ด้วยโปรแกรม Minitab 16 เพื่อกำหนดจำนวนการทดลองซ้ำ (Replicate) กำหนดความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และ Power of test ที่ร้อยละ 95 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0971 ไมโครเมตร ซึ่งประมาณขึ้นจากข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความหยาบผิวของอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 แสดงผลการคำนวณหาขนาดสิ่งตัวอย่างได้ดังรูปที่ 5

Power and Sample Size					
2-Level Factorial Design					
Alpha = 0.05 Assumed standard deviation = 0.0971					
Factors: 3 Base Design: 3, 8					
Blocks: none					
Including a term for center points in model.					
Center Points	Effect	Reps	Total Runs	Target Power	Actual Power
4	0.15	4	36	0.95	0.987754

รูปที่ 5 ผลการคำนวณหาขนาดสิ่งตัวอย่างด้วยโปรแกรม Minitab 16

จากรูปที่ 5 ผลการคำนวณหาจำนวนการทดลองซ้ำด้วยโปรแกรม Minitab 16 ได้เท่ากับ 4 ครั้งในแต่ละสภาวะการทดลอง รวมจำนวนการทดลองทั้งหมด 36 สภาวะการทดลอง และมีค่าอำนาจการทดสอบอยู่ที่ 0.987754 ซึ่งมากกว่าค่า 0.95 จากสมการ $(1-\beta) = \text{Power of test}$ แสดงว่าค่าอำนาจการทดสอบมีประสิทธิภาพเพียงพอในการตรวจจับข้อมูล

สำหรับปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลองประกอบด้วยผู้ทำการทดลอง, ชนิดวัสดุในการทดลองคือ อะลูมิเนียมผสม เกรด 6061-T6, ชนิดและรูปร่างของเครื่องมือตัดคือ เม็ดมิลคาร์ไบด์ SUMITOMO รุ่น SEET0903AGFN-L, เครื่องซีเอ็นซีแบบแนวตั้ง CINCINNATI รุ่น ARROW 500, หมวกการกัดคือ หมวกการกัดปาดหน้า (Face mill), ชนิดสารหล่อเย็น คือ Soluble oils, เครื่องวัดความหยาบผิวคือ MITUTOYO รุ่น SurfTest SV-500

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของความหยابผิวชิ้นงานที่วัดได้จากการทดลองและค่าทำนายจากสมการถดถอย

ลำดับ มาตรฐาน	ลำดับ การทดลอง	A (มิลลิเมตร)	B (รอบ/นาที)	C (มิลลิเมตร/นาที)	ค่าความหยابผิวเฉลี่ย วัดได้จากการทดลอง (ไมโครเมตร)	ค่าความหยابผิว ที่ได้จากค่าทำนาย (ไมโครเมตร)	ค่าความผิดพลาดของ ค่าจากการทดลอง กับค่าทำนาย (%)
11	1	0.25	1,500	150	0.126	0.118	5.95
31	2	0.25	1,500	300	0.146	0.112	23.12
33	3	0.75	1,250	225	0.122	0.115	5.64
18	4	1.25	1,000	150	0.111	0.096	13.74
27	5	0.25	1,500	150	0.115	0.118	-3.04
6	6	1.25	1,000	300	0.141	0.119	15.79
23	7	0.25	1,500	300	0.135	0.112	16.86
20	8	1.25	1,500	150	0.102	0.093	9.08
1	9	0.25	1,000	150	0.121	0.114	5.37
21	10	0.25	1,000	300	0.153	0.116	24.19
12	11	1.25	1,500	150	0.076	0.093	-22.03
7	12	0.25	1,500	300	0.087	0.112	-29.02
35	13	0.75	1,250	225	0.081	0.115	-42.12
22	14	1.25	1,000	300	0.094	0.119	-26.32
25	15	0.25	1,000	150	0.117	0.114	2.14
3	16	0.25	1,500	150	0.105	0.118	-12.85
17	17	0.25	1,000	150	0.110	0.114	-4.09
9	18	0.25	1,000	150	0.110	0.114	-4.09
24	19	1.25	1,500	300	0.160	0.152	4.70
8	20	1.25	1,500	300	0.161	0.152	5.29
32	21	1.25	1,500	300	0.158	0.152	3.49
19	22	0.25	1,500	150	0.128	0.118	7.42
4	23	1.25	1,500	150	0.118	0.093	21.41
2	24	1.25	1,000	150	0.110	0.096	12.96
36	25	0.75	1,250	225	0.113	0.115	-1.87
30	26	1.25	1,000	300	0.149	0.119	20.31
16	27	1.25	1,500	300	0.131	0.152	-16.40
13	28	0.25	1,000	300	0.122	0.116	4.92
26	29	1.25	1,000	150	0.085	0.096	-12.64
29	30	0.25	1,000	300	0.096	0.116	-20.83
34	31	0.75	1,250	225	0.080	0.115	-43.90
28	32	1.25	1,500	150	0.075	0.093	-23.65
10	33	1.25	1,000	150	0.077	0.096	-24.34
15	34	0.25	1,500	300	0.081	0.112	-38.57
5	35	0.25	1,000	300	0.093	0.116	-24.73
14	36	1.25	1,000	300	0.091	0.119	-30.48

