

บทความวิจัย

ผลกระทบของปัจจัยการตัดเฉือนต่อค่าความหยาบผิวและ การสึกหรอที่มุมหลบในกระบวนการกัดอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่ง ของแข็ง A356-T6

อุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี¹ อังศุมารินทร์ ประภาสพงษ์¹ สมเดช อิงคะวาระ²
และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์^{1*}

ได้รับบทความ: 18 เมษายน 2561

ได้รับบทความแก้ไข: 6 ธันวาคม 2561

ยอมรับตีพิมพ์: 12 ธันวาคม 2561

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการตัดเฉือนและรูปร่างของดอกเอ็นมิล ประกอบด้วย 7 ปัจจัย คือ อัตราป้อนต่อฟัน ความเร็วตัด ความลึกการกัดในแนวรัศมี ความลึกการกัดในแนวแกน มุมคายเศษ มุมเลี้ยว รวมถึงจำนวนคมตัดที่ส่งผลต่อค่าความหยาบของผิวและการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิลในกระบวนการกัดอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการหล่อป้องกันแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะมีการแข็งตัว (GISS) และผ่านกระบวนการทางความร้อน T6 ในงานวิจัยนี้ขึ้นทดสอบถูกกัดแบบแห้งด้วยเครื่องซีเอ็นซีมีดกัด และดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์ขนาด 12 มิลลิเมตร จากนั้นค่าความหยาบผิววัดโดยเครื่องวัดความหยาบผิว และการสึกหรอของดอกเอ็นมิลวัดด้วยกล้องไมโครสโคป งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนแฟคทอเรียล 2 ระดับในการออกแบบการทดลองและใช้วิเคราะห์ผลทางสถิติ จากการทดลองพบว่าผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุดคืออัตราป้อนต่อฟัน ตามด้วยจำนวนฟัน มุมคายเศษ ความลึกการตัดในแนวรัศมีและจำนวนคมตัดตามลำดับ ส่วนปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิล คือ จำนวนคมตัด อัตราป้อนต่อฟัน ความลึกการตัดในแนวรัศมี และความลึกการตัดในแนวแกน

คำสำคัญ: กระบวนการกัดด้วยดอกเอ็นมิล อะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนแฟคทอเรียล ค่าความหยาบผิว และการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิล

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

*ผู้พิมพ์ประสานงาน; email address: somsaksi@sut.ac.th

Influence of Machining Parameters on Surface Roughness and Tool Flank Wear in Milling of Semi-Solid A356-T6 Aluminum Alloy

Ukrit Thanasuptawee¹, Aungsumarin Prapasong¹,
Somdech Ingkawara² and Somsak Siwadamrongpong^{1*}

Received: 18 April 2018

Revised: 6 December 2018

Accepted: 12 December 2018

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the influence of machining parameters and tool geometry which are consisted of seven parameters; feed per tooth, cutting speed, radial depth of cut, axial depth of cut, rake angle, helix angle and number of teeth on surface roughness and tool flank wear in CNC end milling process of aluminum semi-solid A356. The workpieces were sized 48x48 millimeters cross section and 100 millimeters in length. These workpieces were produced by Gas Induced Semi-Solid Squeezed Casting (GISS-SC) and T6 heat treatment process. The settings of machining parameters in this experiment were conducted through the one eight fraction factorial experimental design. In addition, CNC machining center and uncoated carbide end milling cutter with a diameter of 12 millimeter were used under dry cutting condition. The surface roughness of face end-milled was measured by the surface roughness tester and the tool flank wear was measured by microscopes. It was found that the strongest main factor influence to surface roughness was feed per tooth, followed by number of teeth, rake angle, radial rake angle and cutting speed respectively. On the tool flank wear, number of teeth, feed per tooth, radial depth of cut and axial depth of cut were found to have significant influence.

Keywords: end milling process, aluminum semi-solid A356, fractional factorial design, surface roughness, tool flank wear

¹School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²Department of Industrial Technology Management, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Sri Ayutthaya Rajabhat University

*Corresponding author, email: somsaksi@sut.ac.th

บทนำ

ในปัจจุบันอะลูมิเนียมซิลิกอนถือว่าเป็นวัสดุที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากว่าเป็นวัสดุที่ใช้อย่างแพร่หลายเพราะวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความสามารถในการหล่อขึ้นรูปได้ดี [1-2] อะลูมิเนียมซิลิกอนเกรด A356 เป็นวัสดุที่มีปริมาณการใช้งานเป็นจำนวนมากในการผลิตชิ้นส่วนใน อุตสาหกรรมการบิน ยานยนต์ อากาศยาน และชิ้นส่วนของเครื่องจักรด้วยวิธีการหล่ออะลูมิเนียม แต่อย่างไรก็ตามในการหล่ออะลูมิเนียมทั่วไปมักพบปัญหาโพรงจากการหดตัว และรูพรุนที่เกิดจากโพรงอากาศ ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีการหล่อโลหะกึ่งของแข็งแบบ Rheocasting ที่ได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมต่างๆ ในประเทศไทยและต่างประเทศเพื่อลดปัญหาดังกล่าว คือการหล่อโลหะกึ่งของแข็งด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะมีการแข็งตัวของอะลูมิเนียม (Gas Induce Semi-Solid) กรรมวิธีนี้เป็นกระบวนการหล่อโดยการปล่อยแก๊สเฉื่อยผ่านแท่งแกรไฟต์พรุนสู่น้ำโลหะก่อนเทเข้าสู่ช่องส่งน้ำโลหะเพื่อทำการขึ้นรูป ซึ่งทำให้โลหะมีโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม โดยโลหะกึ่งของแข็งที่ได้เริ่มมีการแข็งตัวบางส่วนในขณะที่ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ทำให้ลดการเกิดโพรงหดตัวทำให้วัสดุมีคุณสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น นอกจากนี้ทำให้อุณหภูมิของโลหะกึ่งของแข็งลดลงในขณะที่ถูกเทเข้าสู่แม่พิมพ์ ส่งผลให้แม่พิมพ์มีอายุการใช้งานนานขึ้น [3-5]

