วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 27 ฉบับที่ 2 เม.ย. – มิ.ย. 2560
The Journal of KMUTNB., Vol. 27, No. 2, Apr. – Jun. 2017

บทความวิจัย

ปัจจัยในการกัดชิ้นงานด้วยมีดกัดเอ็นมิลล์โซลิดคาร์ไบด์เคลือบผิวไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีผลต่ออายุการใช้งานของคมตัดและความเรียบผิว

ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ* และ บัญญัติ พันธ์ประสิทธิ์เวช
ภาควิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0−3437−7642 อีเมล: hongsuwan_p@silpakorn.edu DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.03.004
รับเมื่อ 19 มกราคม 2559 ตอบรับเมื่อ 4 พฤษภาคม 2559 เผยแพร่ออนไลน์ 31 มีนาคม 2560
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยในการกัดชิ้นงานด้วยมีดกัดเอ็นมิลล์โซลิดคาร์ไบด์เคลือบผิวไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีผลต่ออายุการใช้งานของคมตัดและความเรียบผิว โดยทำการทดสอบการตัดเฉือนวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (S45C) ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดที่สำคัญคือความเร็วรอบ อัตราการป้อนและความลึกในการตัดเฉือน นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อคมตัดยังเกิดจากทิศทางการควบคุม ระยะในการป้อนตัดเฉือนงานด้านข้าง และการหล่อเย็น ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงทำการทดลองโดยควบคุมความเร็วรอบ อัตราการป้อน ความลึกในการตัดเฉือน และได้กำหนดปัจจัยในการศึกษาทดลองโดยกำหนดปัจจัย 3 ประเภทคือ ระยะการป้อน (Overlap) ทิศทางควบคุมการกัด (Cut Direction) และน้ำหล่อเย็น (Coolant) ตัวแปรคือความเรียบผิวของงานซึ่งอยู่ในขอบเขตที่กำหนดในมาตรฐานงานกัดความเรียบผิว (Ra) ≤ 1.6 ไมโครเมตร ใช้ความเร็วรอบคงที่ 1500 รอบ/นาที โดยมีการกำหนดระดับปัจจัย 2 ระดับคือระยะการป้อนที่ 2 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร ทิศทางการเคลื่อนที่ตัดเฉือนแบบ Climb Milling และการเคลื่อนที่ตัดเฉือนแบบ Conventional Milling การปิดและเปิดน้ำหล่อเย็น จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานและความเรียบผิวงานคือ ระยะการป้อน ทิศทางควบคุมการกัด และการปิดเปิดน้ำหล่อเย็นมีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05 ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดคือทิศทางการเคลื่อนที่การตัดเฉือนควรใช้แบบกัดตาม ควรเปิดน้ำหล่อเย็น และระยะการป้อนที่ 2 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้อายุการใช้งานมีดกัดสามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมีคุณภาพความเรียบผิวงานที่ดีและมีอายุการใช้งานนานขึ้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายโรงงานลดลงเมื่อเลือกปัจจัยที่เหมาะสม

คำสำคัญ: ระยะการป้อน, ทิศทางการควบคุมการกัด, น้ำหล่อเย็น, ค่าความเรียบผิว, อายุการใช้งานของคมตัด

การอ้างอิงบทความ: ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ และ บัญญัติ พันธ์ประสิทธิ์เวช, "ปัจจัยในการกัดชิ้นงานด้วยมีดกัดเอ็นมิลล์โซลิดคาร์ไบด์เคลือบผิวไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีผลต่ออายุการใช้งานของคมตัดและความเรียบผิว," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 2, หน้า 303−313 เม.ย.–มิ.ย. 2560.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 27 ฉบับที่ 2 เม.ย. – มิ.ย. 2560
The Journal of KMUTNB., Vol. 27, No. 2, Apr. – Jun. 2017

Research Article

Factors of Machining with Milling Tool TiAlN Coated Solid Carbide Finishing End Mill Affecting Life Time of Cutting Edge and Surface Roughness

Patipat Hongsuwan* and Banyat Panprasitvech
Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace, Nakornpathom, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0−3437−7642, E−mail: hongsuwan_p@Silpakorn.edu DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.03.004
Received 19 January 2016; Accepted 4 May 2016; Published online:31 March 2017
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This study aimed to identify factors in the Soloid Carbide Finishing End Mill (TiAlN) affecting to the utilization duration of cutting by considering the test machining medium carbon steel (S45C) Factors affecting the utilization duration of cutting are spindle speed, feed rate and depth of cut. In addition, factors that affect the cutting are also occurring from direction, overlap and coolant. Therefore, this research is conducted by controlled experiments the cutting speed, feed rate, depth of cut and determining three factors include overlap, cut direction and coolant. The surface roughness variable could define the standard of milling surface roughness (Ra) ≤1.6 micrometers which uses constant speed at 1500 rpm. by setting 2 level include overlap at 2 mm and 4 mm. Moreover, setting climb milling, conventional milling, and coolant by controlling as closed and reopened are important to the utilization duration. The study found that the significant of cut direction, Overlap, and coolant on life time of cutting edge is .05. The best outcome can be achieved by using two millimeters overlap, climb milling and open coolant. The factory cost reduced when selecting an appropriate factor.

Keywords: Overlap, Cut Direction, Coolant, Surface Roughness, Lifetime of the Cutting Edge

Please cite this article in press as: P. Hongsuwan and B. Panprasitvech, "Factors of machining with milling tool TiAlN coated solid carbide finishing end mill affecting life time of cutting edge and surface roughness," *The Journal of KMUTNB*., vol. 27, no. 2, pp. 303–313, Apr.–Jun. 2017 (in Thai).