3. ผลการวิจัย

เมื่อทำการทดลองตามแผนการดำเนินงานแบบสุ่มครบถ้วนแล้ว ผลการทดลองดังตารางที่ 3 นำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ผลและสรุปผล ซึ่งใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการสถิติเชิงวิศวกรรม เพื่อให้ได้ผลการทดลองและข้อสรุปจากการทดลองโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน การวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

3.1 ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยอาศัยโปรแกรม Minitab 16 ในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยมีสมมติฐานว่ารูปแบบของค่าเฉลี่ยที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการ $E_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ ค่าเฉลี่ยมีการแจกแจงแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกันและความแปรปรวนมีค่าคงตัว (Stability) จึงทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ การตรวจสอบ E_{ij} ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- 1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals)
- 2) ตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง
- 3) การตรวจสอบความเสถียรของ (Variance stability) สำหรับรายละเอียดการตรวจสอบทั้ง 3 ขั้นตอนมีดังนี้

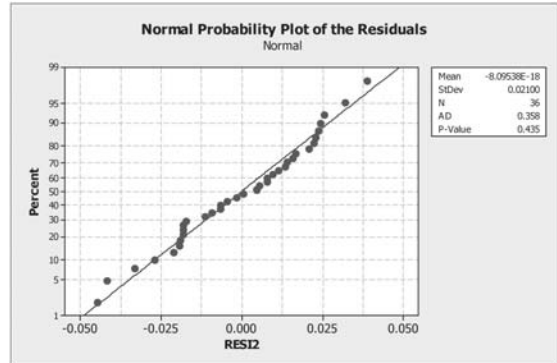
1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าเฉลี่ยเหลือ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถประเมินผลการทดลองโดยการลดรูป (Reduce model) และสร้างแผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal probability plot) ของค่าเฉลี่ยเหลือ พบว่าการกระจายตัวของค่าเฉลี่ยเหลือมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ดังรูปที่ 6 จึงทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันการกระจายตัวแบบปกติของค่าเฉลี่ยเหลือ โดยการตั้งสมมติฐานดังนี้

H_0 : ค่าเฉลี่ยเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ

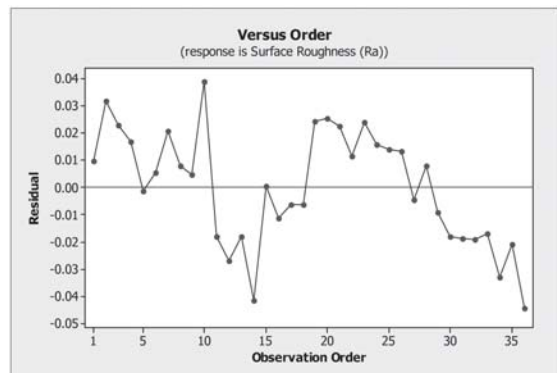
H_1 : ค่าเฉลี่ยเหลือไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

