

การประยุกต์ด้วยวิธีการทาทุชิสำหรับค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการกลึงชิ้นงานประกอบเพลลาโดยผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ในเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต

Application of Taguchi Method for Optimizing Shaft Work Piece Assembly Turning Process by the Effects of Machining Parameters

สุรพงศ์ บางพาน* พิริพันธ์ บางพาน นฤเบศร์ นางเมาะ พงศ์สุวรรณ จันทาธิ
สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300

Surapong Bangphan* Phiraphan Bangphan Naruebate Nangmor Phongsuwan Chantathi
Program of Industrial Technology, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Mai Campus, Chiang Mai, Thailand, 50300
Tel: 0-5392-1444, Fax: 0-5321-3183 E-mail: pong_pang49@yahoo.com

บทคัดย่อ

ธรรมเนียมปฏิบัติที่ผ่านมาวิธีการทาทุชิถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับหาค่าที่ดีที่สุดพารามิเตอร์กระบวนการของปัญหาผลตอบแบบเดียว ค่าที่ดีที่สุดด้วยผลลัพธ์ของผลตอบแบบเดียวที่เป็นค่าที่ไม่ดีที่สุดสำหรับค่าคงเหลืออยู่ ในการวิจัยนี้ วิธีการทาทุชิเป็นการใช้และการค้นหาพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการกลึงที่ใช้เป็นผลที่ได้จากการผลิตชิ้นงานที่เป็นเพลลา ตารางแผนฉาก ผลกระทบหลัก อัตราส่วน S/N และการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะถูกนำมาใช้และสำรวจในกระบวนการกลึงโดยการหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตที่มีผลกระทบ ในงานวิจัยนี้ไม่เพียงหาค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการกลึงชิ้นส่วนประกอบชิ้นงานที่เป็นเพลลาเท่านั้นแต่ยังหาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นผลกระทบหลักของสมรรถนะเครื่องกลึงในการกลึงอีกด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขตลอดจนการยืนยันผลที่ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพด้วยวิธีการทาทุชิ

คำหลัก วิธีการทาทุชิ กระบวนการกลึง ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักร ชิ้นงานประกอบเพลลา ผลกระทบ

Abstract

The traditional Taguchi method is widely used for optimizing the process parameters of a single response problem. Optimization of a single response results the non-optimum values for remaining. In this research, the Taguchi method is used to find the optimal process parameters for turning process that was used to produce a shaft work piece product. An orthogonal array (OA), main effect, signal-to-noise (S/N) ratio, and analysis of variance (ANOVA) were employed to investigate the turning process by the effects of machining parameters. This research, not only can the optimal process parameters for shaft work piece assembly turning process be obtained, but also the main process parameters that affect the turning performance of the shaft can be found. Experimental results are provided to confirm the effectiveness of this approach.

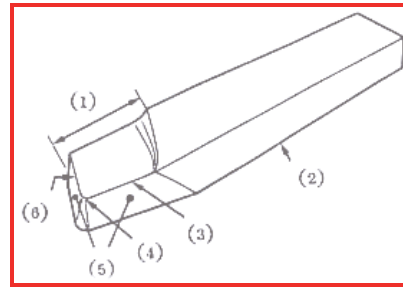
Keyword: taguchi method, turning process, machining parameter, shaft work piece assembly, effect.

1. บทนำ

เครื่องกลึง (turning) เป็นเครื่องจักรที่ทำงานโดยจับยึดชิ้นงานให้แน่นและชิ้นงานหมุนเพื่อทำการตัดเฉือนโลหะชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือนด้วยเครื่องกลึงซึ่งจะเคลื่อนที่ไปตามความยาวของชิ้นงานที่ทำการตัดเฉือน การกลึงตัดเฉือนประกอบด้วย การกลึงปาดหน้า ลบคม กลึงปอก กลึงเกลียว ตลอดจนการเจาะชิ้นงานบนเครื่องกลึงเป็นต้น ซึ่งต้องอาศัยความเร็วรอบ อัตราการป้อน และความลึกในการตัดเฉือน รวมทั้งน้ำหล่อเย็นที่ช่วยให้การกลึงมีประสิทธิภาพ เครื่องกลึงจึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสามารถทำการผลิตได้หลากหลายรูปแบบส่วนเครื่องกลึงที่ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 1