กระบวนการกัดด้วยดอกเอ็นมิลเป็นหนึ่งในวิธีการที่ใช้มากที่สุดในการตัดเฉือนวัสดุสำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนต่างๆ ให้ได้ขนาดและรูปทรงที่ต้องการด้วยความแม่นยำสูง ภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว ซึ่งสองสิ่งสำคัญที่เป็นตัวชี้วัดในกระบวนการตัดเฉือนวัสดุด้วยวิธีการกัดด้วยดอกเอ็นมิลคือค่าความหยาบผิวของชิ้นส่วนต่างๆ และการสึกหรอของเครื่องมือตัดหลังจากผ่านกระบวนการตัดเฉือนวัสดุ ซึ่งค่าความหยาบผิวมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่ใช้วัดคุณภาพของผิวชิ้นงานเนื่องจากว่าส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความล้า ความต้านทานการกัดกร่อน และอื่นๆ ในบางครั้งความเสียหายอย่างร้ายแรงเป็นผลมาจากความหยาบผิว [6] นอกจากนี้การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนก็เป็นตัวชี้วัดเชิงเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากใช้ในการพยากรณ์ระยะเวลาในการเปลี่ยนเครื่องมือตัดเฉือนเพื่อหลีกเลี่ยงการหยุดชะงักของกระบวนการผลิตในขณะที่เครื่องมือตัดเกิดความเสียหาย ซึ่งค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดเกิดจากผลกระทบจากปัจจัยในกระบวนการตัดเฉือนและรูปทรงของเครื่องมือตัด

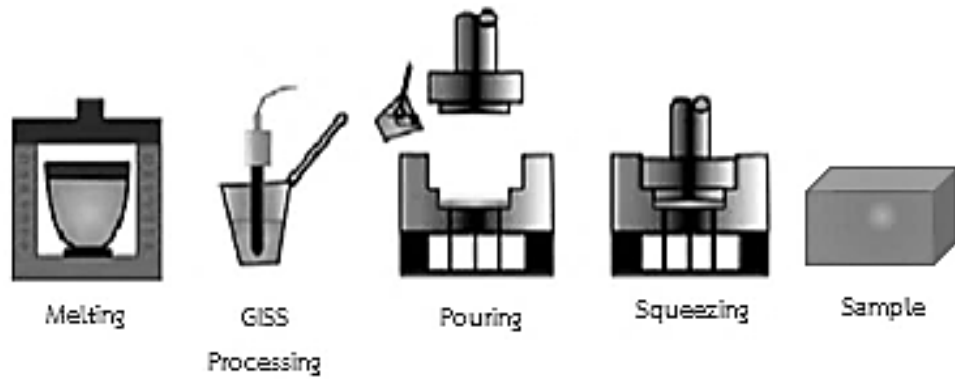
มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากปัจจัยในการตัดเฉือนที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด Mohamed และคณะ [7] พบว่า อัตราป้อนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุดในกระบวนการกัดด้วยเอ็นมิลถึง ในขณะที่ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย คือระหว่างอัตราป้อนและความลึกการกัดในแนวแกน Subramanian และคณะ [8] ได้สร้างสมการพยากรณ์ค่าความหยาบของผิวด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบผิวผลตอบในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมเกรด 7075-T6 ด้วยดอกบูบลเอ็นมิล คณะวิจัยพบว่าค่าความหยาบผิวจะลดลงเมื่อความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้น อัตราป้อนที่ลดลง รัศมีที่ปลายคมตัดเพิ่มขึ้น และมุมคายเศษที่เพิ่มขึ้น Yi และคณะ [9] ได้สร้างโมเดลพยากรณ์ค่าความหยาบผิวสำหรับสำหรับกระบวนการวัสดุอะลูมิเนียมเกรด 6061-T6 ด้วยไมโครเอ็นมิล คณะวิจัยได้สรุปว่าค่าความหยาบผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้น และความเร็วตัดลดลง Ekici และคณะ [10] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนสำหรับกระบวนการกัดวัสดุ Al-10% SiC MMC ด้วยเอ็นมิล ผู้วิจัยพบว่าอัตราป้อนคือปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุด ตามด้วยชนิดของผิวเคลือบ และความเร็วตัดตามลำดับ Sivasakthivel และคณะ [11] พบว่ามุมเลี้ยว ความเร็วรอบความลึกการกัดในแนวแกนและความลึกการกัดในแนวรัศมีส่งผลต่อการสึกหรอที่มุม

หยาบของเครื่องมือตัดในการกัดวัสดุอะลูมิเนียมเกรด 6063 ด้วยดอกเอ็นมิล Arokiadass และคณะ [12] ระบุว่าความเร็วรอบและสัดส่วนของ SiCp มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดตามด้วยอัตราป้อน ในขณะที่ความลึกการกัดใน แนวแกนวัสดุ LM25 Al/SiCp MMC ด้วยดอกกัดเอ็นมิล Jeyakumar และคณะ [13] ระบุว่าความลึกในการตัดและรัศมีของที่ปลายคมตัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหยาบของเครื่องมือตัดและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยระหว่าง อัตราป้อนและความลึกในการกัด รวมถึงผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนและรัศมีที่ปลายคมตัดส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่านักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาความหยาบผิวในกระบวนการกัดในวัสดุอะลูมิเนียมหลายชนิด แต่ยังไม่มียกวิจัยท่านใดที่ศึกษาค่าความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ซึ่งรูปด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะมีการแข็งตัว (GISS) ด้วยดอกเอ็นมิล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลกระทบจากพารามิเตอร์ในการตัดเดือนประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนต่อฟัน ความลึกการกัดในแนวรัศมีและความลึกการกัด ในแนวแกน รวมไปถึงผลกระทบจากรูปทรงของดอกเอ็นมิล ซึ่งประกอบไปด้วย มุมคายเศษ มุมเลี้ยว และ จำนวนคมตัด

