

การพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพในอุตสาหกรรมการกัดขึ้นรูป แม่พิมพ์ด้วยการออกแบบการทดลอง

Quality Development and Improvement in Mold Making Industry with Designed Experiments

ปรเมศวร์ เบาวรณ (Paramet Baowan)^{1*} ดร.ชาญณรงค์ สายแก้ว (Dr.Charnnarong Saikaew)**

บทคัดย่อ

กระบวนการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์จะมีปัญหาคุณภาพของค่าความหยาบผิวในขั้นตอนการกัดละเอียดที่ต่างกันเมื่อเครื่องมือตัดถูกใช้งานผ่านไปตามระยะเวลาการใช้งานในแต่ละครั้งเป็นผลทำให้คุณภาพของผิวแม่พิมพ์ไม่ได้คุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการ อย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการนำหลักการออกแบบการทดลองและวิธีพื้นผิวผลตอบสนองมาช่วยเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ในแต่ละครั้ง จากการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบพหุคูณของระดับสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยจะมีค่าที่ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยไม่แตกต่างกันบางคู่ ในขณะที่สภาวะที่ไม่เหมาะสมของปัจจัยค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจะแตกต่างกันทุกคู่ ผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพผิวในการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์สามารถทำได้ด้วยการใช้สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์แต่ละครั้ง

ABSTRACT

Milling operation in precision mold making had a quality problem of surface finish when the cutting tool was used for multiple times of milling operations. This problem affected the customer satisfaction. However, the problem was resolved by employing designed experiments and response surface methodology to determine the optimal operating conditions for multiple-time used tool of milling operations. The results showed that surface roughness of the mold in each milling operation was not significantly different when the mold was machined at the optimal operating conditions of the significant process factors based on multiple comparisons of the factor levels. On the other hand, there were significant differences in all multiple comparisons when the mold was machined at non-optimal operating condition of the process factors. This implied that the surface quality improvement of the mold was achieved if the cutting tool was used at the optimal operating conditions for multiple-time used tool of milling operations.

คำสำคัญ : เครื่องกัดอัตโนมัติ สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย ดอกกัดไฮสปีดบอลเอ็นมิล

Key Words : Computer numerical control milling machine, Optimal operating condition of process factors, High-speed ball endmill

¹ Corresponding author: paramet_ie@hotmail.com

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

อุตสาหกรรมแม่พิมพ์เป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องทางด้านเทคโนโลยีการผลิตและการพัฒนาด้านบุคลากรของอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ทั้งการผลิตผลิตภัณฑ์โลหะ ผลิตภัณฑ์พลาสติก ผลิตภัณฑ์ยาง และอื่นๆ ซึ่งถือได้ว่าอุตสาหกรรมแม่พิมพ์เป็นอุตสาหกรรมที่มีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ

อุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้อย่างกว้างขวาง หนึ่งในเทคโนโลยีเหล่านั้นคือการกัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC milling machine) ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการวิจัยเพื่อการพัฒนางานขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติในหลายด้าน ความเจริญก้าวหน้าในเทคโนโลยีเหล่านี้จะช่วยให้โรงงานอุตสาหกรรมสามารถลดต้นทุนการผลิต ลดเวลาการทำงาน สามารถทำงานที่มีความซับซ้อน ชิ้นงานมีคุณภาพสูง [1]

กระบวนการกัดขึ้นรูป เป็นกระบวนการตัดเฉือนวัสดุอีกหนึ่งวิธีการที่นิยมใช้ในการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ในโรงงานอุตสาหกรรม [2, 3] หนึ่งในผลลัพธ์ที่สำคัญที่สุดของกระบวนการกัดขึ้นรูปวัสดุก็คือค่าความหยาบผิว [4] การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยการตัดเฉือนนั้นมีความจำเป็นอย่างมากในกระบวนการตัดเฉือนวัสดุ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง และยังทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้น [5] ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติได้แก่ความเร็วตัด ความลึกในการกัด อัตราป้อนกัด Step Over เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน อีกทั้งยังเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของชิ้นงาน ดังนั้น ถ้าสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยการตัดเฉือนที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของแม่พิมพ์อย่างมีนัยสำคัญ จะทำให้สามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายลงได้ [6] อย่างไรก็ตาม ปัญหาตรงที่การปรับตั้ง

ค่าปัจจัยในการทำงานของเครื่องจักรในการขึ้นรูปวัสดุ นั้นตั้งอยู่บนพื้นฐานของประสบการณ์และความรู้ของผู้เขียนโปรแกรมเป็นหลัก ซึ่งอาจเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมของปัจจัย [7] ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ความหยาบผิวงานไม่ได้ตามต้องการ อายุการใช้งานเครื่องมือตัดสั้น เป็นต้น ซึ่งเป็นปัญหาที่สถานประกอบการหลายแห่งกำลังเผชิญอยู่