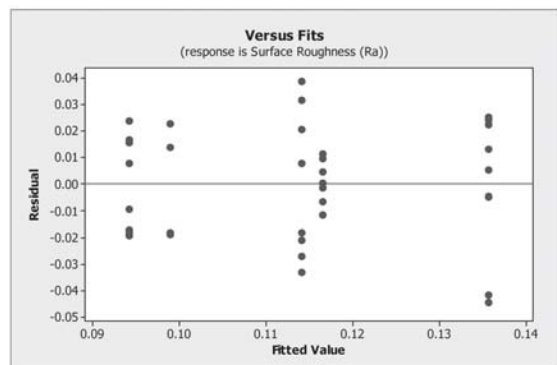
จากรูปที่ 6 กราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าเฉลี่ยเหลือพบว่า P-Value = 0.435 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จึงสามารถสรุปผลจากสมมติฐานได้ว่าการกระจายตัวของค่าเฉลี่ยเหลือมีการกระจายตัวแบบปกติ (Accepted H_0)



รูปที่ 6 การแจกแจงแบบปกติของค่าเฉลี่ยเหลือของค่าความหยาบผิว



รูปที่ 7 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยเหลือเทียบกับ Observation order



รูปที่ 8 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยเหลือเทียบกับ Fitted value ของค่าความหยาบผิว

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าเฉลี่ยเหลือจากรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลบนแผนภูมิพบว่า การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยเหลือมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเหลือมีความเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

Factorial Fit: Surface Roughness versus Depth of Cut, Spindle Speed, Feed Rate						
Estimated Effects and Coefficients for Surface Roughness (Ra) (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0.11513	0.003891	29.59	0.000	
Depth of Cut	-0.00038	-0.00019	0.003891	-0.05	0.962	
Spindle Speed	0.00775	0.00388	0.003891	1.00	0.328	
Feed Rate	0.01950	0.00975	0.003891	2.51	0.019	
Depth of Cut*Spindle Speed	0.00762	0.00381	0.003891	0.98	0.336	
Depth of Cut*Feed Rate	0.02187	0.01094	0.003891	2.81	0.009	
Spindle Speed*Feed Rate	0.00725	0.00362	0.003891	0.93	0.360	
Depth of Cut*Spindle Speed*Feed Rate	0.01112	0.00556	0.003891	1.43	0.164	
Ct Pt		-0.01613	0.011673	-1.38	0.178	

S = 0.0220101 PRESS = 0.0233573
R-Sq = 43.70% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 27.02%

Analysis of Variance for Surface Roughness (Ra) (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.0035236	0.0035236	0.0011745	2.42	0.087
2-Way Interactions	3	0.0047137	0.0047137	0.0015712	3.24	0.037
3-Way Interactions	1	0.0009901	0.0009901	0.0009901	2.04	0.164
Curvature	1	0.0009245	0.0009245	0.0009245	1.91	0.178
Residual Error	27	0.0130800	0.0130800	0.0004844		
Pure Error	27	0.0130800	0.0130800	0.0004844		
Total	35	0.0232320				

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (σ^2 : Variance stability) จากรูปที่ 8 พบว่าความแปรปรวนของค่าเศษเหลือมีความเสถียรอยู่ในระดับที่น่าพอใจ เนื่องจากค่าความหยาบผิวในแต่ละระดับของพารามิเตอร์มีการกระจายในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกันและรูปร่างการกระจายของข้อมูลไม่เป็นรูปแบบกรวยปลายเปิดหรือรูปลำโพงแต่อย่างใด แสดงว่าข้อมูลที่ได้มีความแปรปรวนคงที่

ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดตั้งแต่รูปที่ 6-8 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ เป็นไปตามหลักการ $E_y \sim NID(0, \sigma^2)$ ทุกประการ

3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือจึงนำข้อมูลผลการวัดค่าความหยาบผิวมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ ร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 16

ดังตารางที่ 4

การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า อัตราป้อนเป็นปัจจัยหลัก และระยะป้อนลึกกับอัตราป้อนเป็นปัจจัยร่วม ในช่วงที่ทำการทดลองมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวของอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหยาบผิวกับอัตราป้อน และระยะป้อนลึกกับอัตราป้อน โดยใช้ข้อมูลจากการผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย นำมาวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5