1.1 มีดกลึง (cutting tool)

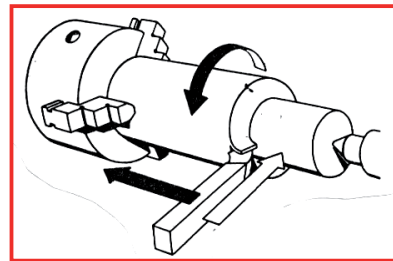
มีดกลึงที่ใช้กันโดยทั่วไป จะทำมาจากเหล็กเครื่องมือ (tool steel) ที่ต้องทนความร้อนได้สูง มีความเหนียว มีความแข็ง ตัวอย่างเช่น เหล็กโรบสูง (high speed steel) ทั้งสแตนคาร์ไบด์ (carbide tip) หรือเซรามิก (ceramic) เป็นต้น รูปร่างลักษณะมีดกลึงที่ทำจากเหล็กโรบสูงจะมีทั้งชนิดที่เป็นแท่งใหญ่ไม่ต้องใช้ตามจับ ในขณะที่ทำงานและแท่งขนาดเล็กต้องอาศัยตามจับขณะทำงาน แต่ในงานวิจัยนี้จะเลือกมีดกลึงชนิดเป็นแท่งใหญ่ไม่ต้องใช้ตามจับที่ทำจากวัสดุเหล็กโรบสูง (high speed steel) แสดงดังรูปที่ 2 ส่วนรูปที่ 3 ตัวอย่างการกลึงปอกชิ้นงานด้วยมีดกลึงคมตัดขวา (right hand tool)



รูปที่ 2 ส่วนต่าง ๆ ของมีดกลึงปอกขวา [1]

รูปร่างและลักษณะต่าง ๆ ของมีดกลึงอธิบายตามหมายเลขดังนี้

- 1) ความยาวคมตัด
- 2) ลำตัว
- 3) คมตัด
- 4) ปลายคมตัด
- 5) คมตัดด้านหน้า
- 6) ผิวข้างของคมตัด



รูปที่ 3 ตัวอย่างการกลึงปอกขวา [1]



รูปที่ 1 เครื่องกลึงที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพการทดสอบ [1]

ในการกลึงประกอบด้วยความเร็ว และการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือนที่เป็นลักษณะเฉพาะของค่าพารามิเตอร์ทั้งหลาย ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการเลือกสำหรับแต่ละพื้นฐานในการทำงานจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำชิ้นงาน วัสดุเครื่องมือ ขนาดเครื่องมือและค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการกลึง ค่าพารามิเตอร์ในการกลึงชิ้นงานจะมีผลกระทบต่อกระบวนการปฏิบัติงานดังเช่น [1-3]

1) ความเร็วในการตัด ความเร็วของผิวชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์กับมุมขอบของเครื่องมือตัดเฉือนในระหว่างทำการตัด การวัดผิวชิ้นงานหน่วยเป็น ฟุตต่อนาที (FSM)

2) ความเร็วเพลาลูกหมุน ความเร็วในการหมุนของ

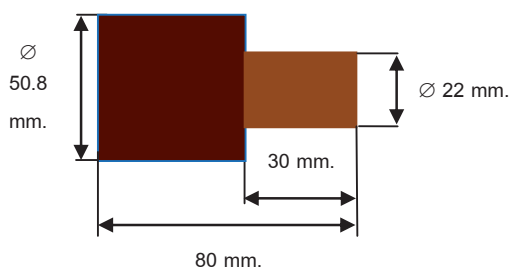
เพลหมุนกับชิ้นงานหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rev/min) ความเร็วเพลหมุนต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการตัดเฉือนในขณะที่หมุนรอบของชิ้นงาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดที่ทำการตัดเฉือน ในการตัดเฉือนจำเป็นต้องควบคุมความเร็วตัดเฉือน ความเร็วเพลหมุนอาจจะแปรผันตามแรงการตัดเฉือนขนาดของชิ้นงานในขณะที่นำเครื่องมือมาตัดเฉือน ถ้าความเร็วเพลหมุนคือค่าที่กำหนดตั้งนั้น ค่าความเร็วตัดเฉือนจะมีความผันแปรตามไปด้วย