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

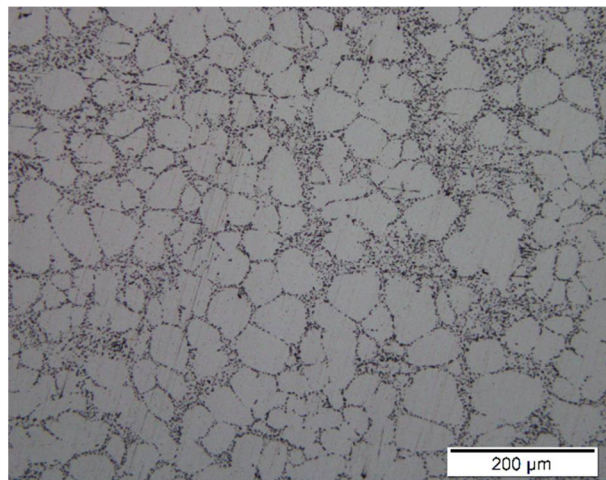
ในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นทดสอบเป็นอะลูมิเนียมหล่อเกรด A356 ซึ่งขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สเข้าไปในน้ำโลหะขณะมีการแข็งตัว (GISS) โดยเริ่มจากก้อนโลหะอะลูมิเนียมเกรด A356 ถูกหลอมในเตาหลอมด้วยอุณหภูมิ 700 °C จากนั้นน้ำโลหะถูกตักขึ้นมาด้วยถ้วยตักจนกระทั่งอุณหภูมิ น้ำโลหะลดลงที่ 620 °C จากนั้นปล่อยแก๊สไนโตรเจนผ่านแท่งแกรไฟต์พ่นสู่น้ำโลหะในกระบวยเพื่อกวนน้ำโลหะ ในขณะที่เริ่มมีการแข็งตัว โดยใช้เวลา 7 นาที จากนั้นน้ำโลหะถูกเทใส่แม่พิมพ์ ซึ่งตายและพันซ์ถูกเผาที่อุณหภูมิ 300 °C และ 80 °C ตามลำดับ และชิ้นงานถูกขึ้นรูปด้วยการหล่ออัดโดยใช้ความดัน 150 MPa ซึ่งขั้นตอนเป็นไปตามดังรูปที่ 1 จากนั้นขึ้นทดสอบที่ผ่านการหล่ออัดได้ถูกนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ดังต่อไปนี้ การอบละลายที่อุณหภูมิ 540 °C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นทำการการชุบเย็นและทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 135 °C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 พบว่าโครงสร้างของชิ้นทดสอบเป็นเกรนแบบก้อนกลม (Globular structure) โดยประกอบด้วยเนื้อเมตริกซ์ คือ เฟส α -Al (บริเวณสีขาว) และเฟสยูเทคติกซิลิกอน คือ บริเวณที่มีรูปร่างเป็นแผ่นเล็ก ๆ กระจายตามขอบเกรนของเฟส α -Al ซึ่งเกรนก้อนกลมนี้ทำให้ชิ้นงานแข็งแรงมากขึ้นและลดการเกิดโพรงที่เกิดจากการหดตัวของวัสดุ โดยที่ส่วนผสมของของอะลูมิเนียม A356 แสดงดังตารางที่ 1



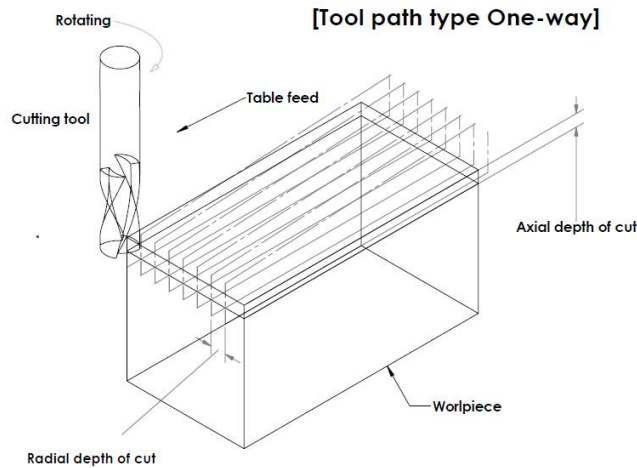
รูปที่ 1 กระบวนการหล่ออัดแบบกึ่งของแข็งด้วยวิธี GISS [5]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของอะลูมิเนียม A356

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
7.18	0.215	0.108	0.0197	0.0045	0.0089	0.112	Bal.



รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุอะลูมิเนียมหล่ออัดแบบกึ่งของแข็ง A356-T6



รูปที่ 3 กระบวนการกัดปาดหน้าด้วยดอกเอ็นมิล

งานวิจัยทำการทดลองภายใต้การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนแฟคทอเรียลซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับศึกษาคัดกรองผลกระทบหลักจากแต่ละปัจจัยและผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัย ปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 7 ปัจจัย ดังนี้ อัตราป้อนต่อฟัน ความเร็วตัด ความลึกการกัดในแนวรัศมี ความลึกการกัดในแนวแกน, มุมคายเศษ, มุมเลื่อยและจำนวนคมตัด โดยทำการทดลองทั้งหมด $(2^{7-3}) = 16$ การทดลอง ซึ่งปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 โดยที่ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแนะนำจากผู้ผลิตเครื่องมือตัด หลังจากออกแบบการทดลองผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยทำการกัดชิ้นงานทดสอบวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ขนาด $48 \times 48 \times 100$ มิลลิเมตร ที่มีค่าความแข็งเฉลี่ย 114.52 HV ด้วยเครื่องซีเอ็นซีมิลลิ่ง 3 แกนยี่ห้อ Bridgeport รุ่น VMC-500/16 และดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์เกรด K200 แบบไม่เคลือบผิวขนาด 12 มิลลิเมตร จำนวน 16 ดอก ที่มีรูปทรงแตกต่างกันภายใต้การกัดแบบแห้งเพื่อเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หลังจากชิ้นทดสอบผ่านกระบวนการกัดในแต่ละการทดลองตามรูปภาพที่ 3 จะถูกนำมาวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิวยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 โดย 1 ชิ้นทดสอบจะถูกวัดค่าความหยาบผิวทั้งหมด 24 จุด และนำมาวัดค่าเฉลี่ย นอกจากนี้ในแต่ละการทดลองดอกเอ็นมิลจะต้องถูกนำมาวัดการสึกหรอที่มุมหลบด้วยไมโครสโคปยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าการสึกหรอที่มุมหลบที่มากที่สุด (VBmax) ด้วยกำลังขยาย 20 เท่า ซึ่งอ้างอิงจากวิธีการวัดตามงานวิจัยของ DolinSek และคณะ [14] โดยรูปที่ 4 แสดงถึงลักษณะการสึกหรอของดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์ นอกจากนี้ตารางการทดลองและผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ปัจจัยในการตัดเฉือนและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