จากการสอบถามข้อมูลกับวิศวกรที่มีหน้าที่รับผิดชอบควบคุมกระบวนการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์พบว่าค่าปัจจัยการตัดเฉือนที่บริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดแนะนำมาเมื่อมีการใช้งานเครื่องมือตัดกัดขึ้นรูปวัสดุในระยะเวลาที่ยาวนานทำให้ค่าความหยาบผิวไม่ได้คุณภาพผิวตามต้องการหรือเรียบไม่สม่ำเสมอเนื่องจากเครื่องมือตัดเกิดการสึกหรอไปตามอายุการใช้งานทำให้ค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยแปรเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด วิธีการแก้ไขปัญหของวิศวกรคือต้องเปลี่ยนเครื่องมือตัดทุกครั้งที่เห็นว่าค่าความหยาบผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งต้องใช้ประสบการณ์และความเชี่ยวชาญอย่างมากในการสังเกตทำให้เสียเวลาและสิ้นเปลืองเครื่องมือตัดจากโจทย์ปัญหานี้สามารถนำหลักการการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) ซึ่งเป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งในทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางโดยทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ และปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้นเป็นวิธีการที่เข้าใจง่ายและสามารถนำมาปฏิบัติได้จริงและวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology) ใช้หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการตัดเฉือนที่แปรเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด ในกระบวนการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์อย่างมีนัยสำคัญ เพื่อลดเวลา และความสิ้นเปลืองเครื่องมือตัดซึ่งเป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิต

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง

กัตต์อัตโนมัติมีหลากหลายวิธี เช่น Tzeng and Jean [8] ได้หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการกัดแบบ High-speed ของวัสดุ SKD 61 และ SKD 11 ด้วยวิธี Taguchi เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่มีหลายตัวแปรและแต่ละตัวแปรมีหลายระดับ เพราะจะสามารถลดจำนวนการทดลองลงได้แต่มีข้อบกพร่องในด้านผลการวิเคราะห์ Ozcelik *et al.* [9] ได้ศึกษาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่สุดในการกัดชิ้นรูปวัสดุ Inconel 718 ด้วยวิธี Artificial Neural Network (ANN) Oktem *et al.* [2] ได้ศึกษากระบวนการกัดชิ้นรูปวัสดุ AL7075-T6 ด้วยวิธี ANN และ Genetic Algorithm(GA) Jesuthanam *et al.* [10] ได้พัฒนาวิธีการ Neural Network (NNs)โดยนำมารวมกันกับวิธีการ GA และ Particle Swarm Optimization (PSO) ในการพยากรณ์ค่าความหยาบผิวและสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการกัดเหล็กเหนียว อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการหาสภาวะที่เหมาะสมและต้องทำการทดลองจำนวนมากทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการทดลองสูงทำให้ยากต่อการนำไปใช้งานจริง ต่างจากวิธีการออกแบบการทดลองที่ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้นำเข้ามาปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิตกันอย่างแพร่หลาย [11] ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการนำมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้จริงเพื่อแก้ไขปัญหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการผลิต เช่น Yang *et al.* [12] ใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการกัดชิ้นรูปวัสดุกราไฟต์บริสุทธิ์ ภายใต้สภาวะการกัดแบบไม่มีการหล่อเย็น อย่างไรก็ตามยังไม่ปรากฏเห็นการนำเอาหลักการออกแบบการทดลองมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพผิวของกระบวนการกัดชิ้นรูปแม่พิมพ์โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่แปรเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด

ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพในอุตสาหกรรมการกัดชิ้นรูปแม่พิมพ์ จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัดชิ้นรูปแม่พิมพ์ที่แปรเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองและวิธีพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญ

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. เครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุ

1.1 เครื่องจักร การปฏิบัติการกัดชิ้นรูปวัสดุแม่พิมพ์ในการวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องกัตต์อัตโนมัติยี่ห้อ MIKRON รุ่น VCE 750 ที่มี Spindle Speed สูงสุด 7500 RPM ดังรูปที่ 1 ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเครื่องกัตต์อัตโนมัติที่มีจำนวนมากในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ในระดับเล็กถึงระดับกลางเนื่องจากมีราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับเครื่องกัตต์อัตโนมัติแบบความเร็วรอบสูง (High Speed Machine) จะทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิต



รูปที่ 1 เครื่องกัตต์อัตโนมัติ MIKRON รุ่น VCE750

1.2 เครื่องมือวัดความหยาบผิว ความหยาบผิวเฉลี่ยจะวัดค่าด้วยเครื่อง Mitutoyo Surf test 3D ที่สอบเทียบด้วยแผ่นเทียบผิวมาตรฐาน Mitutoyo Ra 2.95 μm ดังรูปที่ 2

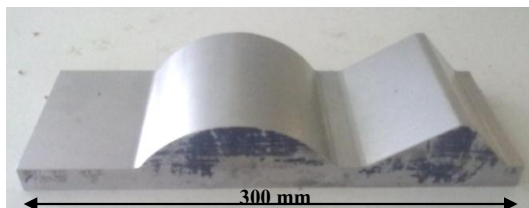
1.3 วัสดุชิ้นงานทดลอง วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กแม่พิมพ์ AISI P20 มีค่าความแข็ง 30 HRC ที่นิยมนำมาทำเป็นแม่พิมพ์ [13] ขนาด 100 x 50 x 300 มม. ที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 1 และมีรูปร่างดังรูปที่ 3 โดยออกแบบให้มีการตัดเฉือนหลายพื้นผิวได้แก่ ผิวตรง ผิวโค้ง ผิวเอียง 30° และ 45° เพื่อให้ใกล้เคียงกับลักษณะรูปร่างแม่พิมพ์ทั่วไป