3) อัตราการป้อน ความเร็วของเครื่องมือตัดเฉือนในการเคลื่อนที่จะมีความสัมพันธ์กับชิ้นงานตามที่ใช้เครื่องมือในการตัดเฉือน อัตราการป้อนจะทำการวัดเป็นหน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ (mm/rev)

4) ระยะป้อนลึกความลึกสำหรับเครื่องมือระหว่างเส้นรัศมีของชิ้นงานในขณะที่ทำการตัดเฉือนของเครื่องจักร ระยะป้อนลึกขนาดความกว้างจะต้องการอัตราการป้อนที่ต่ำหรือมีขนาดนั้นความลึกในการตัดเฉือนมากเกินไปของเครื่องมือจะทำให้อายุคมมีลดลง ดังนั้นในการป้อนลึกโดยทั่วๆ ไปที่พบบ่อยของเครื่องกลึงถ้ามีการป้อนลึกมากเกินไปจะทำให้ผิวชิ้นงานไม่เรียบและทำให้อายุคมมีดสั้นลงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ อัตราการป้อน วัสดุที่นำมาทำการตัดเฉือน และวัสดุที่นำมาทำมีดกลึง รวมทั้งน้ำหล่อเย็น เป็นต้น [1-3]

1.2 วัสดุชิ้นงานที่ทำการศึกษา

วัสดุที่นำมาทำชิ้นงานจะเลือกเหล็กเหนียวสำหรับการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดต่ออัตราการกำจัดเศษ (Material Removal Rate, MRR) โดยที่วัสดุชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร ความยาวทั้งหมดเท่ากับ 80 มิลลิเมตรและส่วนที่ต้องการวัดค่าได้ทำการกลึงปอกความยาวเท่ากับ 30 มิลลิเมตรและกลึงลดขนาดให้เหลือเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 22 มิลลิเมตรแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวอย่างขนาดชิ้นงานที่จะทำการกลึงปอกเพื่อลดขนาด

1.3 อัตราการกำจัดเศษ (Material Removal Rate, MRR)

อัตราการกำจัดเศษ (MRR) คือน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นงานลบด้วยน้ำหนักสุดท้ายหลังจากทำการตัดเฉือนหารด้วยเวลาที่ใช้ในการตัดเฉือน เช่น ชิ้นงานที่ 1 น้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 1,210 กรัม ลบด้วยน้ำหนักสุดท้ายที่ทำการตัดเฉือนเท่ากับ 800 กรัม โดยหารด้วยเวลาที่ใช้ในการตัดเฉือนเท่ากับ 45.81 วินาที จะได้อัตราการกำจัดเศษอยู่ที่ 8.95 เป็นต้น ส่วนการพิจารณาปรับแก้ไขด้วยอัตราส่วน S/N จะใช้โปรแกรม Minitab release 15.00 มาช่วยในการคำนวณ ซึ่งอัตราการกำจัดเศษหาได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$MRR = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักสุดท้าย}}{\text{เวลาที่ใช้การผลิต}} \quad (1)$$