1. บทนำ

ประเทศไทยในปัจจุบันมีการขยายตัวด้านอุตสาหกรรมการผลิตอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและการผลิตแม่พิมพ์จำเป็นต้องมีการตัดเฉือนโลหะในขบวนการขึ้นรูป เช่น งานกลึง งานไส งานเจียระไน และงานกัด เป็นต้น โดยเครื่องจักรที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling Machine) ที่จะทำให้ได้ค่าความละเอียดของผิวงานและขนาดที่มีความเที่ยงตรงสูง เนื่องจากเครื่องกัดอัตโนมัติสามารถที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการตัดเฉือน ดังนั้นถ้าสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยการตัดเฉือนที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ จะทำให้สามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายลงได้เพื่อที่จะศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยการตัดเฉือน

เครื่องกัดอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในงานด้านการผลิตชิ้นส่วน เนื่องจากเป็นเครื่องจักรที่มีความเที่ยงตรงสูงคุณภาพของผิวชิ้นงานดีและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ [1] ในอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ แม่พิมพ์ และการตัดเฉือนชั้นสูงหรือเทคโนโลยีเครื่องมือตัด การตัดเฉือนงานกัดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการตัดเฉือนคมมีดตัด [2] ซึ่งมีหลายตัวแปรด้วยกันที่ส่งผลให้เครื่องจักรทำการผลิตชิ้นงานด้วยเวลาน้อยที่สุด โดยมีขนาดและความละเอียดผิวงานตามต้องการ โดยมีอายุการใช้งานคมมีดตัดที่ยาวนานในการตัดเฉือนผิวงานให้มีความละเอียดผิวตามที่ลูกค้ากำหนด เพื่อลดเวลาที่สูญเสียไปในการชดเชยโปรแกรมหรือเปลี่ยนมีดกัดใหม่

ในงานตัดเฉือนคุณภาพผิวงานเป็นสิ่งที่ลูกค้าให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลให้คุณภาพผิวงานของชิ้นส่วนได้ตามค่าความละเอียดผิวที่ต้องการเกิดจากค่าพารามิเตอร์ของเครื่องมือตัด เช่น รัศมีมุมเครื่องมือ มุมองศาต่างๆ ของเครื่องมือ และพารามิเตอร์ในการตัดเฉือน เช่น อัตราป้อน ความเร็วตัด ความลึกในการตัดเฉือน เป็นต้น [3] อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรและเครื่องมือกลต่างๆ จะพบว่ากระบวนการตัดเฉือน ด้วยเครื่องกัดเป็นเครื่องจักรที่มีความสำคัญมาก จากการประยุกต์ใช้ในงานกัดพบว่าค่าพารามิเตอร์ในการตัดเฉือน [4] ได้แก่ อุณหภูมิการกัด ความเร็วตัด อัตราการป้อน ทิศทางการควบคุมการกัด และตัวแปรต่างๆ ที่เลือกใช้มีผลต่อข้อจำกัดอายุการใช้งานของมีดกัด ซึ่งในกระบวนการกัดของมีดกัดที่ไม่ใช้สารหล่อเย็น [5] จะส่งผลดีโดยจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่จะส่งผลต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นของมีดกัดและแรงเสียดทานในการกัด ตัวแปรต่างๆ เหล่านี้การที่จะทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำและได้คุณภาพผิวผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ซึ่งรวมไปถึงความคุ้มค่าของการใช้งานของมีดกัดอย่างเต็มประสิทธิภาพ

จากการศึกษางานวิจัยพบว่าได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการตัดเฉือนวัสดุในงานตัด งานกลึง งานไส งานเจาะ และงานกัดอย่างกว้างขวาง ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาถึงความสำคัญในการใช้เครื่องมือในการตัดเฉือนขึ้นรูป [6] วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel S45C) ซึ่งเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอน 0.2–0.5% ในสภาพปกติที่ความแข็ง 210 HB มีความแข็งแรงและความเค้นต้านทานแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสามารถนำไปชุบแข็งได้ ทนทานการเสียดสีได้ดีเหมาะกับงานทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รางรถไฟ เฟือง ก้านสูบ โครงสร้างแม่พิมพ์ เป็นต้น ทำการตัดเฉือนด้วยมีดกัดเอ็นมิลล์โซลิดคาร์ไบด์ที่มีการเคลือบผิวชนิด TiAlN (Titanium Aluminum Nitride) จำนวน 4 คมตัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดและความเรียบผิวในการกัดเหล็กกล้าคาร์บอน (S45C) ด้วยมีดกัดเอ็นมิลล์เคลือบไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์รุ่น YS354−120 ซึ่งจะสามารถทราบถึงอายุการใช้งานมีดกัด ความเรียบผิวงาน การลดเวลาในกระบวนการผลิต การยืดอายุการใช้งานของเครื่องมืออุปกรณ์ ซึ่งสามารถคำนวณหาต้นทุนการจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือได้อย่างถูกต้อง สามารถเป็นแนวทางให้กับอุตสาหกรรมและองค์กรต่างๆ สถานศึกษา โดยทั่วไปที่จะได้นำข้อมูลพื้นฐานไปปรับใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในกระบวนการผลิตด้วยเครื่องจักรกล