การวิเคราะห์การถดถอย สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ในรูปของสมการเชิงเส้นของค่าความหยาบผิวกับอัตราป้อน และระยะป้อนลึกมีปฏิริยาสัมพันธ์กับอัตราป้อน โดยสามารถแสดงสมการถดถอยแบบ Coded variable ได้ดังนี้

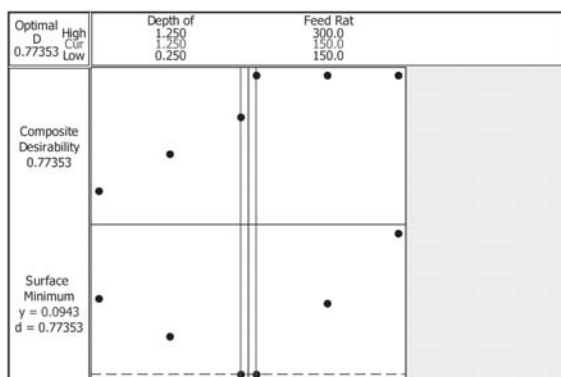
$$R_a = 0.11333 + 0.00975(\text{อัตราป้อน}) + 0.01094(\text{ระยะป้อนลึก})(\text{อัตราป้อน})$$

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอย

General Regression Analysis: ค่าความหยาบผิว versus C, A				
Regression Equation				
Surface roughness = 0.113333 + 0.00975 C + 0.0109375 A*C				
Coefficients				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.113333	0.0037111	30.5386	0.000
C	0.009750	0.0039363	2.4770	0.019
A*C	0.010937	0.0039363	2.7786	0.009
Summary of Model				
S = 0.0222669		R-Sq = 29.57%		R-Sq(adj) = 25.30%
PRESS = 0.0194348		R-Sq(pred) = 16.34%		

ตารางที่ 6 การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของการกัดปาดหน้าชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Surface Rough	Minimum	0.075	0.075	0.16	1	1
Global Solution						
Depth of Cut	=	1.25				
Feed Rate	=	150				
Predicted Responses						
Surface Rough	=	0.09425	,	desirability =	0.773529	
Composite Desirability = 0.773529						



รูปที่ 9 ระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อความหยาบผิวชิ้นงาน

3.3 การหาค่าสถานะที่เหมาะสม

การวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมในการกัดปาดหน้าชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 จะใช้ Response optimizer ในการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์โดยจะเลือกค่า

ระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว (R_a) มีค่าน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว แสดงดังตารางที่ 6 และรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6 และรูปที่ 9 พบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดของกระบวนการกัดปาดหน้าชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 ซึ่งคำนวณได้จาก Response optimizer ในโปรแกรม Minitab 16 คือที่ระยะป้อนลึก 1.25 มิลลิเมตร และอัตราป้อน 150 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนความเร็วรอบจะพิจารณาเลือกใช้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งพบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมที่จะทำให้ค่าความหยาบผิวมีค่าน้อยที่สุดคือ ความเร็วรอบ 1250 รอบต่อนาที ซึ่งระดับปัจจัยที่ดีที่สุดนี้จะนำไปใช้ในการทดลองเพื่อยืนยันสมการถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในตอนต้น ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลองเพื่อยืนยันสมการถดถอย

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	ระดับปัจจัยที่เหมาะสม	หน่วย
ระยะป้อนลึก	1.25	มิลลิเมตร
ความเร็วรอบ	1250	รอบต่อนาที
อัตราป้อน	150	มิลลิเมตรต่อนาที

3.4 ยืนยันผลการทดลอง

การทดสอบยืนยันผลการทดลอง เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลสรุปของค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 3 ปัจจัยในตารางที่ 6 ตามระดับปัจจัยที่กำหนดไว้ คือ ระยะป้อนลึก 1.25 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 1250 รอบต่อนาที และอัตราป้อน 150 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเมื่อทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันสมการถดถอยที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น สรุปได้ว่าสามารถนำสมการถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมาใช้ในการทำนายความหยาบผิวของกระบวนการกัดปาดหน้าชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 ได้จริง