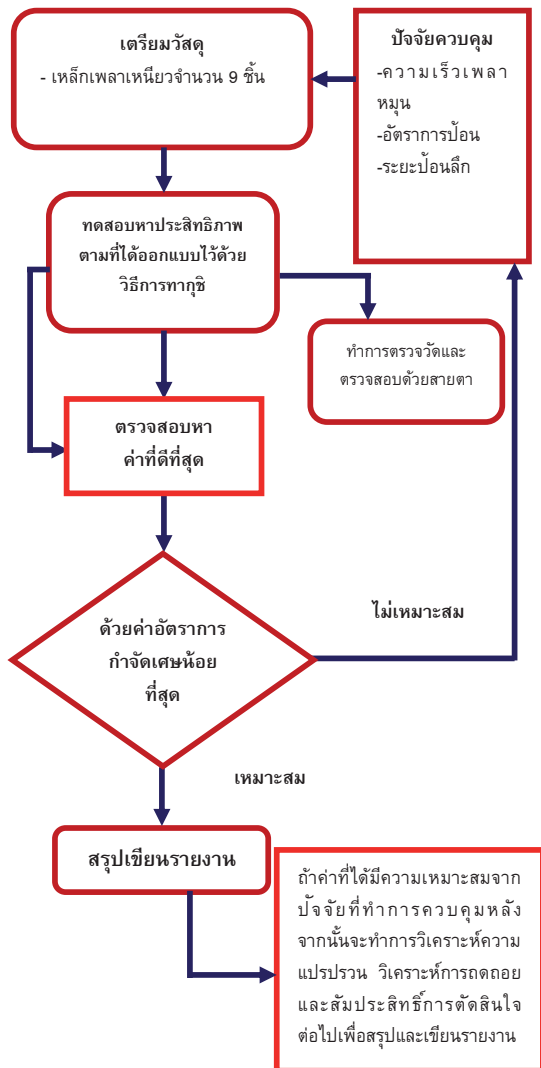
ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการนำเอาเทคนิควิธีการทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อทำการตรวจสอบอัตราการนำเอาเศษวัสดุออกจากชิ้นงานจากเหล็กเหนียวที่นำมาทดสอบโดยทดสอบกับมีดกลึงที่ทำมาจากวัสดุเหล็กอบสูง โดยปัจจัยที่ควบคุมได้แก่ ความเร็วเพลหมุน อัตราการป้อนและระยะป้อนลึกเพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้กับกระบวนการกลึงชิ้นงานด้วยเครื่องกลึงที่ใช้ในการผลิต

การออกแบบการทดลองโดยวิธีทางสถิติ เป็นการประยุกต์การออกแบบการทดลอง ปัจจัยควบคุม (control factor) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (uncontrollable factor) หรือ Noise Factor ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ยังเป็นแหล่งของความผันแปรอีกด้วย ซึ่งอิทธิพลที่เกิดจากตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถที่จะกำจัดได้ เพราะฉะนั้นหน้าที่หลักของวิธีการทางสถิติ คือการลดความผันแปรของผลิตภัณฑ์ โดยทำการเลือกปรับปรุงปัจจัยควบคุม (control factor) ผลการทดลองจากข้อมูลดิบจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของ Signal to Noise (S/N Ratio) ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในการหาเป้าหมายที่ต้องการเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (optimize) โดยที่คุณลักษณะของ S/N Ratio สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ Smaller - the - Better Type Problem, Nominal - the - Best - Type Problem และ Larger - the - Better Type Problem และประโยชน์ที่ได้จากวิธีการทางสถิติเป็นการช่วยลดจำนวนของการทดลอง ทำให้ประหยัดเวลา และ ต้นทุนในการทดลอง ช่วยทำให้

การทดลองง่ายสะดวกยิ่งขึ้น และให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเชื่อมั่นมากขึ้น [1-3]

2. วิธีการดำเนินการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทดสอบของกระบวนการกลึงเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีการทางสถิติ [1-2]

เมื่อผู้ออกแบบการทดลองทราบจำนวนของปัจจัยควบคุม (control factor) และระดับของปัจจัยควบคุม (control factor level) ที่ได้ออกแบบไว้ ก็จะนำค่าทั้งสองนี้มาทำการพิจารณาเลือกใช้ชนิด Orthogonal Array การใช้ Orthogonal Array จะทำให้สามารถหาอิทธิพลของปัจจัยที่มีหลายปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพในการกำหนดปัจจัยควบคุมหรือตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้ใน

Orthogonal Array อย่างเหมาะสม ตามรูปที่ 5 ดังขั้นตอนต่อไปนี้

พิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึงประกอบด้วย 3 ตัวแปร 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 1 ส่วนตัวแปรที่ไม่ต้องการศึกษาจะต้องกำหนดวิธีการควบคุมตัวแปรเพื่อให้ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยภายนอก เกิดขึ้นน้อยที่สุดเช่น อุณหภูมิภายนอก และสถานที่ทำการทดลอง ตลอดจนผู้ปฏิบัติงาน เป็นต้น

