

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม 6063 ด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ

A Study of Factors Affecting on Energy Consumption in CNC Milling Machine of Aluminum Alloy 6063

เอราวิล ถาวร¹ ทรงพล ผึ้งวงศ์¹ และ ขวัญนิธิ คำเมือง²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา พะเยา E-mail: erawin.th@up.ac.th, songpol.pu@up.ac.th

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก E-mail: kpopk@nu.ac.th

บทคัดย่อ - งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม 6063 ด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการลดใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยมีปัจจัยที่ใช้ศึกษาอยู่สองชนิดคือ ความเร็วรอบ (Spindle Speed) ที่ระดับ 1,500 และ 2,500 รอบต่อนาที และอัตราป้อน (Feed Rate) ที่ระดับ 75 และ 125 มิลลิเมตรต่อนาที จากการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมทางสถิติพบว่า ความเร็วรอบไม่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า แต่อัตราป้อนส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และระดับของอัตราป้อนที่ 125 มิลลิเมตรต่อนาที ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุด หลังจากนั้นผู้วิจัยได้สร้างสมการถดถอยเพื่อใช้สำหรับพยากรณ์การใช้พลังงานไฟฟ้า โดยสมการถดถอยที่ได้คือ $Energy\ Consumption = 0.0336 - 0.165 \times 10^{-3} Feed\ Rate$ และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2_{adj}) เท่ากับ 93.07 %

คำสำคัญ - การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล, การใช้พลังงานไฟฟ้า, เครื่องกัดอัตโนมัติ, อะลูมิเนียม 6063

Abstract - The objective of this research is to study factors that are influential on energy consumption in milling process of aluminum alloy 6063 by CNC milling machine. The result will lead to guidelines for determining factors for reducing the energy consumption of industrial applications. Factorial design was used to examine milling by

CNC machine with two factors including spindle speed at 1,500 and 2,500 rpm and feed rate at 75 and 125 mm/min. After collecting all data, the results indicated that the energy consumption is affected by feed rate at significance level of 0.05 and should be setting 125 mm/min in order to minimum energy consumption. A regression model was used for forecasting energy consumption = $0.0336 - 0.165 \times 10^{-3} Feed\ Rate$ and coefficient of determination are 93.4 %.

Keywords - factorial design, energy consumption, CNC milling machine, aluminum alloy 6063

1. คำนำ

อุตสาหกรรมแปรรูปอะลูมิเนียมด้วยการกัด (Milling) มีความสำคัญอย่างมากต่อภาคการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อะลูมิเนียม 6063 ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นิยมนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนยานยนต์ แม่พิมพ์ และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือ มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี ไม่จับสนิม [1] ซึ่งปัจจุบันอุตสาหกรรมดังกล่าวได้มีการแข่งขันกันอย่างมากไม่ว่าจะเป็นเรื่องคุณภาพและราคา โดยพิจารณาจากความหยาบของผิวชิ้นงาน (Roughness Surface) รวมถึงขนาดที่ถูกต้องและแม่นยำของชิ้นงาน ซึ่งที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นคือการควบคุมคุณภาพของการผลิตให้ได้ประสิทธิภาพ แต่ยังมีอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้ผู้ประกอบการสามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพคือการลดต้นทุน ซึ่งต้นทุนทางด้านพลังงานหรือค่าไฟฟ้าก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึง จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้ไฟฟ้าสำหรับกระบวนการกัดอะลูมิเนียม 6063 ด้วย

เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling Machine) ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการลดใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตหรือภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแนวโน้มการทำวิจัยที่เกี่ยวกับการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมการผลิต โดย Aggarwal และคณะ (2008) [2] ได้วิจัยเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการกลึงเหล็ก AISI P20 ด้วยเครื่อง CNC ที่ส่งผลต่อการใช้ไฟฟ้าและลักษณะทางคุณภาพ ด้วยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง ผลการทดลองพบว่าสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการกลึงที่เหมาะสมโดยที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าและลักษณะทางคุณภาพตรงตามเป้าหมาย Guo และคณะ (2012) [3] ได้วิจัยเพื่อสร้างสมการสำหรับหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการกลึงที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าและความหยาบผิว ผลการวิจัยพบว่าสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์การตัดเฉือนได้อย่างเหมาะสมด้วยการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำสุด Diaz และคณะ (2012) [4] ได้ศึกษาถึงการสร้างสมการการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการกัด โดยได้ทำการทดลองในการปรับเปลี่ยนมีดกลึงชนิดต่างๆ รวมถึงพารามิเตอร์การตัดเฉือน ผลการวิจัยพบว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูงถึง 97.4% Oda และคณะ (2012) [5] ได้ศึกษาการกำหนดเงื่อนไขการตัดเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในกระบวนการกัดด้วยเครื่อง CNC 5 แกน โดยมีจุดประสงค์เพื่อเป็นแนวทางประยุกต์สำหรับลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม

3. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชิ้นงานทดลองสำหรับงานวิจัยนี้คืออะลูมิเนียม 6063 เนื่องจากมีคุณสมบัติสามารถชุบอะโนไดซ์ได้ดีให้ผิวสวยงามเมื่อตัดกลึง สามารถใช้งานที่อุณหภูมิติดลบได้ดี (ส่วนผสมทางเคมีคือ 0.1%Cu 0.88%Mg 0.2%Mn 0.68%Si 0.3%Fe 0.05%Cr 0.1%Zn และ 97.68%Al) และมีขนาด กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 50.8×50.8×9.525 มิลลิเมตร หรือ 2×2×0.375 นิ้ว แสดงดังรูปที่ 1 โดยผู้วิจัยได้ใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ ชนิดแนวตั้ง รุ่น XK7132 แสดงดังรูปที่ 2 และมีดกัดเป็นแบบดอกกัดเอ็นมิลล์ (End Mill) แบบ 2 คมตัด ขนาด 12×12×45×95 มิลลิเมตร ใช้น้ำยาหล่อเย็น Soluble Cutting oil TH-O10AL อัตราส่วนของการผสมน้ำ 1:20 และวัดค่าพลังงานไฟฟ้าด้วย Digital Power Clamp Meters รุ่น UT233



รูปที่ 1 ชิ้นงานทดลองอะลูมิเนียม 6063



รูปที่ 2 เครื่องกัดอัตโนมัติ ชนิดแนวตั้ง รุ่น XK7132

4. การออกแบบการทดลอง

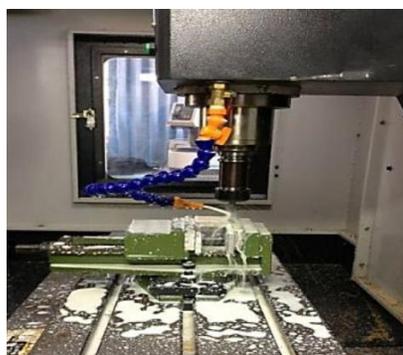
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม 6063 โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกันและใช้ในการศึกษาผลกระทบหลักและร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง [6] ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ของงานวิจัยนี้คือ การใช้พลังงานไฟฟ้า (หน่วย : กิโลวัตต์-ชั่วโมง; KWh) และปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factors) มีอยู่ 2 ปัจจัยคือ ความเร็วรอบ (Spindle Speed) และอัตราป้อน (Feed Rate) เนื่องจากผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกัดพบว่า ปัจจัยทั้งสองดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่สำคัญและส่งผลมากที่สุดสำหรับการกัด ซึ่งแต่ละปัจจัยมีอยู่ 2 ระดับการทดลอง แสดงดังตารางที่ 1 โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดจุดศูนย์กลางการทดลอง (Center Points) เพื่อวิเคราะห์การทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบ (Lack-of Fit Test) สำหรับจำนวนการทดลองซ้ำ (Replicate) ที่ใช้ในงานวิจัยนั้น ผู้วิจัยได้ใช้หลักการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ด้วยโปรแกรมทางสถิติ โดยพิจารณาจากค่ากำลังการทดสอบ (Power of Test; $1-\beta$) ที่มีค่าสูงกว่า 0.95 โดยมีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.000568 KWh ซึ่งจากการประมวลผลด้วยโปรแกรมทางสถิติ พบว่า

จำนวนการทดลองซ้ำเท่ากับ 2 ครั้งเป็นค่าที่เหมาะสม เนื่องจากมีค่ากำลังการทดสอบเท่ากับ 0.95351