2. วิธีการวิจัย

2.1 ศึกษาสภาพปัญหากระบวนการตัดเฉือนชนิดแบบ

การกัดผิวข้าง (Profile) ทำการศึกษาค่าของความหยาบละเอียดผิวงานหลังผ่านกระบวนการการตัดเฉือน โดยกำหนดเวลาการตรวจสอบผิวงานภายใต้การตัดเฉือนทุกๆ 10 นาที

2.2 สำรวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทำการศึกษาและหาข้อมูลงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการกัดด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติซีเอ็นซี ค่าพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนของมีดกัด (Tialn) เพื่อให้ทราบถึงพารามิเตอร์ควบคุมในกระบวนการกัด ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับชิ้นงานที่ใช้ในการดำเนินงานเครื่องมือวัดความหยาบผิวงาน (Surface Roughness Tester) และการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) เพื่อทำการออกแบบการทดลองได้อย่างเหมาะสม [7]

2.3 ศึกษากระบวนการทำงานและพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนที่ต้องควบคุมการศึกษากระบวนการทำงานของกระบวนการกัดและพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนที่ต้องควบคุมในกระบวนการกัดชนิดแบบกัดผิวข้างโดยใช้ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที อัตราการป้อน 517 มม./นาที และความลึกในการตัดเฉือน 5 มม. ซึ่งกำหนดจากมาตรฐานของมีดกัดเอ็นมิลล์ YS354−120 จำนวน 4 คมตัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม.

2.3.1 การกำหนดค่าผลลัพธ์การทดลองงานวิจัยได้จากการตรวจสอบค่าความหยาบผิว Surface Roughness ไม่เกิน (R_a) ≤ 1.6 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นมาตรฐานค่าความหยาบละเอียดงานกัด [8] โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวงาน หากค่าที่วัดได้มากกว่า 1.6 ไมโครเมตร แสดงว่ามีดกัดหมดอายุการใช้งานให้เก็บค่าเวลาที่ตัดเฉือนเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

2.3.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการตัดเฉือนที่ควบคุมในกระบวนการกัดรูปแบบชนิดกัดผิวข้างเป็นการกัดเนื้องานในลักษณะเส้นตรงทีละแถวตามชั้นความลึกของแกน Z ดังนี้

น้ำหล่อเย็น (Coolant) [9] น้ำหล่อเย็นเป็นชื่อเรียกกลุ่มของเหลว ส่วนมากเป็นพวกน้ำมันตัดหรือน้ำมันสบู่ที่ใช้ในการหล่อลื่นหรือเพื่อลดความร้อนและการเสียดสี โดยน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำมันตัดกลึงชนิดสังเคราะห์ 100 เปอร์เซ็นต์ รุ่น Shell Macron 401 F22

ระยะการป้อน (Overlap) คือความกว้างที่ต้องการตัดเฉือนเนื้อโลหะออกที่ระยะ 2 และ 4 มม.

ทิศทางควบคุมการกัด (Cut Direction) เป็นการกำหนดทิศทางควบคุมการกัด จะกำหนดตามการหมุนของมีดตัดในการเคลื่อนที่เข้าไปกัดชิ้นงานโดยปกติจะมีการเคลื่อนที่ชิ้นงาน (cw) มี 2 รูปแบบที่กำหนด คือ

1) กัดทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่แบบ Climb Milling เป็นการหมุนของมีดตัดจะมีทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของการป้อนชิ้นงาน

2) กัดทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ Conventional Milling การหมุนของมีดตัดจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของการป้อนชิ้นงาน

2.4 การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ [7]

เพื่อศึกษากระบวนการกัดที่มีประเภทการกัดชนิดแบบกัดผิวข้าง ซึ่งใช้ในกระบวนการกัดของเครื่องกัดอัตโนมัติ โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 3 ประเภท ที่มีผลต่อการสึกหรอของมีดกัด โดยกำหนดให้การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ที่มีผลต่อการสึกหรอของมีดกัด โดยกำหนดให้การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ .05 ดังตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์และระดับของพารามิเตอร์ที่นำมาทำการศึกษา และตารางที่ 2 แสดงระดับพารามิเตอร์ที่กำหนดและวิธีการเก็บข้อมูลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์และระดับของพารามิเตอร์ที่นำมาศึกษา

พารามิเตอร์	ระดับปัจจัย		หน่วย
	1	**2**	MM
ระดับการป้อน (Ovarisp)	2	4	
น้ำหล่อเย็น (Coolant)	Open	Off	
ทิศทางควบคุมการกัด (Cut Direction)	Climb	Conventional	

ตารางที่ 2 ระดับพารามิเตอร์ที่กำหนดและการเก็บข้อมูลการทดลอง

ทิศทางการควบคุมการกัด (Cut Direction)	น้ำหล่อเย็น (Coolart)	ระยะการป้อน (Overiap) (MM)	(Tool life1) (hour)	(Tool life2) (hour)	(life3) (hour)
Climb	Off	2	TL1	TL2	TL3
Convertion	Off	2	TL4	TL5	TL6
Climb	Open	2	TL7	TL8	TL9
Convertion	Off	2	TL10	TL11	TL12
Climb	Open	4	TL13	TL14	TL15
Convertion	Open	4	TL16	TL17	TL18
Climb	Open	4	TL19	TL20	TL21
Convertion	Open	4	TL22	TL23	TL24