ตารางที่ 1 ปัจจัยและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัยควบคุม	ระดับการทดลอง		MRR
	1	2	
ความเร็วเพลหาหมุน (rev/min)	220	840	-
อัตราการป้อน (mm/rev)	0.221	0.476	-
ระยะป้อนลึก (mm)	0.5	1.0	-

หมายเหตุ : ระดับการทดลองได้กำหนดไว้ที่ 2 ระดับ ทั้ง 3 ปัจจัยประกอบด้วยความเร็วเพลหาหมุน ระดับที่ 1 และ 2 เท่ากับ 220 และ 840 รอบต่อนาที (ความเร็วเพลหาหมุนของเครื่องกลึงอยู่ระหว่าง 220 ถึง 840 รอบต่อนาที) , อัตราการป้อน ระดับที่ 1 และ 2 คือ 0.221 และ 0.476 มิลลิเมตรต่อรอบ (โดยปกติอัตราการป้อนที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 0.221 ถึง 0.476 มิลลิเมตรต่อรอบ) ส่วนระยะการป้อนลึกระดับที่ 1 และ 2 เป็น 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร (ในการกำหนดระยะการป้อนลึกอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 มิลลิเมตร เพราะว่ามีดกลึงทำจากเหล็กอบสูงและวัสดุที่ทำการทดลองเป็นเหล็กเหนียว) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในการผลิต ดังเช่น มุมมีดกลึงในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับค่าการลับมุมมีดให้เหมาะสมกับชิ้นงานโดยที่มุมตัดลดลงอีกประมาณ 0.5 องศาและมุมคลายปรับค่าลงตามมาตรฐานอีก 0.5 องศาเช่นกัน และตัวเครื่องกลึงต่อกระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 1 ได้ปรับแต่งอย่างเหมาะสมต่อการทดลองเป็นที่เรียบร้อย อีกทั้งยังมีปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทดสอบคืออุปกรณ์ในการวัดค่า เช่น เวอร์เนียคาลิเปอร์ได้มีการปรับค่าอย่างเหมาะสมแล้วเช่นกัน)

2.2 การออกแบบการทดลองโดยวิธีการทากุชิ

2.2.1 วิธีการทากุชิ

วิธีการทากุชิเป็นเทคนิคสำหรับการออกแบบและทำการทดลองทดลองจนเป็นกระบวนการเพื่อค้นหาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นได้จากปัจจัยในการนำมาทำการศึกษาดทดลอง (ตัวแปรนำเข้า) วิธีการทากุชิ คือสิ่งที่ต้องการการออกแบบซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายโดยได้ทำการเลือกสมรรถนะที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่ได้กำหนด เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิธีการทากุชิก็คือ Orthogonal array (OA) OA เป็นระบบ เมตริกซ์ของจำนวนข้อกำหนดในระดับแถวและคอลัมน์ วิธีการทากุชิคือการใช้อัตราส่วนแบบ Signal - to - noise (S/N) จะหาจำนวนของตัวแปรที่มีอยู่ S/N คือค่าเฉลี่ยที่ใช้ในการวัดของผลกระทบของปัจจัย noise ตามลักษณะของสมรรถนะของตัวแปร และจะทำการวัดค่าทั้งสองคือ S/N ของจำนวนตัวแปรในข้อมูลของผลตอบและเพื่อให้เข้าใจค่าเฉลี่ยผลตอบของเป้าหมายที่ต้องการที่สุด [1-2,4]