ดังนั้นแผนการทดลองของงานวิจัยนี้มีจำนวนการทดลองทั้งสิ้นเท่ากับ 2^2 เท่ากับ 4 ครั้ง และทดลองซ้ำ 2 ครั้ง รวมเป็นการทดลองทั้งสิ้น 14 ครั้ง ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดทิศทางการกัดเป็นแบบสลับทิศทางขึ้นและลงตามหน้าตัดของชิ้นงานทดลอง โดยกำหนดรัศมีการทของมีดกัดเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และกัดด้วยความลึกคงที่ตลอดระยะแนวหน้าตัดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ซึ่งการกัดชิ้นงานทดลองแสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 1 ระดับของปัจจัยการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		หน่วย
	-1	+1	
A: ความเร็วรอบ	1,500	2,500	รอบต่อนาที
B: อัตราป้อน	75	125	มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3 การกัดชิ้นงานทดลอง

5. ผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

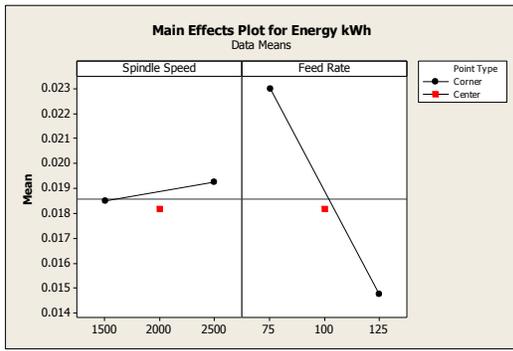
การวิเคราะห์ความแปรปรวนของงานวิจัยนี้ได้กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

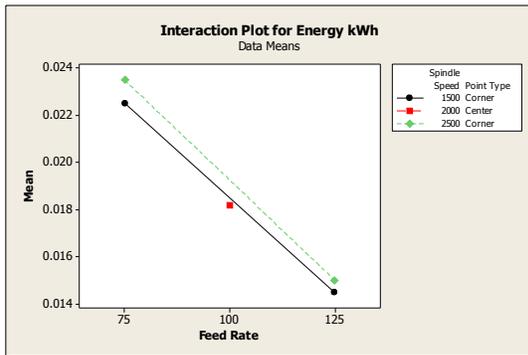
Source	DF	SS (*10 ⁻³)	MS (*10 ⁻³)	F	P
A	1	0.00113	0.00112	1.40	0.265
B	1	0.13612	0.13612	169.02	0.000
A*B	1	0.00013	0.00013	0.16	0.702
Error	10	0.00805	0.00081		
Total	13	0.14543			

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมทางสถิติพบว่า ความเร็วรอบ (A) ไม่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่อัตราป้อน (B) ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จากรูปที่ 4 พบว่าการเปลี่ยนระดับของความเร็วรอบส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย แต่การเปลี่ยนระดับของอัตราป้อนนั้นส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างชัดเจน ดังนั้นควรใช้ระดับของอัตราป้อนที่ 125 มิลลิเมตรต่อนาที ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุด และจากรูปที่ 5 พบว่าความเร็วรอบและอัตราป้อนไม่พบผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัย

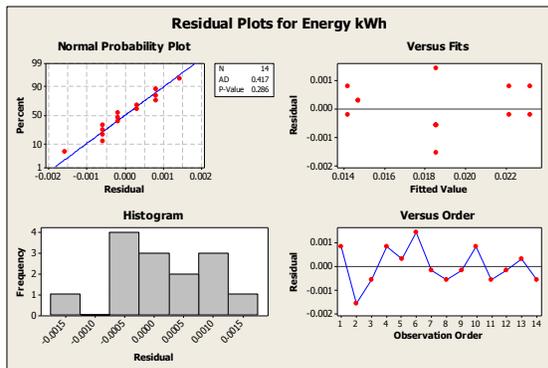
หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทดสอบข้อสมมติของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Assumptions of ANOVA) [6] โดยได้ทดสอบผ่านกราฟที่แตกต่างกันดังรูปที่ 6 พบว่ากราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) มีลักษณะเป็นเส้นตรง และจากการทดสอบการแจกแจงปกติด้วยวิธีการ Anderson-darling Test มีค่าเท่ากับ 0.286 ซึ่งมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับค่าเฉลี่ย (Fitted Value) พบว่า ค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวรอบแกนศูนย์อย่างสมดุลและไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนมีค่าคงที่ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผิดพลาดกับลำดับการทดลอง (Observation Order) พบว่าค่าผิดพลาดมีการกระจายตัวอย่างสุ่มและไม่มีรูปแบบ แสดงว่าค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนของงานวิจัยนี้มีความถูกต้องตามข้อสมมติ