2.5 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ที่ระดับนัยสำคัญ .05

$SS_A = [a–(1)+ab–b+ac–c+abc–bc]^2/8n$

$SS_B = [b+ab+bc+abc–(1)–a–c–ac]^2/8n$

$SS_C = [c+ac+bc+abc–(1)–a–b–ab]^2/8n$

$SS_{AB} = [ab–a–b+(1)+abc–bc–ac+c]^2/8n$

$SS_{AC} = [(1)–a+b–ab–c+ac–bc+abc]^2/8n$

$SS_{BC} = [(1)+a–b–ab–c–ac+bc+abc]^2/8n$

$SS_{ABC} = [abc–bc–ac+c–ab+b+a–(1)]^2/8n$

2.6 แสดงผลการตรวจสอบโดยสร้างกราฟจากโปรแกรมมินิแทบ (Minitab) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและวิเคราะห์ผลเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการทดลองในการตัดเฉือนชิ้นงาน

3. ผลการทดลอง

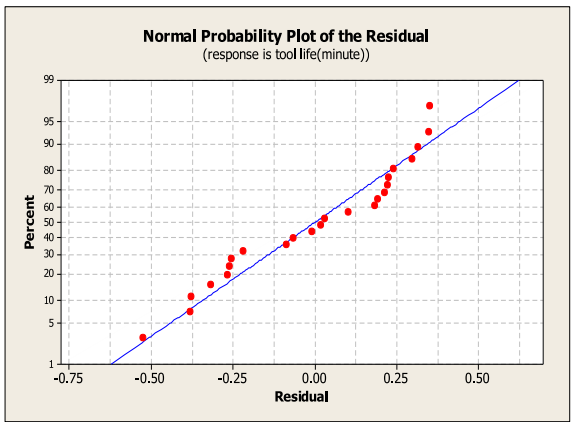
การทดลองการตัดเฉือนชิ้นงานโดยใช้มีดกัดเอ็นมิลล์โซลิดคาร์ไบด์ที่มีการเคลือบผิวชนิดไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์จำนวน 4 คมตัด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม.

ผลจากการทดลองการกัดเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (S45C) ด้วยมีดกัด ซึ่งกำหนดค่าความเรียบผิวงานไม่เกิน (R_a) ≤ 1.6 ไมโครเมตร จากมาตรฐานความเรียบผิวงานกัด ใช้ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที อัตราการป้อน 517 มม./นาที และความลึกในการตัดเฉือน 5 มิลลิเมตร ซึ่งได้กำหนดตัวแปร ทิศทาง การควบคุมการกัด การปิดเปิด น้ำหล่อเย็น ระยะการป้อน

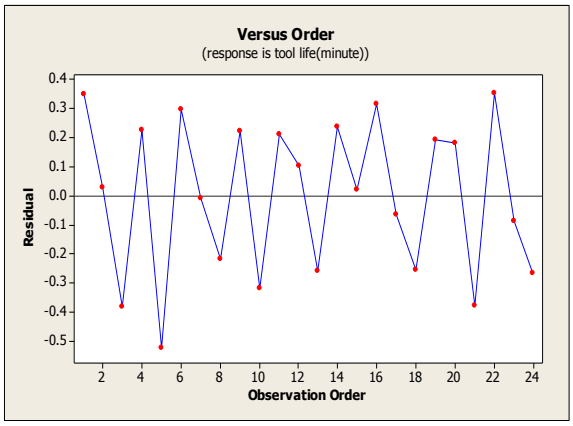
1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลการทดลองโดยการใช้การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยพิจารณาจากรูปที่ 1 และรูปที่ 2 พบว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง การตรวจสอบข้อสมมติฐานด้านการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล ผลที่ได้จากการทดลองจะกระทำได้โดยใช้การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง

จากการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลในการทดลอง ซึ่งแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นต่อไป

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของอายุการใช้งานของมีดกัดสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับโดยใช้โปรแกรมทางสถิติมินิแท็ป ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดค่านัยสำคัญเท่ากับ .05 ($\alpha = .05$) ดังตารางที่ 3



รูปที่ 1 การกระจายแบบปกติของค่า Residuals



รูปที่ 2 การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) เทียบกับ Observation Order

ตารางที่ 3 ตาราง ANOVA โดยโปรแกรมมินิแทบ (Minitab)

Source of Variation	Sum of Square	df.	Mean Square	F_0	P−Value
A	SS_A	a−1	$MS_A=SS_A/a-1$	MS_A/MA_E	P−Value<α
B	SSa	c−1	$MS_B=SS_B/c-1$	MS_B/MS_E	P−Balue<α
C	SS_C	b−1	$MS_C=SS_C/b-1$	MS_C/MS_E	P−Balue<α
AB	SS_{AB}	(a−1)×(b−1)	$MS_{AB}=SS_{AB}/ a-1)\times b-1)$	MS_{AB}/MS_E	P−Value<α
AC	SS^{AC}	(a−1)×(c−1)	$MS_{AC}=SS_{AC}/ (a-1)\times c-1)$	MS_{AC}/MS_E	P−Value<α
BC	SSac	(b−1)×(c−1)	$MS_{BC}=SS_{ac}/1)\times(c-1)$	$b- MS_{BC}/MC_E$	P−Value<α
ABC	SS_{ABC}	(a−1×(b−1)×(c−1)	$MS_{ABC}=SS_{ABC}/(a-1)\times(b-1)x(c-1)$	MS_{ABC}/MS_E	P−Value<α
Error	SS_E	$df_{total}-\sum^{df}$	$MS_E=SS_E/df_{total}-\sum^{df}$		
Total	SSTotal	(a×b×c×n)−1			