Cutting parameters	Unit	Symbol	Levels	
			Low	High
Feed per tooth	mm/z	Fz	0.02	0.04
Cutting Speed	m/min	Vc	215	245
Axial Depth of cut	mm	Ap	0.4	0.8
Radial depth of cut	mm	Ae	3	6
Helix Angle	degree	Helix	35	45
Rake Angle	degree	Rake	10	14
Number of Teeth	flute	Z	2	3

ตารางที่ 3 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

Std Order	Fz	Vc	Ap	Ae	Z	Helix	Rake	Ra (μm)	VBmax (μm)
12	0.04	245	0.4	6	2	35	10	0.311	47.95
14	0.04	215	0.8	6	2	35	14	0.576	37.44
9	0.02	215	0.4	6	2	45	14	0.209	55.44
10	0.04	215	0.4	6	3	45	10	0.621	32.31
15	0.02	245	0.8	6	2	45	10	0.167	44.72
7	0.02	245	0.8	3	2	35	14	0.237	58.09
2	0.04	215	0.4	3	3	35	14	0.564	46.94
13	0.02	215	0.8	6	3	35	10	0.316	40.25
6	0.04	215	0.8	3	2	45	10	0.344	35.73
3	0.02	245	0.4	3	3	45	10	0.262	51.05
4	0.04	245	0.4	3	2	45	14	0.429	52.55
8	0.04	245	0.8	3	3	35	10	0.415	43.89
16	0.04	245	0.8	6	3	45	14	0.673	22.75
1	0.02	215	0.4	3	2	35	10	0.151	70.13
11	0.02	245	0.4	6	3	35	14	0.337	39.73
5	0.02	215	0.8	3	3	45	14	0.208	41.91

ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง ได้นำมาทำการวิเคราะห์โดยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความหยาบผิว และการสึกหรอที่มุมหลบของเครื่องมือตัดด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งจากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ชี้ให้เห็นผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อผลตอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยابผิว

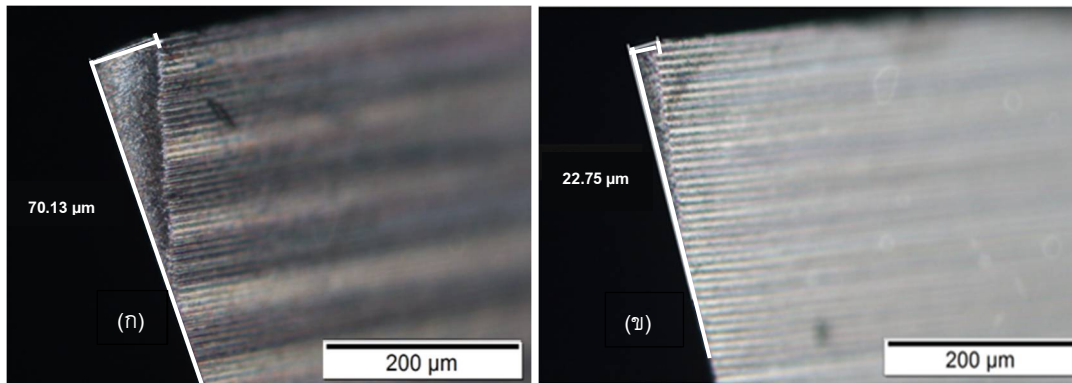
จากตารางที่ 4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าความหยابผิวได้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยابผิวประกอบด้วย อัตราป้อนต่อฟืน ความเร็วตัด ความลึกการกัดดินในแนวรัศมี จำนวนคมตัด และมุมคายเศษ โดยที่ค่า P-value ของปัจจัยดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.05 ในขณะที่ผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยابผิวประกอบด้วย ผลกระทบร่วมระหว่างอัตราป้อนต่อฟืน และมุมคายเศษ อัตราป้อนต่อฟืนและความเร็วตัด อัตราป้อนต่อฟืนและมุมเลี้ยว ความเร็วตัดและความลึกการกัดดินในแนวรัศมี อัตราป้อนต่อฟืนและความลึกการกัดดินแนวแกน รวมถึงอัตราป้อนต่อฟืนและจำนวนคมตัดตามลำดับ โดยที่พจน์ของผลกระทบร่วมของปัจจัยดังกล่าวมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 นอกจากนี้ตารางที่ 4 แสดงว่าค่า R-square(adj) มีค่าเท่ากับ 99.97% หมายความว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูล และเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะนำไปสร้างสมการทำนายค่าผลตอบต่อไป ซึ่งสมการถดถอยสำหรับค่าความหยابผิวได้ดังสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} Ra = & 0.36375 + 0.12787 Fz - 0.00989 Vc + 0.03750 Ae + 0.06075 Z + 0.0038 Helix \\ & + 0.04038 Rake - 0.02475 Fz*Vc + 0.01612 Fz*Ae + 0.01587 Fz*Z \\ & + 0.02475 Fz*Helix + 0.02850 Fz*Rake - 0.01937 Vc*Ae \end{aligned} \quad (1)$$