รูปที่ 2 เครื่องมือวัดความหยาบผิว Mitutoyo Surf test 3D ที่สอบเทียบด้วยแผ่นเทียบผิวมาตรฐาน

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของวัสดุแม่พิมพ์

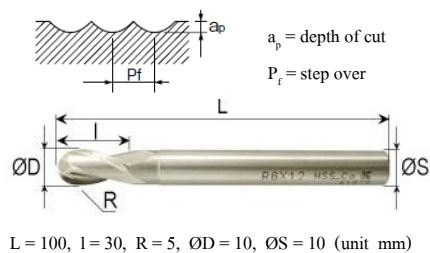
ส่วนผสมทางเคมี %wt	C	Mn	Cr	Mo
	0.40	1.5	1.9	0.2



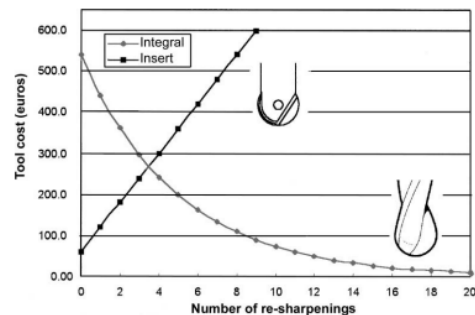
รูปที่ 3 รูปร่างชิ้นงานทดลอง

1.4 เครื่องมือตัด ใช้ดอกกัดไฮสปีดบอลเอ็นมิล (HSS Co8%) ดังรูปที่ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยี่ห้อ OSG เนื่องจากดอกกัดไฮสปีดไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ Spindle Speed สูง เหมาะกับเครื่องจักรที่ใช้ในการศึกษาและยังมีความคุ้มค่ากว่าการใช้เครื่องมือตัดที่มีลักษณะเป็นอินเลิร์ท

และมีการเคลือบซึ่งเครื่องมือตัดเหล่านี้จะต้องใช้ควบคู่กับเครื่องจักรรอบสูง (HSM) จึงจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นอีก อีกทั้งดอกกัดไฮสปีดยังสามารถนำกลับมาลับคมตัดเพื่อใช้ใหม่ได้อีก โดย Luis *et al.* [14] ได้นำเสนอการเปรียบเทียบต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่องมือตัดที่เป็นอินเลิร์ทกับเอ็นมิลไว้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 รูปร่างดอกกัดไฮสปีดบอลเอ็นมิล



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบต้นทุนเครื่องมือตัดระหว่างอินเลิร์ทกับเอ็นมิล

2. วิธีการวิจัย

2.1 การกำหนดปัญหา เริ่มจากการศึกษาปัญหาในการผลิตแม่พิมพ์จากงานวิจัยที่ผ่านมาและการสอบถามเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากผู้เชี่ยวชาญด้านการกัดชิ้นรูปแม่พิมพ์ในโรงงานผลิตแม่พิมพ์ พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยในกระบวนการกัดชิ้นรูปแม่พิมพ์ส่วนมากจะเป็นลักษณะที่กัดชิ้นรูปแล้วความหยาบผิวชิ้นงานไม่ได้คุณภาพตามต้องการ สาเหตุเกิดจากสภาวะการตัดเฉือนที่ไม่เหมาะสมของปัจจัย ความแข็งของวัสดุชิ้นงาน ชนิดของวัสดุเครื่องมือตัด เป็นต้น

2.2 การกำหนดปัจจัยและผลตอบสนอง การรวบรวมปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและคุณภาพของแม่พิมพ์ซึ่งได้ศึกษาค้นคว้ามาจากการวิจัยหลายเรื่องและการสอบถามข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญด้านการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ในโรงงานผลิตแม่พิมพ์ พบว่าปัจจัยหลักๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ ดังตารางที่ 2 และผลตอบสนองในการวิจัยครั้งนี้เลือกค่าความหยาบผิวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปัจจัยของกระบวนการกัดขึ้นรูปวัสดุแม่พิมพ์โดยตรง

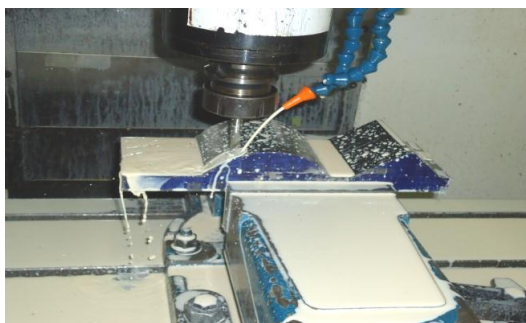
ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Parameter)	ระดับต่ำ(-1) (Low level)	ระดับสูง(+1) (High level)	หน่วย (Unit)
Spindle Speed (A)	2500	3500	RPM
Feed (B)	1200	1800	mm/min
Depth of Cut (C)	0.1	0.2	mm
Step Over (D)	0.1	0.2	mm