ตารางที่ 4 อายุการใช้งานของมีดกัดจากการทดลอง

ทิศทางการควบคุมการกัด	น้ำหล่อเย็น	ระยะการป้อน (มม.)	เวลาครั้งที่ 1 นาที	ความเร็วผิวเรียบ Ra	เวลาครั้งที่ 2 นาที	ความเร็วผิวเรียบ Ra	เวลาครั้งที่ 3 นาที	ความเร็วผิวเรียบ Ra
งานกัดตาม Cimb	ปิด	2	100	1.601	100	1.599	100	1.610
งานกัดทวน Conventional	ปิด	2	20	1.590	20	1.598	20	1.610
งานกัดตาม Cimb	เปิด	2	450	1.61	450	1.66	450	1.651
งานกัดทวน Conventional	เปิด	2	30	1.602	30	1.588	30	1.590
งานกัดตาม Cimb	ปิด	2	160	1.597	180	1.605	160	1.582
งานกัดทวน Conventional	ปิด	2	40	1.62	4	1.601	40	1.595
งานกัดตาม Cimb	เปิด	2	240	1.603	240	1.590	240	1.594
งานกัดทวน Conventional	เปิด	4	30	1.598	30	1.596	30	1.610

จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าอายุการใช้งานของมีดกัดโดยใช้โปรแกรมทางสถิติพบว่าลักษณะการเดินกัดชิ้นงาน ระยะการป้อน และรูปแบบการระบายความร้อนมีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16 พบว่าให้ค่า $R^2 = 100\%$ และค่า $R^2 = 100\%$ จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดี ดังตารางที่ 5

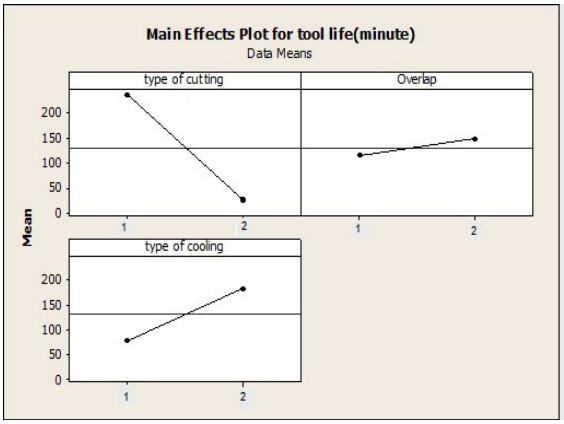
ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเชิง

Analysis of variance for too life(minute)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj Ms	F	P
Main Effects	3	337366	337366	112455	1093923.82	0.000
type of cutting	1	265201	265201	265201	2579775.69	0.000
Overlap	1	6386	6386	6386	62123.97	0.000
type of cooling	1	65779	65779	65779	639871.81	0.000
2-Way Interactions	3	115532	115532	38511	374618.31	0.000
type of cutting*Overlap	1	10399	10399	10399	101159.28	0.000
type of cutting*type of cooling	1	72264	72264	72264	702955.16	0.000
Overlap*type of cooling	1	32869	32869	32869	319740.48	0.000
3-Way Interactions	1	22140	22140	22140	215367.02	0.000
type of cutting*Overlap*type of cooling	1	22140	22140	22140	215367.02	0.000
Residual Error	16	2	2	0		
Pure Error	16	2	2	0		
Total	23	475040				
S = 0.320624	R-Sq = 100.00%			R-Sq(adj) = 100.00%		

โดยกำหนดให้ P−Value > .05 จะยอมรับ H_o ที่ 95% และถ้า P−Value < .05 จะปฏิเสธ H_o ยอมรับ H_1 ที่ 95% ของปัจจัยหลักทั้งทิศทางควบคุมการกัด น้ำหล่อเย็น และระยะการป้อน (กำหนด $\alpha = .05$) จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าทิศทางควบคุมการกัด การเปิดปิดน้ำหล่อเย็น และระยะการป้อน มีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญ

ค่า P−Value ของปัจจัยร่วมระหว่างทิศทางควบคุมการกัดกับการเปิดปิดน้ำหล่อเย็น มีค่าเท่ากับ $0.000 < \alpha$ (กำหนด $\alpha = .05$) จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยร่วมระหว่างทิศทางควบคุมการกัดกับการเปิดปิดน้ำหล่อเย็นมีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญ

ค่า P−Value ของปัจจัยร่วมระหว่างทิศทางควบคุมการกัดกับระยะการป้อน มีค่าเท่ากับ $0.00 < \alpha$ (กำหนด $\alpha = .05$) จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยร่วมระหว่างทิศทางควบคุมการกัดกับระยะการป้อน มีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญ



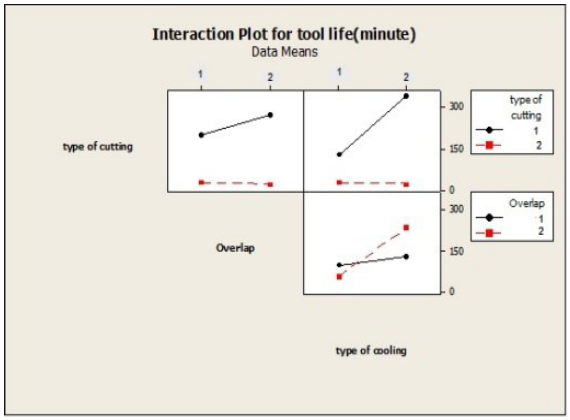
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์จากอิทธิพลหลักจาก 3 ปัจจัย