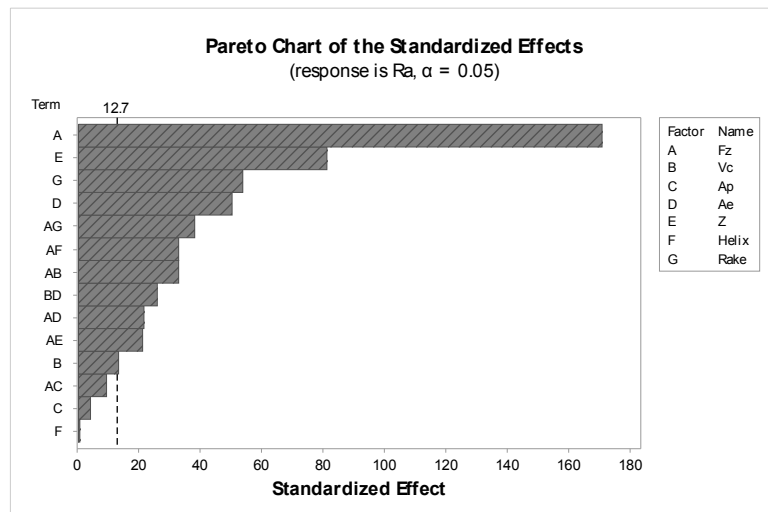
ตารางที่ 4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับค่าความหยابผิว

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	0.418604	0.0299	3322.25	0.014
Linear	7	0.370995	0.052999	5888.81	0.01
Fz	1	0.261632	0.261632	29070.25	0.004
Vc	1	0.00156	0.00156	173.36	0.048
Ap	1	0.000169	0.000169	18.78	0.144
Ae	1	0.0225	0.0225	2500	0.013
Z	1	0.059049	0.059049	6561	0.008
Helix	1	0.000002	0.000002	0.25	0.705
Rake	1	0.026082	0.026082	2898.03	0.012
2-Way Interactions	7	0.047609	0.006801	755.7	0.028
Fz*Vc	1	0.009801	0.009801	1089	0.019
Fz*Ap	1	0.000812	0.000812	90.25	0.067
Fz*Ae	1	0.00416	0.00416	462.25	0.03
Fz*Z	1	0.004032	0.004032	448.03	0.03
Fz*Helix	1	0.009801	0.009801	1089	0.019
Fz*Rake	1	0.012996	0.012996	1444	0.017
Vc*Ae	1	0.006006	0.006006	667.36	0.025
Error	1	0.000009	0.000009		
Total	15	0.418613			
R-sq = 100% R-sq(adj) = 99.97% R-sq(pred) = 99.45%					

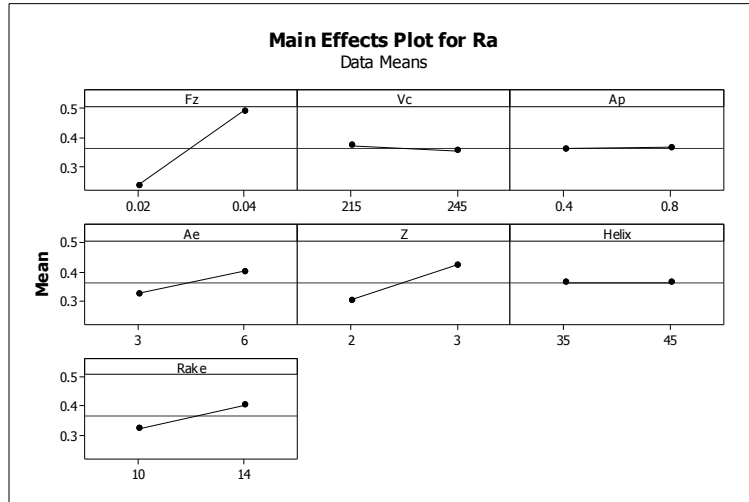
รูปที่ 5 แสดงสัดส่วนของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าอัตราป้อนต่อฟันเป็นผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุด และรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าผลกระทบหลักของอัตราป้อนต่อฟัน ความลึกการกัดในแนวแกน ความลึกการกัดในแนวรัศมี จำนวนคมตัด มุมคายเศษ และมุมเลี้ยวมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าความหยาบผิว ในขณะที่ความเร็วตัดมีความสัมพันธ์เชิงลบกับค่าความหยาบผิว ในขณะที่รูปภาพที่ 7 แสดงให้เห็นว่าอัตราป้อนต่อฟันมีผลกระทบร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ทั้งหมด 5 ปัจจัย เป็นการยืนยันว่าอัตราป้อนต่อฟันเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ



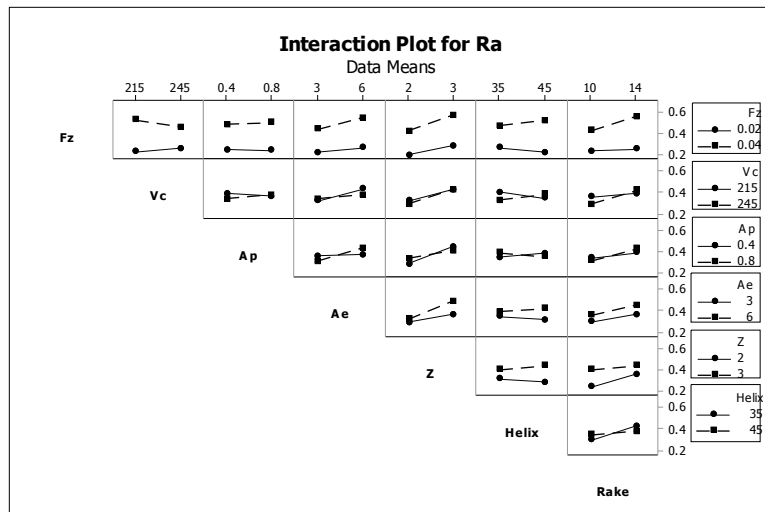
รูปที่ 4 ลักษณะการสึกหรอของดอกเอ็นมิลคาร์ไบด์ (ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 16



รูปที่ 5 กราฟพาเรโตแสดงสัดส่วนของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว



รูปที่ 6 ผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว



รูปที่ 7 ผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว

การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อการสีกหรือที่มูมหลบของดอกเอ็นมิล

จากตารางที่ 5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับการสีกหรือที่มูมหลบของดอกเอ็นมิล พบว่าผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อการสีกหรือที่มูมหลบของดอกเอ็นมิลประกอบด้วยอัตราป้อนต่อพื้นที่ ความลึกการกีดในแนวรัศมี ความลึกการกีดในแนวแกน และจำนวนคมตัด โดยที่ค่า P-value ของปัจจัยดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 0.05 ในขณะที่ไม่มีผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อการสีกหรือที่มูมหลบของดอกเอ็นมิล นอกจากนี้ตารางที่ 5 แสดงว่าค่า R-square (adj) มีค่าเท่ากับ 99.00% หมายความว่าแบบจำลองมีความพอเพียงในการฟิตข้อมูล และเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะนำไปสร้างสมการทำนายค่าผลตอบต่อไป ซึ่งสมการถดถอยสำหรับการสีกหรือที่มูมหลบของดอกเอ็นมิลได้ดังสมการที่ (2)

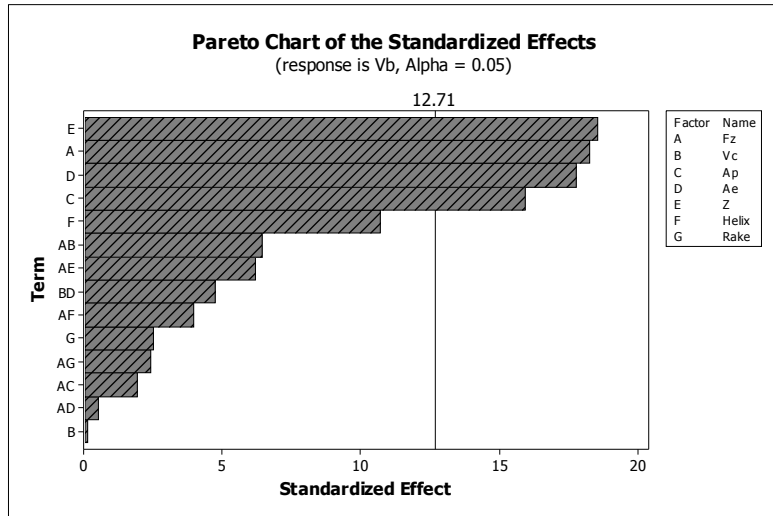
$$VB = 45.055 - 5.110 Fz - 4.460 Ap - 4.980 Ae - 5.200 Z \quad (2)$$

ตารางที่ 5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับการสีกหรือที่มูมหลบของดอกเอ็นมิล

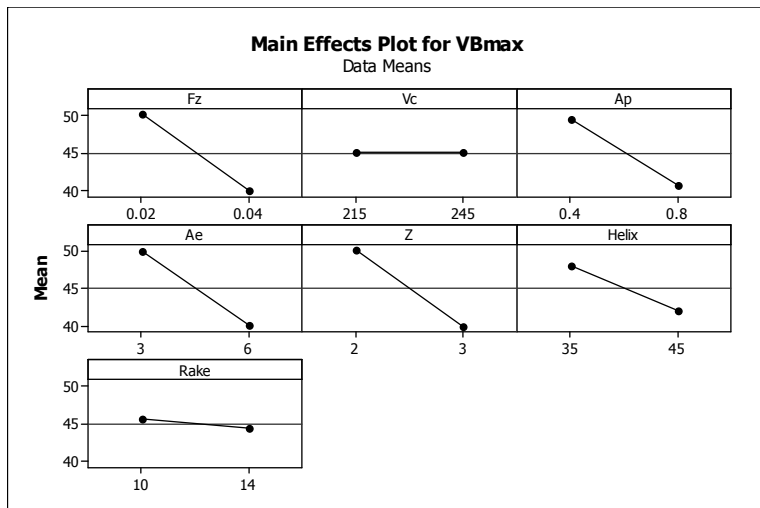
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	14	1877.01	134.072	106.88	0.076
Linear	7	1717.15	245.307	195.56	0.055
Fz	1	417.79	417.794	333.06	0.035
Vc	1	0.02	0.021	0.02	0.918
Ap	1	317.91	317.909	253.44	0.04
Ae	1	397.01	397.006	316.49	0.036
Z	1	432.85	432.848	345.06	0.034
Helix	1	143.76	143.76	114.6	0.059
Rake	1	7.81	7.812	6.23	0.243
2-Way Interactions	7	159.86	22.837	18.21	0.179
Fz*Vc	1	52.06	52.056	41.5	0.098
Fz*Ap	1	4.58	4.58	3.65	0.307
Fz*Ae	1	0.35	0.354	0.28	0.689
Fz*Z	1	47.82	47.817	38.12	0.102
Fz*Helix	1	19.8	19.803	15.79	0.157
Fz*Rake	1	7.26	7.263	5.79	0.251
Vc*Ae	1	27.98	27.984	22.31	0.133
Error	1	1.25	1.254		
Total	15	1878.26			