รูปที่ 4 ผลกระทบหลักของความเร็รรอบและอัตราป้อน



รูปที่ 5 ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็รรอบและอัตราป้อน



รูปที่ 6 กราฟสำหรับตรวจสอบข้อสมมติของสมการถดถอย

5.2. การวิเคราะห์สมการถดถอย

หลังจากทดลองและวิเคราะห์ความแปรปรวน ผู้วิจัยได้สร้างสมการถดถอยเพื่อใช้สำหรับพยากรณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยโปรแกรมทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอย

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.033571	0.001740	19.30	0.000
A	0.00075×10^{-3}	0.00061×10^{-3}	1.23	0.244
B	-0.16500×10^{-3}	0.01219×10^{-3}	-13.53	0.000

S = 0.000862268 R² = 94.4% R² (adj) = 93.4%

จากตารางที่ 3 สมการถดถอยสำหรับพยากรณ์การใช้พลังงานไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (1) โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R²_{adj}) มีค่าเท่ากับ 93.4% หมายความว่าสมการถดถอยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองได้ถึง 93.4%

$$\text{Energy Consumption} = 0.0336 - 0.165 \times 10^{-3} \text{ Feed Rate} \quad (1)$$

และผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการถดถอยเพื่อทดสอบความเหมาะสมของสมการแสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งพบว่าค่า P-value ของ สมการถดถอย (Regression) มีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอย (1) สามารถสร้างได้ และค่า Lack of Fit มีค่า P-value เท่ากับ 0.32 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอย (1) มีความเหมาะสม

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับวิเคราะห์สมการถดถอย

Source	DF	SS (*10 ⁻³)	MS (*10 ⁻³)	F	P
Regression	2	0.137250	0.068625	92.30	0.00
Residual Error	11	0.008179	0.000744		
-Lack of Fit	2	0.001845	0.000923	1.30	0.32
-Pure Error	9	0.006333	0.000704		
Total	13	0.145429			

6. สรุปผลการทดลอง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือต้องการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม 6063 ด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ เพื่อเป็นแนวทางนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการลดใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองคือการใช้พลังงานไฟฟ้า และมีปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ 2 ปัจจัยคือ ความเร็รรอบที่ระดับ 1,500 และ 2,500 รอบต่อนาที และอัตราป้อนที่ระดับ 75 และ 125 มิลลิเมตรต่อนาที โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดจุดศูนย์กลางการทดลองเพื่อทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอยจากการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมทางสถิติพบว่าความเร็รรอบไม่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า แต่อัตราป้อน

ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยระดับของอัตราป้อนที่ 125 มิลลิเมตรต่อนาที ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุด และพบว่าความเร็วรอบและอัตราป้อนไม่มีผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัย หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทดสอบข้อสมมติของการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ามีความถูกต้องตามข้อสมมติ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้ และสุดท้ายผู้วิจัยได้สร้างสมการถดถอยเพื่อใช้สำหรับพยากรณ์การใช้พลังงานไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมทางสถิติสมการถดถอยที่ได้คือ $Energy\ Consumption = 0.0336 - 0.165 \times 10^{-3} Feed\ Rate$ โดยมีค่า R^2_{adj} เท่ากับ 93.4% และการทดสอบ Lack of Fit มีค่า P-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าสมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสม

7. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอของมีดกัดพร้อมด้วย รวมถึงผลที่เกิดเกี่ยวกับด้านคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ความหยابผิว และควรศึกษาถึงการกำหนดเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดอะลูมิเนียม ซึ่งทั้งหมดนี้กำลังอยู่ระหว่างการทำวิจัยเพิ่มเติม

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่จากสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th/dede>, พฤศจิกายน 2556.
- [2] A. Aggarwal, H. Singh, P. Kumar, and M. Singh, Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function, *Journal of materials processing technology*, vol.205, pp.42-50, 2008
- [3] Y. Guo, J. Loenders, J. Dufloy, and B. Lauwers, Optimization of energy consumption and surface quality in finish turning, *Procedia CIPR*, vol. 1, pp.512-517, 2012
- [4] N. Diaz, K. Ninomiya, J. Noble, and D. Dornfeld, Environmental impact characterization of milling and implications for potential energy savings in industry, *Procedia CIPR*, vol. 1, pp.518-523, 2012
- [5] Y. Oda, M. Mori, K. Ogawa, S. Nishida, M. Fujishima, and T. Kawamura, Study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-work piece inclination, *Manufacturing Technology*, Vol. 61, pp.119-122, 2012
- [6] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศชนัน เหลือง ไท บู ล ย . (2551). การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.