ค่า P−Value ของปัจจัยร่วมระหว่างการเปิดปิดน้ำหล่อเย็นกับระยะการป้อน มีค่าเท่ากับ $0.000 > \alpha$ (กำหนด $\alpha = .05$) จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยร่วมระหว่างการเปิดปิดน้ำหล่อเย็นกับระยะการป้อน มีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญ

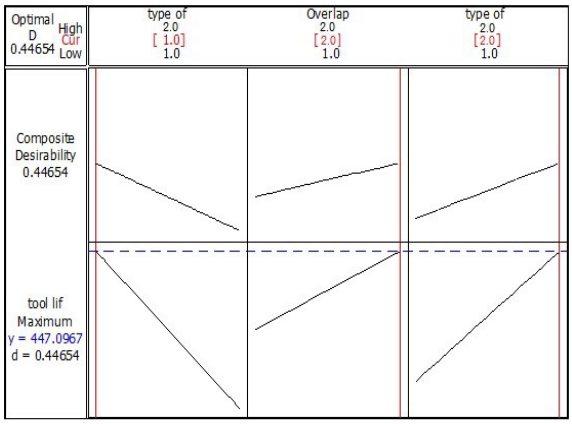
เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักจาก 3 ปัจจัย ดังรูปที่ 3 พบว่าปัจจัยลักษณะการเดินกัดชิ้นงานมีลักษณะเส้นกราฟชันลง หมายความว่าการเดินกัดทวน (Climb) (Type of Cutting 1) ทำให้อายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่าการเดินกัดตาม (Conventional) (Type of Cutting 2) ปัจจัยรูปแบบการระบายความร้อนมีลักษณะกราฟชันขึ้น หมายความว่าการเปิดน้ำ (Type of Cooling 2) ทำให้อายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่าการปิดน้ำ (Type of Cooling 1) ปัจจัยระยะการป้อนมีลักษณะเส้นกราฟชันขึ้น หมายความว่าที่ระยะการป้อน 2 มิลลิเมตร (Overlap 2) ทำให้อายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่าระยะการป้อน 4 มิลลิเมตร (Overlap 1)

จากรูปที่ 4 พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยลักษณะการเดินกัดชิ้นงานกับระยะการป้อน มีผลต่ออายุต่อการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งลักษณะการเดินกัดชิ้นงานแบบงานกัดทวนและมีระยะการป้อนเท่ากับ 2 มิลลิเมตร จะทำให้อายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่าลักษณะการเดินกัดชิ้นงานและระยะการป้อนแบบอื่นๆ

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยลักษณะการเดินกัดชิ้นงาน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัย



รูปที่ 5 กราฟแสดงผลตอบสนองของปัจจัยที่เหมาะสม

กับรูปแบบการระบายความร้อนมีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งลักษณะการเดินกัดชิ้นงานแบบงานกัดทวนและรูปแบบการระบายความร้อนแบบเปิดน้ำ จะทำให้อายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่าลักษณะการเดินกัดชิ้นงานและรูปแบบการระบายความร้อนแบบอื่นๆ

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยระยะการป้อนกับรูปแบบการระบายความร้อนมีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งระยะการป้อนที่ 2 มิลลิเมตร กับรูปแบบการระบายความร้อนแบบเปิดน้ำ จะทำให้อายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่าระยะการป้อนกับรูปแบบการระบายความร้อนแบบอื่นๆ

3. การทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อายุการใช้งานของมีดกัดที่มากที่สุดโดยใช้โปรแกรม Minitab เลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในการวิเคราะห์ข้อมูล ปัจจัยที่ได้พิจารณาประกอบด้วยระยะการป้อน ทิศทางควบคุมการกัด และน้ำหล่อเย็นดังรูปที่ 5

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ จากข้อมูลในการทดลองครั้งนี้ ตัวแปรอิสระไม่ใช่ตัวแปรต่อเนื่องแต่เป็นตัวแปรบ่งชี้ (Indicator Variables) ทั้งสามตัวแปร จึงใช้วิธีการแปลงค่าตัวแปร (Coded Data) ตามตารางที่ 6 โดยการสร้างตัวแปรอิสระใหม่ขึ้นมาแทนที่โดยใช้การแปลงค่าในรูป 0 และ 1 โดยจำนวนตัวแปรอิสระที่สร้างขึ้นจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนระดับหักด้วย 1 คือ ทิศทางควบคุมการกัดมี 2 ลักษณะ ใช้ตัวแปรอิสระ

ตารางที่ 6 ตารางแปลงค่าตัวแปร

X1	X2	X3	Y minute	X1	X2	X3	Y minute
0	0	0	158.74	1	0	0	39.01
0	0	0	158.42	1	0	0	38.26
0	0	0	158.01	1	0	0	39.08
0	0	1	237.82	1	0	1	20.79
0	0	1	238.32	1	0	1	20.41
0	0	1	238.1	1	0	1	20.22
0	1	0	97.88	1	1	0	16.19
0	1	0	97.67	1	1	0	16.72
0	1	0	98.11	1	1	0	16.61
0	1	1	447.29	1	1	1	25.09
0	1	1	447.28	1	1	1	24.65
0	1	1	446.72	1	1	1	24.47

เพียงตัวแปรเดียวแทนได้นั่นคือ

$$X_1 \begin{cases} 0 \text{ แทนงานตาม (Cimb)} \\ 1 \text{ แทนงานกัดทวน (Conventional)} \end{cases}$$