R-sq = 99.93% R-sq(adj) = 99.00% R-sq(pred) = 82.90%

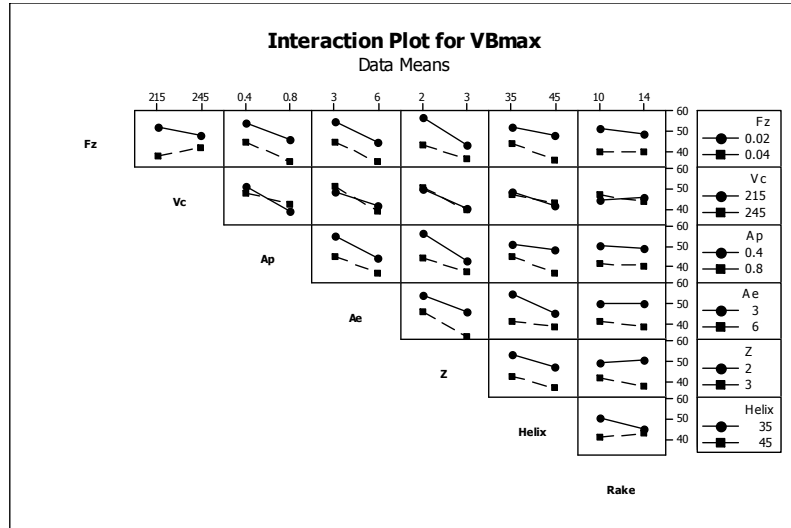
รูปที่ 8 แสดงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิล ซึ่งเห็นได้ว่าจำนวนคมตัดส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิลมากที่สุดตามด้วยอัตราป้อนต่อฟัน ความลึกการกัดแนวรัศมี และความลึกการกัดในแนวแกน โดยที่ทั้งสี่ปัจจัยนี้ส่งผลต่อปฏิกิริยาเดียวกันในทางสถิติ นอกจากนี้รูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าผลกระทบหลักของอัตราป้อนต่อฟัน ความลึกการกัดในแนวแกน ความลึกการกัดในแนวรัศมี จำนวนคมตัด มุมคายเศษ และมุมเลี้ยวมีความสัมพันธ์เชิงลบกับการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิล ในขณะที่ความเร็วตัดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิล รูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าไม่มีผลกระทบร่วมของปัจจัยใดที่ส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



รูปที่ 8 กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิล



รูปที่ 9 ผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิล



รูปที่ 10 ผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิล

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาผลกระทบของปัจจัยในการตัดเฉือนและรูปร่างของดอกเอ็นมิลส่งผลต่อค่าความหยาบผิว และการสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิลในกระบวนการกัดอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด A356-T6 โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนแฟคทอเรียล 2 ระดับ

จากการทดลองพบว่าผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติประกอบด้วย อัตราป้อนต่อฟัน ความเร็วตัด ความลึกการกัดในแนวรัศมี จำนวนคมตัดและมุมคายเศษ ซึ่งอัตราป้อนต่อฟันเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุด และพบว่าอัตราป้อนความลึกการกัดในแนวรัศมี จำนวนคมตัด มุมคายเศษ ในระดับต่ำจะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวต่ำ ซึ่งตรงกับรายงานวิจัยก่อนหน้านี้ในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมชนิดอื่นๆ ที่ได้สรุปไว้ว่าอัตราป้อนที่ต่ำและความเร็วตัดสูงจะนำไปสู่ค่าความหยาบผิวที่ต่ำ [7-13] เพราะว่าเมื่อกัดชิ้นงานด้วยอัตราป้อนต่อฟันต่ำและความเร็วตัดสูงจะส่งผลให้คมตัดของดอกเอ็นมิลหมุนกัดชิ้นงานในจำนวนรอบที่มากกว่าเมื่อเดินกัดชิ้นงานไปในระยะทางที่เท่ากัน นั่นหมายความว่าเมื่อดอกเอ็นมิลหมุนครบ 1 รอบจะตัดเฉือนเนื้อชิ้นงานในปริมาณที่น้อยกว่าส่งผลให้เศษชิพหนาน้อยกว่าการใช้อัตราป้อนสูงและความเร็วรอบต่ำ จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าเศษตัดของการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 9 ดังรูปที่ 11 (ก) และ 11 (ข) ที่กัดชิ้นงานด้วยอัตราป้อนที่ 0.02 มิลลิเมตรต่อฟันที่มีขนาดความหนาของเศษตัดบางกว่าการทดลองที่ 16 ดังรูปที่ 11 (ค) ซึ่งหมายความว่า การกัดชิ้นงานด้วยอัตราป้อนสูงและความเร็วรอบต่ำนั้นจะทำให้เกิดแรงกระทำที่คมตัดสูงส่งผลให้การสั่นสะเทือนในกระบวนการตัดเฉือนเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่จำนวนคมตัดที่น้อยส่งผลให้ได้ค่าความหยาบผิวที่ดี เพราะว่าจำนวนคมตัดที่น้อยกว่าสามารถนำพาเศษออกจากบริเวณการตัดเฉือนได้ดีกว่า จำนวนคมตัดมากกว่า ซึ่งประโยชน์ของการที่มีจำนวนคมตัดมากจะทำให้ดอกเอ็นมิลแข็งแรงกว่าจำนวนคมตัดน้อย แต่ในการกัดอะลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุอ่อนและเหนียวไม่มีความจำเป็นที่ใช้ดอกเอ็นมิลที่มีหลายคมตัดเพียงแต่ต้องเลือกใช้เอ็นมิลที่มีคมตัดน้อยเพื่ออายุเศษได้ดีที่สุด เมื่อพิจารณามุมคายเศษพบว่าเมื่อมุมคายเศษสูงจะส่งผลให้มีการคาย

เศษได้ดีกว่าแต่ในทางตรงกันข้ามถ้ามูมคายเศษมากเกินไปจะส่งผลให้คมตัดของดอกเอ็นมิลแหลมมากขึ้นทำให้ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว และเมื่อพิจารณาความลึกการตัดในแนวรัศมี พบว่าเมื่อความลึกการตัดในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างดอกเอ็นมิล และชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อแรงในการตัดเฉือนที่มากขึ้น ในงานวิจัยนี้ยังพบว่าความลึกการกัดในแนวแกนไม่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าค่าปัจจัยที่ส่งผลให้ได้ค่าความหยาบผิวต่ำที่สุดคือ อัตราป้อนต่อฟัน 0.02 มิลลิเมตรต่อฟัน, ความเร็วตัด 215 เมตรต่อนาที ความลึกการกัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร ความลึกการกัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร จำนวนคมตัด 2 คมตัด มุมเลื่อย 35 องศา และมูมคายเศษ 10 องศา