4. สรุปผลการดำเนินงาน

การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 ในการกัดด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีแบบแนวตั้ง โดยวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวเพื่อใช้ในการสร้างสมการถดถอยเพื่อทำนายค่าความหยาบผิวของอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 ได้ผลสรุปดังนี้

4.1 สรุปผลการดำเนินงาน

1. ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลหลัก พบว่าอิทธิพลหลักคือ อัตราป้อน มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.019 ซึ่งน้อยกว่าที่ระดับ 0.05

2. ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วม พบว่าปัจจัยที่เป็นอิทธิพลร่วม คือระยะป้อนลึกมีปฏิริยาสัมพันธ์กับอัตราป้อน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.009 ซึ่งน้อยกว่าที่ระดับ 0.05

3. ผลการวิเคราะห์สมการถดถอย พบว่าเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลอง สามารถสร้าง

เป็นสมการความสัมพันธ์ของความหยาบผิวกับตัวแปรอิสระ มีปัจจัยที่นำมาพยากรณ์ได้คือ อัตราป้อน และระยะป้อนลึกมีปฏิริยาสัมพันธ์กับอัตราป้อน เนื่องจากมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแบบ Actual variable ได้คือ

$$\text{ค่าความหยาบผิว } (R_a) = 0.073812 + 0.062750(A) + 4.92500 \times 10^{-5}(B) + 0.000225833(C) - 1.03000 \times 10^{-4}(A)(B) - 4.50000 \times 10^{-4}(A)(C) - 2.51667 \times 10^{-7}(B)(C) + 5.93333 \times 10^{-7}(A)(B)(C)$$

เมื่อ ค่าความหยาบผิว (R_a) (ไมโครเมตร)

A คือ ระยะป้อนลึก (มิลลิเมตร)

B คือ ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)

C คือ อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อนาที)

4. ระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความหยาบผิวสามารถหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการกัดปาดหน้าชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 คือ ระยะป้อนลึก 1.25 มิลลิเมตร และอัตราป้อน 150 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นค่า Response optimization ในโปรแกรม Minitab 16 ได้ทำการเลือกระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการกัดปาดหน้าชิ้นงาน แล้วส่งผลให้หาค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดและเลือกอัตราป้อนจากกราฟความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองและระดับของปัจจัยต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งความเร็วรอบเหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดคือที่ความเร็วรอบ 1250 รอบต่อนาที

5. การทดลองเพื่อยืนยันผลเป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลสรุปของค่าปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 3 ปัจจัย คือ ระยะป้อนลึก 1.25 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 1250 รอบต่อนาที และอัตราป้อน 150 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันสมการถดถอยพบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 และมีค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัดปาดหน้าชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 เท่ากับ 0.096 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยการแทนค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมลงในสมการถดถอย เท่ากับ 0.094 ไมโครเมตร เมื่อทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันสมการถดถอยพบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิว

ของกระบวนการการกัดปาดหน้าอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ที่ได้จากการทดลองยืนยันผล ไม่มีความแตกต่างกันของค่าความหยาบผิวที่ได้จากการแทนค่าของระดับปัจจัยที่เหมาะสม ในสมการความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 แสดงว่าสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นสามารถนำมาใช้ในการทำนายความหยาบผิวของกระบวนการการกัดปาดหน้าชิ้นงานอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 ได้จริง และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของการทำนายค่าความหยาบผิวที่ได้จากสมการถดถอยเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยมีค่าเท่ากับ 4.96 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 3

4.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยในครั้งนี้ พบว่าอัตราป้อนเป็นปัจจัยหลัก ระยะป้อนลึกมีปฏิริยาสัมพันธ์กับอัตราป้อนเป็นปัจจัยร่วมมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวในการกัดอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ดังนั้นจึงได้เสนอแนะไว้ดังนี้