ระยะการป้อนมี 2 ระยะ ใช้ตัวแปรอิสระเพียงตัวแปรเดียวได้นั่นคือ

$$X_2 \begin{cases} 0 \text{ แทน 4 มิลลิเมตร} \\ 1 \text{ แทน 2 มิลลิเมตร} \end{cases}$$

น้ำหล่อเย็นมี 2 ลักษณะ ใช้ตัวแปรอิสระเพียงตัวแปรเดียวได้นั่นคือ

Regression Analysis: Y versus X1, X2, X3

The regression equation is
Y = 167 - 210 X1 + 32.6 X2 + 105 X3

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	166.70	33.87	4.92	0.000
X1	-210.24	33.87	-6.21	0.000
X2	32.63	33.87	0.96	0.347
X3	104.70	33.87	3.09	0.006

S = 82.9680 R-Sq = 71.0% R-Sq(adj) = 66.7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	337366	112455	16.34	0.000
Residual Error	20	137674	6884		
Total	23	475040			

Source	DF	Seq SS
X1	1	265201
X2	1	6386
X3	1	65779

รูปที่ 6 ผลลัพธ์การวิเคราะห์การถดถอยสมการกรณีที่ไม่มีผลกระทบร่วม

โดยใช้โปรแกรม Minitab เลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer มาวิเคราะห์ผลการทดลองดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 สมการถดถอยกรณีไม่มีผลกระทบร่วม ดังนั้นตัวแบบ $E(Y) = \beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_3 X_3$

$Y = 167-210\ X1+32.6\ X2+105\ X3$

ได้ผลลัพธ์เป็นตาราง ANOVA และทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ β's ดังรูปที่ 6

X_3 { 0 แทนปิดน้ำหล่อเย็น
1 แทนเปิดน้ำหล่อเย็น

จากรูปที่ 6 ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab พบว่าได้ค่า $R^2 = 71.0\%$ และค่า $R^2_{adj} = 66.7\%$ จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีจากค่า P–Value ของ Regression มีค่าเท่ากับ $0.00 < \alpha$ (กำหนด $\alpha = .05$) จึงสามารถสร้างสมการถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญ

3.2 สมการถดถอยกรณีที่มีผลกระทบร่วม ดังนั้นตัวแบบ

Regression Analysis: Y versus X1, X2, X3, X1X2, X1X3, X2X3

The regression equation is
Y = 128 - 58.9 X1 + 0.2 X2 + 140 X3 - 83.3 X1X2 - 219 X1X3 + 148 X2X3

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	128.02	19.49	6.57	0.000
X1	-58.86	25.52	-2.31	0.034
X2	0.24	25.52	0.01	0.993
X3	140.44	25.52	5.50	0.000
X1X2	-83.26	29.47	-2.83	0.012
X1X3	-219.49	29.47	-7.45	0.000
X2X3	148.03	29.47	5.02	0.000

S = 36.0892 R-Sq = 95.3% R-Sq(adj) = 93.7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	6	452898	75483	57.96	0.000
Residual Error	17	22141	1302		
Total	23	475040			

Source	DF	Seq SS
X1	1	265201
X2	1	6386
X3	1	65779
X1X2	1	10399
X1X3	1	72264
X2X3	1	32869

รูปที่ 7 ผลลัพธ์การวิเคราะห์การถดถอยสมการกรณีที่มีผลกระทบร่วม

$$E(Y) = \beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_3 X_3+\beta_4 X_1 X_2+\beta_5 X_1 X_3+\beta_5 X_2X_3$$

$$Y = 128-58.9\ X1+0.2\ X2+140\ X3-83.3\ X1X2-219\ X1X3+148\ X2X3$$

ได้ผลลัพธ์เป็นตาราง ANOVA และทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ β's ดังรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 ทำการวิเคราะห์ พบว่าได้ค่า $R^2 = 95.3\%$ และค่า $R^2_{adj} = 93.7\%$ จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีจากค่า P–Value ของ Regression มีค่าเท่ากับ $0.000 < \alpha$ (กำหนด $\alpha = .05$) จึงสามารถสร้างสมการถดถอยได้อย่างมีนัยสำคัญ

การยืนยันผลการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้อายุของมีดกัดมากที่สุดคือ เลือกใช้ทิศทางควบคุมการกัดแบบงานกัดตาม เปิดน้ำหล่อเย็น และระยะการป้อนที่ 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจะได้

$X1 = 0\ \ X2 = 1\ \ X3 = 1$

แทนค่า X1 = 0, X2 = 1, X3 = 1 ในสมการถดถอยกรณีที่มีผลกระทบร่วม

$$Y = 128 - 58.9\,X1 + 0.2\,X2 + 140\,X3 - 83.3\,X1X2 - 219\,X1X3 + 148\,X2X3$$

$$Y = 128 - 58.9(0) + 0.2\,(1) + 140(1) - 83.3(0*1) - 219\,(0*1) + 148(1*1)$$

$$Y = 416.2$$

จากตารางที่ 4 ตารางแสดงผลอายุการใช้งานของมีดกัดที่ระดับของพารามิเตอร์ที่ทิศทางควบคุมการกัดแบบงานกัดทวน เปิดน้ำหล่อเย็น และระยะการป้อนที่ 2 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 416.2 นาที ใกล้เคียงกับการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลอายุการใช้งานของมีดกัด