ทากุชิได้เสนอ 8 ขั้นตอนมาตรฐานดังนี้

1. กำหนดการดำเนินงานหลัก ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบข้างเคียงและโหมดความเสียหายที่จะเกิดขึ้น
2. กำหนดปัจจัย Noise ภายใต้เงื่อนไขของการทดสอบ และลักษณะเฉพาะของคุณภาพ
3. กำหนดเป้าหมายของการดำเนินงานจนได้ค่าที่ดีที่สุด
4. กำหนดปัจจัยควบคุมและระดับต่างๆ
5. เลือก การทดลองเมตริกส์แบบ Orthogonal Array
6. ดำเนินการทดลองแบบเมตริกส์
7. วิเคราะห์ข้อมูล ทำนายผลในระดับที่คาดหวังและสมรรถนะขบวนการที่ดีที่สุด
8. ดำเนินการทดลองเพื่อพิสูจน์หาความจริงและวางแผนการดำเนินงานในอนาคต [1-2, 6]

2.2.2 นิยามของวิธีการทากุชิ (definition of Taguchi method)

ทากุชิเป็นการคิดค้นวิธีใหม่โดยดำเนินการออกแบบการทดลอง วิธีการทากุชิใช้การจัดลำดับแบบพิเศษเรียกว่า ลำดับของ Orthogonal มาตรฐานการจัดลำดับเป็นการกำหนดที่เป็นแนวทางการดำเนินงานของจำนวนตัวเลขที่มีค่าน้อยสุดสำหรับการทดลองซึ่งสามารถ

กำหนดให้ข้อมูลมีความละเอียดมากที่สุดของปัจจัยทั้งหมดที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่นำมาทำการทดลองของกระบวนการ [7]

2.3 การคำนวณ

หลังจากเลือกข้อมูลทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยสำหรับการคำนวณด้วยอัตราส่วน S/N อัตราส่วน S/N คือความเข้าใจทางด้านคุณภาพซึ่งมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบสำหรับการเปลี่ยนแปลงโดยค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการในสมรรถนะของกระบวนการหรือผลผลิตที่ได้จากการประเมิน ดังนั้นข้อกำหนดในการปรับของการวัดเรียกว่า signal-to-noise อัตราส่วน S/N เป็นการรวมเข้าด้วยกันระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการวัดค่าของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ด้วยการออกแบบ robust ซึ่งคุณลักษณะของ อัตราส่วน S/N แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

ปัญหาชนิด Smaller - is - Better

เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N ของค่าเป้าหมายนั้นๆ สำหรับผลตอบที่เป็นศูนย์และเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อแสดงรายละเอียดเฉพาะพิกัดความเพื่อกำจัดด้านบนหาได้จากสูตรสมการที่ (2) ดังนี้

$$S / N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

ปัญหาชนิด Larger-is-Better

เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N เป้าหมายคือค่าสูงสุดของผลตอบและเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อแสดงรายละเอียดเฉพาะพิกัดความเพื่อกำจัดด้านล่างหาได้จากสูตรสมการที่ (3) ดังนี้

$$S / N_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

ปัญหาชนิด Target-Value-is-Best

เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N นั้น ให้ค่าเป้าหมายคือค่าที่ดีที่สุดและเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อค่านั้นเป็นค่าเป้าหมาย กับค่าพิกัดความเพื่อกำจัดด้านบนและด้านล่างหาได้จากสูตรสมการที่ (4) ดังนี้

$$S / N_N = 10 \log (\bar{y}^2 / S^2) \quad (4)$$

ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเป้าหมายของการทดลอง สำหรับสถานการณ์ Smaller-is-Better เนื่องจากต้องการผลลัพธ์คืออัตราการกำจัดเศษน้อยที่สุด ได้มีการปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่นำมาทำการทดลองดังนั้นจึงเลือกการทดลองด้วยวิธี Smaller-is-Better

2.3.1 ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการกลึงด้วยกระบวนการกลึงสำหรับมีดกลึงที่ทำมาจากเหล็กหล่อสูงกับชิ้นงานที่เป็นวัสดุเหล็กเหนียวโดยวิธีการทางทฤษฎี

การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi ในการทดลองนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึงกับมีดกลึงและชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ซึ่งมีทั้งหมด 3 ปัจจัยโดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ใช้ Orthogonal array (OAs) แบบ L-8 (2^3) ทำการทดลองครั้งแรกและทำการทดลองซ้ำครั้งที่สองและยืนยันผลการทดลองในการหาประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเท่ากับ 16 รัน(run) และยืนยันผลการทดลองอีก 5 รัน(run) ประกอบด้วยจำนวนการทดลองที่ขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยที่กำหนดแสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3 การจัดวางลำดับแบบ Orthogonal L-8 (2^3) Array ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ [1-2,4]