1. เนื่องจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ต่ำ แสดงว่ายังมีเงื่อนไขที่ไม่ได้ควบคุมอยู่มาก แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยที่ต้องการตรวจสอบมีผลกระทบจริงหรือไม่ หรือการออกแบบการทดลองเหมาะสมดีแล้วหรือไม่ ดังนั้นแนวทางการแก้ไขปัญหาคือ อาจทำการออกแบบการทดลองเพิ่ม โดยการเพิ่มจำนวนการทดลองซ้ำ

2. เนื่องจากรูปแบบสมการถดถอยที่ได้ถึงแม้จะมีความเหมาะสมกับข้อมูลซึ่งพิจารณาจากค่า Lack of fit ที่มีค่า P-Value มากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แต่เมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($R-Sq$ และ $R-Sq(adj)$) ที่เป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณขึ้นเหมาะสมกับข้อมูลนั้นมีค่าต่ำ หมายความว่าสมการถดถอยที่ประมาณขึ้นยังไม่เหมาะสมกับข้อมูลเท่าที่ควร จึงควรออกแบบการทดลองในลักษณะอื่น เพื่อตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และสร้างสมการถดถอยขึ้นมาใหม่ที่มีความแม่นยำขึ้น เช่น Linear, Linear + Square, Linear + Interaction และ Full Quadratic เป็นต้น

3. งานวิจัยนี้ไม่พบว่าความเร็วรอบ ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของอะลูมิเนียม เกรด 6061-T6 จึงอาจ

กำหนดระดับของตัวแปรดังกล่าวให้มีระยะห่างมากกว่าการทดลองในครั้งนี้ ซึ่งอาจพบว่าความเร็วรอบส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ

4. กำหนดลักษณะของเครื่องมือตัด ได้แก่ มุมคาย เศษ มุมหลบ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรต่างๆ เหล่านี้อาจส่งผลต่อความหยาบผิว มาใช้ในการทดสอบหาค่าความหยาบผิว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดสำหรับอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าความหยาบผิว

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เลขที่ วจพ. 4/2556

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Mould and Die Industry Development. Mold operational manual, repair and maintenance dies of Techniques. Chonburi : Thai-German Institute. Thai.
- (2) Thai-German Special Steel Center Co.,Ltd. Aluminium Alloy. [Online]. Resource: www.thyssenkruppmaterials.co.th/dmdocuments/aluminium.pdf [June 2012]. Thai.
- (3) Chalie Tragangoon. CNC Technology. 12th ed. Bangkok : Technology Promotion Association (Thailand-Japan). 2548. Thai.
- (4) Kadirgama, K, Noor, MM, Rahman, MM, Rejab, MRM, Haron, CHC & Abou-El-Hossein, KA. Surface roughness prediction model of 6061-T6 aluminium alloy machining using statistical method. European Journal of Scientific Research, vol. 25, no. 2, pp. 250-256.

- (5) K.Kadirgam, M.M.Noor, N.M.Zuki.N.M, M.M. Rahman, M.R.M. Rejab, R. Daud, K. A. Abou-El-Hossein. Optimization of Surface Roughness in End Milling on Mould Aluminium Alloys (AA6061-T6) Using Response Surface Method and Radian Basis Function Network. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Volume 2, Number 4, December. 2008 ISSN 1995-6665 pp 209- 214.
- (6) Halil Demir, Şleyman Gıncı. The Effects of Aging on Machinability of 6061 Aluminum Alloy. *Materials & Design*, Volume 30 Issue 5 May 2009, Pages 1480–1483.
- (7) Mathew A. Kuttolamadom, Sina Hamzehlouia, M. Laine Mears. Effect of Machining Feed on Surface Roughness in Cutting 6061 Aluminum. *International Center for Automotive Research*. 2010.
- (8) W.Y.H. Liew. The Effect of Air in the Machining of Aluminium Alloy. *Tribology Letters*, Vol. 17, No. 1, July 2004. pp. 41-49.
- (9) Sumitomo Electric Hardmetal Manufacturing (Thailand) Co.,Ltd. Performance Cutting Tools. pp. H14 Endmill inserts. Thai.
- (10) Parames Chutima. *Design of Experiment for Engineering*. Bangkok : Chulalongkorn University Publisher, 2002. Thai.