2.3 การออกแบบการทดลอง ในการศึกษาครั้งนี้มี 4 ปัจจัย ได้แก่ Spindle Speed, Feed, Depth of Cut และ Step Over ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จึงเลือกการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียล การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียล มีประโยชน์ในการวิเคราะห์ปัจจัยหลายๆ ตัวพร้อมกันเพื่อหาจำนวนปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียลยังมีประโยชน์ในการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear Model) ซึ่งจะได้ $2^4 = 16$ ในช่วงแรกซึ่งยังไม่รู้ความสัมพันธ์ของปัจจัยกับผลตอบสนองเป็นแบบเส้นโค้ง (Curvature) หรือไม่ ดังนั้นจะพิจารณา $2^4 - 1$ ขั้ว บวกกับตรงกลาง 4 ขั้ว รวมเป็น 20

2.4 การเตรียมการทดลอง เตรียมชิ้นงานทดลองให้มีขนาดรูปร่างตามแบบชิ้นงานที่ออกแบบไว้

โดยการกัดแบบหยาบ (Roughing Milling) หลังจากนั้นจับยึดชิ้นงานทดลองเข้ากับปากกานโต๊ะงานเครื่องกัดอัตโนมัติดังรูปที่ 6 แล้วสุ่มเลือกค่าตัวแปรที่ได้ออกแบบการทดลองไว้แล้วป้อนเข้าเครื่องกัดอัตโนมัติเพื่อกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดลองเพื่อวัดค่าความหยาบผิว



รูปที่ 6 การกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดลองด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ

2.5 การวัดค่าความหยาบผิว เมื่อกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดลองเสร็จแล้วให้ถอดชิ้นงานออกมาเพื่อวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่อง Mitutoyo Surf Test 3D โดยวัดพื้นผิวละ 3 จุด ทั้งหมดเป็น 12 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละจุด ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Mitutoyo Surf Test 3D

การวิจัยในครั้งนี้ได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของการกัดขึ้นรูป

ชิ้นงานวัสดุแม่พิมพ์ที่แปรเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกัดขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุแม่พิมพ์ จึงได้มีการนำเครื่องมือตัดที่ผ่านการกัดขึ้นรูปในครั้งที่ 1 มากัดขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิวซ้ำอีก 4 ครั้ง รวมทั้งหมดเป็น 5 ครั้ง

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลการทดลอง

เนื่องจากการวิจัยในครั้งนี้ได้มีการออกแบบรูปร่างชิ้นงานทดลองมีหลายสภาพผิวทำให้มีตำแหน่งในการวัดค่าความหยาบผิวหลายตำแหน่ง เป็นผลทำให้ข้อมูลที่ได้รับความเที่ยงเบน จึงได้นำค่าเที่ยงเบนมาตรฐานมาวิเคราะห์เป็นผลตอบสนองอีกตัวหนึ่งด้วย ซึ่งจะต้องมีค่าที่ต่ำที่สุด ดังแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 3 จากค่าเที่ยงเบนมาตรฐานที่ได้นั้นไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ เนื่องจากข้อมูลมีการแจกแจงที่ไม่เหมาะสม เพราะข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ได้จะต้องมีการแจกแจงที่เป็นปกติและเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นก่อนการนำข้อมูลค่าเที่ยงเบนมาตรฐานมาวิเคราะห์จะต้องใช้ฟังก์ชันล็อกการที่มช่วยแปลงข้อมูลก่อน (Bartlett, 1946)

2. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียล มีประโยชน์ในการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear Model) ในช่วงแรกซึ่งยังไม่รู้ว่า ความสัมพันธ์ของปัจจัยกับผลตอบสนองเป็นแบบเส้นโค้ง (Curvature) หรือไม่ จึงควรพิจารณา 2^4 1 ซ้ำ บวกกับตรงกลาง 4 ซ้ำ รวมเป็น 20 ชุด ในการทดลองเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลปรากฏว่าไม่เป็นเส้นโค้งโดยสังเกตจากค่า p-value ของ Curvature ในตารางที่ 4 มากกว่า 0.05 ($p\text{-value} > 0.05$) การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียลอย่างเดียวก็น่าเพียงพอที่จะให้สมการพื้นผิวผลตอบสนองที่เป็นตัวแทนที่แท้จริงได้ ดังนั้น จึงไม่ต้องเพิ่มจุดทดลองนอกเหนือจากแบบ 2^4 แฟคตอเรียล

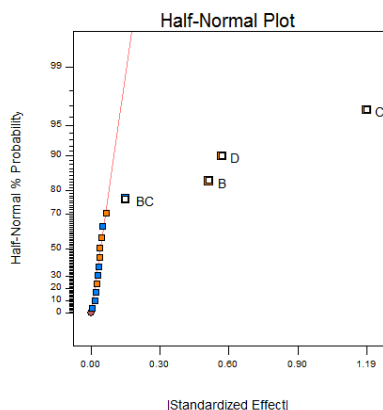
ตารางที่ 3 ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดลอง

Runs	Factors				Surface roughness (μm)					Standard deviation				
	Spindle speed	Feed	Depth of cut	Step over	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5
1	2500	1200	0.1	0.1	1.03	1.15	1.38	1.74	1.81	0.39	0.41	0.42	0.53	0.39
2	3500	1200	0.1	0.1	0.99	1.33	1.46	1.74	2.04	0.16	0.35	0.40	0.52	0.57
3	2500	1800	0.1	0.1	1.23	1.69	1.70	2.09	2.49	0.60	0.62	0.58	0.37	0.56
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
17	3000	1500	0.15	0.15	1.72	1.80	2.34	2.54	3.03	0.67	0.65	0.43	0.50	0.59
18	3000	1500	0.15	0.15	1.67	1.74	2.36	2.67	3.13	0.74	0.63	0.54	0.55	0.62
19	3000	1500	0.15	0.15	1.68	1.80	2.41	2.72	3.10	0.61	0.63	0.63	0.50	0.56
20	3000	1500	0.15	0.15	1.63	1.85	2.44	2.62	3.10	0.58	0.56	0.52	0.54	0.59

ตารางที่ 4 การตรวจสอบความสัมพันธ์ของผลตอบ
สนองกับปัจจัยของการเป็นเส้นโค้ง

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value
Model	2.9592	10	0.2959	12.84	0.0007
Curvature	0.0489	1	0.0489	2.12	0.1832
Residual	0.1843	8	0.0230		
Lack of Fit	0.1807	5	0.0361	29.97	0.0092
Pure Error	0.0036	3	0.0012		
Cor Total	3.1925	19			

2.1 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม จากผลการทดลองการกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดลอง สามารถวิเคราะห์หาปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวในการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์อย่างมีนัยสำคัญได้จากการสังเกตแผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลทั้งหมด ดังรูปที่ 8 แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณอิทธิพลทั้งหมดของการกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดลองที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวในการทดลองปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวในการกัดครั้งที่ 1 คือ Feed (B) และ Step over (D) ส่วนครั้งที่ 3-5 จะมีปัจจัย Depth of Cut (C) เพิ่มเข้ามามีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว และยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของ Feed(B) กับ Depth of Cut (C) และ Feed (B) กับ Step over (D)



รูปที่ 8 แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของอิทธิพลทั้งหมดของการทดลองครั้งที่ 5

นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของแผนการทดลองได้ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแผนการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ในการกัดขึ้นรูปชิ้นงานทดลองครั้งที่ 5

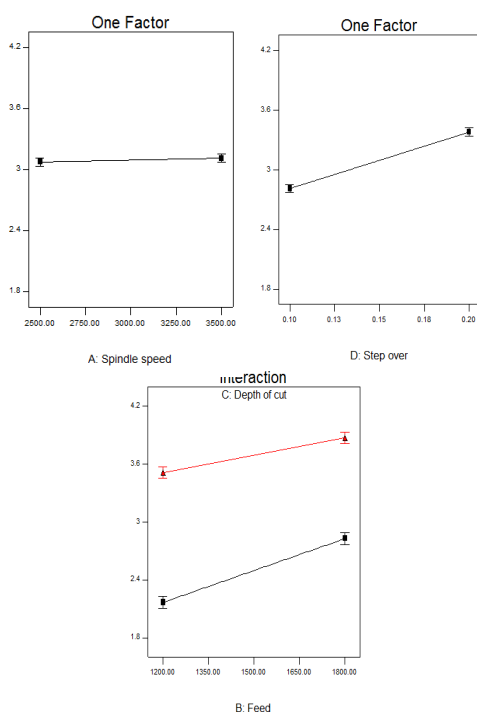
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value
Model	6.4353	10	0.643	181.796	0.0001
B	1.2557	1	1.255	354.732	0.0001
C	3.9260	1	3.926	1109.08	0.0001
D	1.1065	1	1.106	312.590	0.0001
BC	0.0899	1	0.089	25.396	0.0010
Curvature	0.0038	1	0.003	1.091	0.3267
Residual	0.0283	8	0.003		
Lack of Fit	0.0107	5	0.002	0.367	0.8458
Pure Error	0.0175	3	0.005		
Cor Total	6.4675	19			

จากตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองกัดขึ้นรูปชิ้นงานแสดงให้เห็นว่ารูปแบบทางสถิติของแผนการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียล และมีข้อตรงกลางอีก 4 ข้อ มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แสดงได้จากค่า p-value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p\text{-value} < 0.05$) นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลเนื่องจากปัจจัย Feed, Depth of Cut และ Step over มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$) และแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Feed กับ Depth of Cut มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} < 0.05$)

2.2 การประมาณค่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ในการประมาณค่าปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม เป็นการวิเคราะห์ระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองหรือค่าความหยาบผิวชิ้นงาน การประมาณ

ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวคือ Feed และ Step over ส่วนการทดลองครั้งที่ 3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อค่าความหยาบผิวคือ Feed, Depth of Cut และ Step over ส่วนครั้งที่ 4 และ 5 จะมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย Feed กับ Depth of Cut และ Feed กับ Step over ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนในข้างต้น จากรูปที่ 9 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัย Feed, Step over และ Depth of Cut ที่ทำให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดอยู่ที่ระดับต่ำส่วนปัจจัย Spindle Speed ค่าในแต่ละระดับนั้นเหลื่อมล้ำกัน (Overlap) แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว นั่นคือ ข้อมูลแต่ละระดับจะทับซ้อนกัน ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ ผลการทดลองในการทดลองการกัดขึ้นรูปชิ้นงานในครั้งที่ 1-5 ยังสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการการประมาณค่าปัจจัยของแต่ละครั้งได้ดังนี้