ตารางที่ 2 L-8 (2^3) Orthogonal Array

ลำดับ ทดลอง	ปัจจัย			MRR
1	220	0.221	0.5	-
2	220	0.221	1.0	-
3	840	0.476	0.5	-
4	840	0.476	1.0	-
5	220	0.476	0.5	-
6	220	0.476	1.0	-
7	840	0.221	0.5	-
8	840	0.221	1.0	-

2.3.2 Taguchi orthogonal array

การจัดวางลำดับ Orthogonal ของทฤษฎีเป็นการออกแบบโดยกำหนดค่าปัจจัย เท่ากับ 3 ตัวแปร และ 2 ระดับเพื่อทำการทดลองที่ใช้กับพารามิเตอร์ในการกลึงจะทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม Minitab release 15.00 มาช่วยในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Taguchi Orthogonal Array

ลำดับ ทดลอง	ปัจจัย			MRR
1	1	1	1	-
2	1	1	2	-
3	2	2	1	-
4	2	2	2	-
5	1	2	1	-
6	1	2	2	-
7	2	1	1	-
8	2	1	2	-

3. อภิปรายผล

3.1 ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึงกับมีดกลึงที่ทำจากเหล็กหล่อสูง

เมื่อทำการกลึงชิ้นงานด้วยเครื่องกลึงที่วัสดุทำมีดกลึงเป็นเหล็กหล่อสูง และนำไปทดสอบหาประสิทธิภาพของอัตราการกำจัดเศษตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีการทางทฤษฎีทั้ง 8 การทดลอง และนำชิ้นงานที่ได้มาทำการวัดเพื่อหาค่าหน้าหนักและจากการจับเวลา ส่วนเวลาในการกลึงเป็นการบันทึกโดยการจับเวลาและวัดค่าสุดท้ายของการกลึงงานทั้งหมด อัตราการกำจัดเศษ (Material removal rate, MRR) เป็นการคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง (น้ำหนักเริ่มต้น - น้ำหนักสุดท้าย / เวลาในการกลึง) และจากการวิเคราะห์พบว่าผลการทดลองที่ทำให้ได้ค่าสภาวะเหมาะสมที่สุดคือผิวที่ดีที่สุด คือ การทดลองที่ 5 โดยมีปัจจัยที่หนึ่งได้แก่ ความเร็วเพลาลม 220 รอบต่อนาที ปัจจัยที่สองคืออัตราการป้อนเท่ากับ 0.476 มิลลิเมตรต่อรอบและปัจจัยที่สามเป็นระยะการป้อนลึก 0.50 มิลลิเมตร ได้อัตราการกำจัดเศษเป็น 9.45 กรัมต่อนาทีแต่ใช้เวลา 41.269 นาที ผิวชิ้นงานดีที่สุด ทดลองซ้ำผลแสดงดังตารางที่ 6 และเพื่อให้มีความมั่นใจเพิ่มมากยิ่งขึ้นได้ทำการทดลองซ้ำเฉพาะในลำดับการที่ 1 อีก 5 รัน (run) พบว่าค่าเฉลี่ยที่ได้ในส่วนของการกำจัดเศษเท่ากับ 8.95 กรัมต่อนาที ใช้เวลาเฉลี่ยเป็น 45.81 นาที ส่วนอัตราการกำจัดเศษสูงที่สุดอยู่ที่ลำดับการทดลองที่ 8 โดยมีปัจจัยที่หนึ่งได้แก่ ความเร็วเพลาลม 840 รอบต่อนาที ปัจจัยที่สองคืออัตราการป้อนเท่ากับ 0.221 มิลลิเมตรต่อรอบและปัจจัยที่สามเป็นระยะการป้อนลึก 1.00 มิลลิเมตร ได้อัตราการกำจัดเศษที่สูงที่สุดเท่ากับ 75.47 กรัมต่อนาทีแต่ใช้เวลา เพียง 5.168 นาที