รูปที่ 11 ลักษณะของเศษตัด (ก) การทดลองที่ 1 (ข) การทดลองที่ 9 (ค) การทดลองที่ 16

ผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพหรือที่มูมหลบของดอกเอ็นมิลประกอบด้วย จำนวนคมตัด อัตราป้อนต่อฟัน ความลึกการกัดแนวรัศมี และความลึกการกัดในแนวแกน โดยที่ปัจจัยดังกล่าวมีความสัมพันธ์เชิงลบกับการสึกหรอที่มูมหลบของดอกเอ็นมิล โดยที่จำนวนคมตัดที่ระดับต่ำทำให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดที่มากกว่าจำนวนคมตัดที่ระดับสูง เนื่องจากเครื่องมือตัดในการป้อนตัด 1 รอบของคมตัด 2 ฟัน จะทำการตัดเฉือนวัสดุ 2 ครั้งต่อ 1 รอบ ส่งผลให้แรงในตัดเฉือนนั้นเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุทำให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดมากกว่าคมตัด 3 ฟัน ในขณะที่เมื่อใช้อัตราป้อนต่อฟันในระดับต่ำทำให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดที่มากกว่าอัตราป้อนต่อฟันที่ระดับสูง เนื่องจากการใช้อัตราป้อนที่ต่ำนั้นจะทำให้เกิดการตัดเฉือนวัสดุซ้ำๆ ตรงบริเวณพื้นผิวเดิมเป็นเวลานานกว่าอัตราป้อนที่ระดับสูง ส่งผลให้เครื่องมือตัดเกิดความล้ามากกว่าการเดินป้อนของเครื่องมือตัดที่ระดับสูง นอกจากนี้จากการทดลองยังทราบอีกว่าการกัดชิ้นงานด้วยความลึกการกัดในแนวแกนและแนวรัศมีที่ระดับสูงส่งผลให้การสึกหรอที่มูมหลบของดอกเอ็นมิลต่ำกว่าการกัดชิ้นงานด้วยความลึกการกัดในแนวแกนและแนวรัศมีที่ระดับต่ำ เนื่องจากว่าเมื่อเพิ่มความลึกการกัดในแนวแกนจะส่งผลให้ดอกเอ็นมิลที่สัมผัสกับชิ้นงานมีความนิ่งมากขึ้น และทำให้เกิดการสั่นสะเทือนระหว่างดอกเอ็นมิลและชิ้นงานลดลง [14] ซึ่งรูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบการสึกหรอที่มูมหลบของการทดลองที่ 1 ดังรูป 4 (ก) และการสึกหรอที่มูมหลบของการทดลองที่ 16 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 (ข) พบว่าการทดลองที่ 1 ที่กัดชิ้นงานด้วยจำนวนคมตัด อัตราป้อนต่อฟัน ความลึกการกัดแนวรัศมีและความลึกการกัดในแนวแกนที่มีค่าต่ำกว่าการทดลองที่ 16 ส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่มูมหลบมากกว่า

ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าค่าปัจจัยที่ส่งผลให้การสึกหรอที่มุมหลบของดอกเอ็นมิลต่ำที่สุดคือ อัตราป้อนต่อฟัน 0.04 มิลลิเมตรต่อฟัน ความเร็วตัด 245 เมตรต่อนาที ความลึกการกัดในแนวแกน 0.8 มิลลิเมตร ความลึกการกัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร จำนวนคมตัด 3 คมตัด มุมเลื่อย 45 องศา และมุมคายเศษ 14 องศา

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2560 แก่คณะผู้วิจัย และขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Eguskiza, S., Niklas, A., Fernández-Calvo, A. I., Santos F., & Djurdjevic, M. (2015). Study of strontium fading in Al-Si-Mg and Al-Si-Mg-Cu alloy by thermal analysis. *International Journal of Metalcasting*, 9(3), 43-50.
2. Lim, Y. P., Yeo, W. H., & Masita, A. (2017). Effect of heat treatment on gravity die-cast Sc-A356 aluminium alloy. *Manufacturing Review*, 4(3), 1-3.
3. Elahi M. A., & Shabestari G. (2016). Effect of various melt and heat treatment conditions on impact toughness of A356 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(4), 956-965.
4. Wannasin, J., Junudom, S., Rattanochaikul, T., & Flemings, M.C. (2008). Development of the gas induced semi-solid metal process for aluminum die casting applications. *Solid State Phenomena*, 141-143, 97-102.
5. Burapa, R., Janudom, S., Chucheeep, T., Canyook, R., & Wannasin J. (2010). Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(3), 857-861.
6. Routara, B. C., Bandyopadhyay, A., & Sahoo, P. (2009). Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(11-12), 1166-1180.
7. Hayajneh, M. T., Tahat M. S., & Bluhm J. (2007). A Study of the effects of machining parameters on the surface roughness in the end-milling process. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1(1), 1-5.
8. Subramanian, M., Sakthivel M., & Sudhakaran R. 2014. Modeling and analysis of surface roughness of AL7075-T6 in end milling process using response surface methodology. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(10), 7299-7313.

9. Yi, J., Jiao, L., Wang, X., Xiang, J., Yuan M., & Gao, S. (2015). Surface roughness models and their experimental validation in micro milling of 6061-T6 Al alloy by response surface methodology. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1), 1-9.
10. Ekici, E., Samtaş G., & Gülesin M., (2014). Experimental and statistical investigation of the machinability of Al-10% SiC MMC produced by hot pressing method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4), 3289-3298.
11. Sivasakthivel, P. S., Vel Murugan, V., & Sudhakaran, R. (2010). Prediction of tool wear from machining parameters by response surface methodology in end milling. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(6), 1780-1789.
12. Arokiadass, R., Palaniradja, K., & Alagumoorthi, N. (2012). Prediction and optimization of end milling process parameters of cast aluminium based MMC Transactions of Nonferrous. *Metals Society of China*, 22(7), 1568-1574.
13. Jeyakumar, S., Marimuthu, K., & Ramachandran, T. (2013). Prediction of cutting force, tool wear and surface roughness of Al6061/SiC composite for end milling operations using RSM. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(9), 2813-2822.
14. Dolinsek, S., & Kopa, J. Mechanism and types of tool wear; particularities in advanced cutting materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 19(1), 11-18.