รูปที่ 9 แผนภาพการประมาณปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของการทดลองครั้งที่ 5

$$\text{ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยครั้งที่ 1} \\ = 1.55 + (0.19B) + (0.38D) \quad \text{.....(1)}$$

$$\text{ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยครั้งที่ 2} \\ = 1.84 + (0.24B) + (0.36D) \quad \text{.....(2)}$$

$$\text{ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยครั้งที่ 3} \\ = 2.36 + (0.22B) + (0.44C) + (0.36D) \quad \text{.....(3)}$$

$$\text{ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยครั้งที่ 4} \\ = 2.67 + (0.28B) + (0.50C) + (0.26D) \\ + (0.075BC) \quad \text{.....(4)}$$

$$\text{ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยครั้งที่ 5} \\ = 3.10 + (0.26B) + (0.60C) + (0.28D) \\ - (0.075BC) \quad \text{.....(5)}$$

3. การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

จากการวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวของการกัดขึ้นรูปชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ โดยรวมแล้วในการทดลองกัดครั้งที่ 1-5 พบว่า ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวคือ Feed, Depth of Cut และ Step over และปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยคือ Feed กับ Depth of Cut และ Feed กับ Step over และได้มีการประมาณค่าอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวเบื้องต้นพบว่า แต่ละปัจจัยจะมีระดับของค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยอยู่ที่ระดับต่ำทุกตัว

เนื่องจากในการออกแบบการทดลองในครั้งนี้ตำแหน่งของการวัดค่าความหยาบผิวมีลักษณะที่ต่างกันไปทำให้ต้องนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาพิจารณาในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการทดลองครั้งนี้ด้วย กล่าวคือเป้าหมายของการทดลองครั้งนี้คือค่าความหยาบผิวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะต้องมีค่าต่ำที่สุด แนวทางในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) วิธีฟังก์ชันความพึงพอใจเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดในการที่มีผล

ตอบสนองหลายตัวที่สะท้อนให้เห็นถึงระดับของผลตอบสนองแต่ละตัวในเทอมของผลตอบสนองที่น้อยที่สุดไปจนถึงผลตอบสนองที่มากที่สุด ซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 6 ซึ่งวิเคราะห์ได้จากโปรแกรม Design Expert V.7 [16] โดยจะเลือกค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าความหยาบผิวและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด

ตารางที่ 6 ค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่วิเคราะห์ด้วยวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ

<i>Runs</i>	<i>Spindle speed</i>	<i>Feed</i>	<i>Depth of cut</i>	<i>Step over</i>	<i>Surface roughness</i>
1	3500	1200	0.10	0.10	0.98
2	3463	1200	0.20	0.10	1.24
3	3499	1200	0.15	0.10	1.82
4	2500	1579	0.10	0.10	1.96
5	2500	1200	0.10	0.10	1.89

4. การทดลองเพื่อยืนยันผล

จากตารางที่ 6 ค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยของการกัดขึ้นรูปชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วยวิธีฟังก์ชันความพึงพอใจ เมื่อนำค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยของการกัดแต่ละครั้งมาทดลองกัดขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อยืนยันผล โดยแต่ละครั้งจะทดลองซ้ำ 5 ครั้ง แล้ววัดค่าความหยาบผิวเพื่อนำค่าที่ได้มาทดสอบเพื่อยืนยันผลของค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยผลที่ได้ดังตารางที่ 7

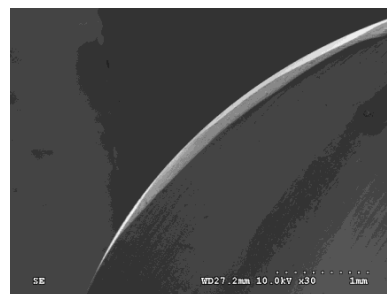
ตารางที่ 7 ค่าความหยาบผิวจากการทดลองเพื่อยืนยันผล

<i>Runs</i>	<i>Spindle speed</i>	<i>Feed</i>	<i>Depth of cut</i>	<i>Step over</i>	<i>Surface roughness</i>	<i>95% CI Low</i>	<i>95% CI High</i>
1	3500	1200	0.10	0.10	0.99	0.91	1.05
2	3463	1200	0.20	0.10	1.19	1.11	1.28
3	3499	1200	0.15	0.10	1.86	1.78	1.94
4	2500	1579	0.10	0.10	2.01	1.88	2.13
5	2500	1200	0.10	0.10	1.86	1.78	1.93

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ได้ในตารางที่ 6 กับ ตารางที่ 7 จะเห็นว่า ค่าที่ได้อยู่ในช่วงของค่าความเชื่อมั่น 95% (Confidence Interval) แสดงให้เห็นว่า ค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการทดลองครั้งนี้มีความน่าเชื่อถือ