ทิศทางควบคุมการกัด	น้ำหล่อเย็น	ระยะการป้อน (มม.)	เวลาครั้งที่ 1 (นาที)	เวลาครั้งที่ 2 (นาที)	เวลาครั้งที่ 3 (นาที)
งานกัดตาม Climb	เปิด	2	447.29	447.28	446.72

4. อภิปรายผลและสรุป

การศึกษาปัจจัยในการกัดชิ้นงานด้วยมีดกัดเอ็นมิลล์โซลิดคาร์ไบด์ที่มีการเคลือบผิวชนิดไทเทเนียมอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่มีผลต่ออายุการใช้งานของคมตัด โดยทำการทดสอบการตัดเฉือนวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (S45C) ที่มีค่าความแข็ง 210 HB ทำการวิเคราะห์ส่วนตกค้างซึ่งได้ผลวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง โดยมีการแจกแจงแบบปกติ สัดส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) และข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

เพื่อทำการศึกษาถึงวิธีการกัดชิ้นงานโดยมีดกัดเอ็นมิลล์ โดยพิจารณาจากทิศทางการเดินกัดของมีดกับชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลถึงความหยาบของผิวงานที่กำหนดไม่เกิน 1.6 ไมโครเมตร และมีอายุการใช้งานของมีดกัดที่สูงที่สุด ซึ่งจะทำให้ต้นทุนการตัดเฉือนในส่วนของค่าใช้จ่ายโรงงานด้านการลงทุนเครื่องมือมีแนวโน้มที่ลดลง โดยทำการศึกษาพิจารณาควบคู่กับการใช้น้ำหล่อเย็นและค่าระยะการป้อนตัดเฉือน

ผลการศึกษาวิจัยสภาวะที่เหมาะสมของผลการทดลอง ทิศทางควบคุมการกัด น้ำหล่อเย็น และระยะการป้อนมีผลต่ออายุการใช้งานของมีดกัดอย่างมีนัยสำคัญ อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยทิศทางควบคุมการกัดกับน้ำหล่อเย็นมีผลต่ออายุต่อการใช้งานของมีดกัด ซึ่งทิศทางควบคุมการกัดแบบงานกัดตามและเปิดน้ำหล่อเย็นจะทำให้อายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่าทิศทางควบคุมการกัดแบบงานกัดตามและปิดน้ำหล่อเย็น อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยทิศทางควบคุมการกัดกับระยะการป้อนมีผลต่ออายุต่อการใช้งานของมีดกัด ซึ่งทิศทางควบคุมการกัดแบบงานกัดตาม และระยะการป้อน 2 มิลลิเมตร จะทำให้อายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่าทิศทางควบคุมการกัดแบบงานกัดทวนและระยะการป้อน 4 มิลลิเมตร อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยระยะการป้อนกับน้ำหล่อเย็นมีผลต่ออายุต่อการใช้งานของมีดกัด ซึ่งระยะการป้อน 2 มิลลิเมตร และเปิดน้ำหล่อเย็นจะทำให้อายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่าระยะการป้อน 4 มิลลิเมตร และปิดน้ำหล่อเย็น และเมื่อทำการพิจารณาที่การกัดตามเปิดน้ำหล่อเย็น ระยะการป้อนกัด 4 มิลลิเมตร จะทำให้ได้อัตราการขจัดเศษเป็น 2 เท่าของการกัดแบบ 2 มิลลิเมตร แต่อายุของมีดจะน้อยกว่าเป็น 0.5 เท่า ทำให้พิจารณาได้ว่าปัจจัยที่สำคัญคือการกำหนดทิศทางควบคุมการกัดแบบตามพร้อมกับเปิดน้ำหล่อเย็นจะทำให้ต้นทุนในการตัดเฉือนที่เกิดจากอายุการใช้งานมีดกัดมีแนวโน้มที่ลดลง

ซึ่งทำให้สามารถสร้างสมการถดถอยได้ดังนี้

$$Y = 128 - 58.9X1 + 0.2X2 + 140X3 - 83.3X1X2 - 219X1X3 + 148X2X3$$

5. กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาที่ดี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่กรุณาให้แนวคิดคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวก

ตลอดจนแก้ปัญหาต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] H. Gokkaya and M. Nalbant, "The effects of cutting tool coating on the surface roughness of aisi 1015 steel depending on cutting parameters," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences,* vol.30, pp. 307–316, 2006.

[2] S. Thamizhmani and S. Hasan, "Analyses of roughness forces and wear in turing gray cast iron," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 17, pp. 401–405, 2003.

[3] T. Özel and Y. Karpat, "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, pp.467–479, April 2005.

[4] S.C. Jonathan Lin, *Computer Numerical Control from Programming to networking*. Dclmcr Publishers, 1994, pp.125–154.

[5] P. Junlabuddee and C. Saikaew, "A study on factor affecting surface roughness in turning process of AISI 316L stainless steel by Shainin design of experiment method," *Khon Kaen University Engineering Journal*, vol. 42, no. 1, pp. 71–81, January–March 2015 (in Thai).

[6] F. Water, *Fundamentals of Manufacturing for Engineers.* UCL Press Limited 1996, pp. 235–237.

[7] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiment.* The United States of America: John Wiley & Sons, 2005.

[8] B. Sornil and S. Watanasriyakul, *Tabellenbuch Metall.* KMUTNB. Press Limited, 2013 (in Thai).

[9] O. Çakīr, A. Yardimeden, T. Ozben, and E. Kilickap, "Selection of cutting fluids in machining processes," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 99–102, December 2007.

.