นอกจากนี้แล้วในการทดลองเพื่อยืนยันผลยังตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องมือตัดด้วยการส่องด้วยกล้อง SEM เพื่อศึกษาลักษณะของการสึกหรอของเครื่องมือตัดเมื่อใช้งานผ่านไปตามระยะเวลาการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 10 จะเห็นว่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดจะมีอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีการใช้งานผ่านไป 150, 300, 450, 600, 750 นาที ตามลำดับ พบว่ามีลักษณะการสึกหรอ 3 ลักษณะคือ การสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) สึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear) การสึกหรอลักษณะแหง (Notch Wear)

ก) 150 นาที



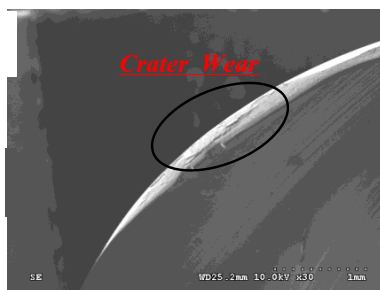
ข) 300 นาที



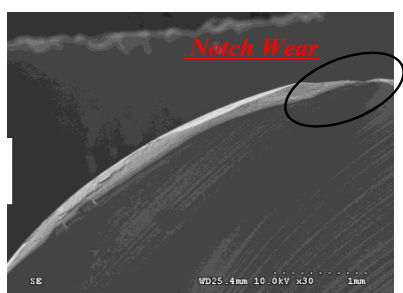
ค) 450 นาที



ง) 600 นาที่

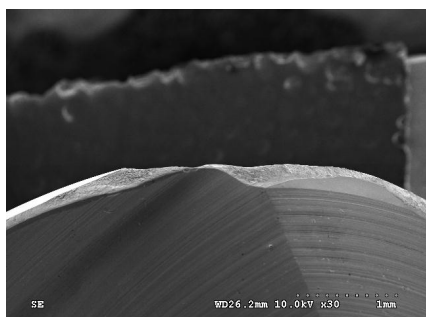


จ) 750 นาที่



รูปที่ 10 การตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องมือตัด
เมื่อใช้งานผ่านไปตามระยะเวลาการใช้งาน
ด้วยกล้อง SEM

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยจะค่อยๆ สึกหรอ เริ่มจากการสึกหรอบนผิวหลบกับผิวดาย ก่อนที่จะสึกหรอแบบลักษณะแหงที่ช่วงระยะเวลา 600-750 นาที่ ซึ่งมีความรุนแรงทำให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือตัดที่ค่าสภาวะที่ไม่เหมาะสมของปัจจัย จะเกิดการสึกหรอแบบแหงที่ช่วงระยะเวลา 300-450 นาที่ ดังรูปที่ 11 ทำให้ช่วงอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดสั้นกว่าค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย



รูปที่ 11 การสึกหรอของเครื่องมือตัดที่สภาวะที่ไม่
เหมาะสมของปัจจัยในช่วง 300-450 นาที่

เพื่อเป็นการทดสอบว่าในการกีดขึ้นรูปชิ้นงานในแต่ละครั้งของค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยว่าจะมีค่าความหยาบผิวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ในทางสถิติ เพื่อนำผลวิเคราะห์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparisons) ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 8 และ ตารางที่ 9

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ย
ในแต่ละครั้งของค่าสภาวะที่เหมาะสม
ของปัจจัย

Treatme nt	Mean difference	df	Standard error	t for H ₀ Coeff=0	Prob > t
1 vs 2	-0.2025	1	0.1346	-1.5049	0.1531
3 vs 4	-0.1425	1	0.1346	-1.0590	0.3064
3 vs 5	0.0100	1	0.1346	0.0743	0.9417
4 vs 5	0.1525	1	0.1346	1.1333	0.2749

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวเฉลี่ย
ในแต่ละครั้งของค่าสภาวะที่ไม่เหมาะสม
ของปัจจัย

Treatme nt	Mean difference	df	Standard error	t for H ₀ Coeff=0	Prob > t
1 vs 2	-0.1246	1	0.0363	-3.4349	0.0037
1 vs 3	-0.7165	1	0.0363	-19.7535	0.0001
1 vs 4	-0.9604	1	0.0363	-26.4797	0.0001
1 vs 5	-1.4179	1	0.0363	-39.0935	0.0001
2 vs 3	-0.5919	1	0.0363	-16.3186	0.0001
2 vs 4	-0.8358	1	0.0363	-23.0448	0.0001
2 vs 5	-1.2933	1	0.0363	-35.6586	0.0001
3 vs 4	-0.2440	1	0.0363	-6.7262	0.0001
3 vs 5	-0.7015	1	0.0363	-19.3400	0.0001
4 vs 5	-0.4575	1	0.0363	-12.6138	0.0001

จากตารางที่ 8 จะเห็นว่า คู่ที่ 1vs2, 3vs4, 3vs5 และ 4vs5 ค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกัดขึ้นรูปของแต่ละคู่ทำให้ได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อธิบายได้ว่าสามารถใช้ค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยร่วมกันได้ในการกัดขึ้นรูปชิ้นงานของแต่ละคู่ที่ทดสอบทางสถิติแล้วว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน ต่างจากตารางที่ 9 ที่แสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยในการกัดแต่ละครั้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกคู่ จากการเปรียบเทียบคู่ทำให้อธิบายได้ว่า ค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยของการกัดแต่ละครั้งทำให้ได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันของการกัดครั้งที่ 1-2 (0-300 นาที) และ 3-5 (300-750 นาที) ซึ่งหมายถึงคุณภาพผิวของการกัดขึ้นรูปไม่แตกต่างกัน เมื่อมีการปรับค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกัดแต่ละครั้ง ในขณะที่ค่าปัจจัยที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยแตกต่างกันในการกัดแต่ละครั้ง ซึ่งหมายถึงคุณภาพผิวของการกัดขึ้นรูปจะแตกต่างกัน เมื่อไม่มีการปรับค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกัดแต่ละครั้ง

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองกัดขึ้นรูปชิ้นงานและวัดค่าความหยาบผิวที่ได้เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติดังที่แสดงในข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า ค่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ คือ Feed, Depth of Cut และ Step Over ค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกัดขึ้นรูปครั้งที่ 1-2 คือ Spindle Speed = 3,463 รอบ/นาที Feed = 1,200 มม/นาที Depth of Cut = 0.1 มม และ Step Over = 0.1 มม ส่วนครั้งที่ 3-5 คือ Spindle Speed = 2,500 รอบ/นาที Feed = 1,200 มม/นาที Depth of Cut = 0.1 มม และ Step Over = 0.1 มม จะทำให้ได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 0.99-2.01 μm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหยาบผิวในงานกัดคือ $Ra < 1.0 \mu\text{m}$ [17] สามารถลดขั้นตอนหรือ

ระยะเวลาการกัดได้ อีกทั้งสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์โดยการลด Spindle Speed ให้ต่ำลงเมื่อนำเครื่องมือตัดตัวเดิมมาใช้งาน เป็นการพัฒนาคุณภาพผิวและลดการสิ้นเปลืองเครื่องมือตัดในอุตสาหกรรมการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ค่าความหยาบผิวสามารถพัฒนาให้ต่ำลงได้อีกโดยการกำหนดช่วงของค่าปัจจัยที่ต้องการศึกษาให้ต่ำลง ในกรณีที่ต้องการค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุด แต่ต้นทุนการผลิตจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการกัดขึ้นรูปจะมากขึ้น
2. ในกรณีที่ไม่ต้องการให้ค่าความหยาบผิวต่ำมากสามารถที่จะเพิ่มค่าระดับของปัจจัยให้สูงขึ้นอีก เช่น การเพิ่ม ปัจจัย Feed ให้มากขึ้นจะสามารถช่วยลดเวลาของการกัดขึ้นรูปได้เป็นอย่างมาก

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพในอุตสาหกรรมการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยการออกแบบการทดลอง ในครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยโดย ทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีภาคต้น ปีการศึกษา 2555 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Grzesik W. Advanced machining processes of metallic material theory modelling and applications. Elsevier Science. 2008; 213-214.
2. Oktem H, Erzurumlu T, Erzincanli F. Prediction of minimum surface roughness in end milling mold parts using neural network and genetic algorithm. Journal of Materials and Design. 2006; 27: 735-744.

3. Xu AP, Qu Y-X, Zhang DW, Huang T. Simulation and experimental investigation of the end milling process considering the cutter flexibility. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2003; 43: 283–292.
4. Franco P, Estrems M, Faura F. Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2004; 44: 1555–1565.
5. Ozcelik B, Bayramoglu M. The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2006; 46: 1395–1402.
6. Topal ES. The role of step over ratio in prediction of surface roughness in flat end milling. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2009; 51: 782–789.
7. Venkata RR, Pawar PJ. Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms. *Journal of Applied Soft Computing*. 2010; 10: 445–456.
8. Tzeng YF, Jean Ming-der. Dimensional quality optimization of high-speed CNC milling process with dynamic quality characteristic. *International Journal of robotic and computer integrated manufacturing*. 2005; 21: 506–517.
9. Ozcelik B, Oktem H, Kurtaran H. Optimum surface roughness in end milling Inconel 718 by coupling neural network model and genetic algorithm. *International Journal Advance Manufacturing Technology*. 2005; 27: 234–241.
10. Jesuthanam CP, Kumanan S, Asokan P. Surface Roughness Prediction Using Hybrid Neural Networks. *Machining Science and Technology*. 2007; 11: 271–286.
11. Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments*, 6th ed. John Wiley and Sons, Inc., New York. 2004.
12. Yang Y-K, Chuang M-T, Lin S-S. Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end milling process via design of experiments methods. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009; 209: 4395–4400.
13. Fallbohmer P, Rodriguez CA, Ozel T, Altan T. High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 2000; 98: 104–115.
14. Luis N, Lamikiz A, Sanchez JA, Arana JL. Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies. *Journal of Materials Processing Technology* 2002; 123 : 292–302.
15. Bartlett MS, Kendall DG. The Statistical Analysis of Variance-Heterogeneity and the Logarithmic Transformation. *the Journal of the Royal Statistical Society*. 1946; 8(1): 128–138.
16. StatEase Inc. *Design Expert 7 User's Guide*. Minneapolis, U.S.A. 2005.
17. Menges M, Michaeli W, Mohren P. *How to make ejection molds*. Hanser Gardner Publication, Inc. USA. 2000; 54–55.