ผิวชิ้นงานที่ได้ไม่ค่อยจะดีเท่าที่ควร ส่วนลำดับการทดลองที่เหลือของแต่ละปัจจัยแต่ละระดับแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าที่ได้จากการสังเกตในช่วงแรก

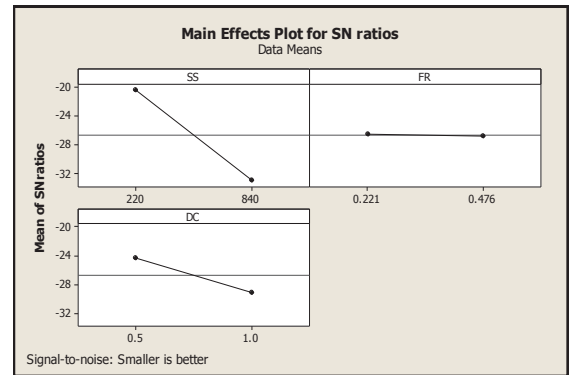
Job No.	A	B	C	D	E	F	G	H
1	220	0.221	0.5	45.81	1,210	800	410	8.95
2	220	0.221	1.0	35.18	1,200	810	390	11.09
3	840	0.476	0.5	13.137	1,210	800	410	31.21
4	840	0.476	1.0	6.562	1,210	800	410	62.48
5	220	0.476	0.5	41.269	1,200	810	390	9.45
6	220	0.476	1.0	32.077	1,200	800	400	12.47
7	840	0.221	0.5	14.513	1,200	800	400	27.56
8	840	0.221	1.0	5.168	1,200	810	390	75.47

หมายเหตุ:

- A = Spindle speed (rev/min)
- B = Feed rate (mm/rev)
- C = Dept of cut (mm)
- D = Time (sec)
- E = Initial weight (g)
- F = Final weight (g)
- G = Different of weight (g)
- H = Material removal rate (MRR)

3.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

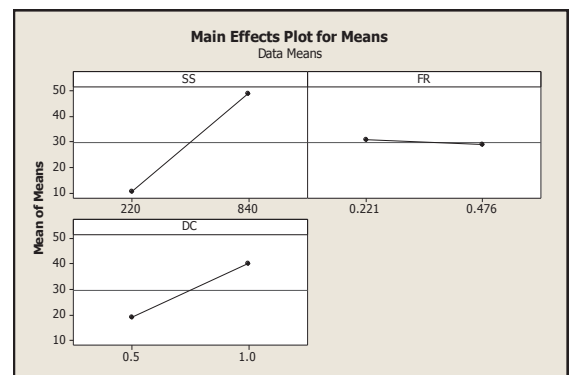
หลังจากหาค่าทั้งหมดที่ได้จากการสังเกตแสดงดังตารางที่ 4 อัตราส่วน S/N และค่าเฉลี่ย ได้จากการคำนวณและกราฟที่แต่ละปัจจัยและแต่ละระดับของปัจจัยสำหรับทำการวิเคราะห์ อัตราส่วน S/N สำหรับค่า MRR ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Minitab release 15.00 โดยวิธีการทาทุซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำอยู่บนพื้นฐานการวิเคราะห์ทั้งหมดด้วยวิธีการทาทุโดยการตัดสินใจด้วยผลกระทบหลักสำหรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ ทำการดำเนินการด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอย สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และการกำหนดเงื่อนไขค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด การวิเคราะห์ผลกระทบหลักเป็นการนำมาใช้ในการศึกษา ส่วนแนวโน้มของผลกระทบแต่ละปัจจัยของ S/N แสดงดังรูปที่ 6 และผลกระทบแต่ละปัจจัยของอัตราส่วน Mean แสดงดังรูปที่ 7 สมรรถนะของเครื่องจักรเป็นปัจจัยสำคัญของการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแต่ละการทดลองของ L-8 ซึ่งสามารถคำนวณโดยการคาดการณ์จากค่าที่สังเกตแสดงดังตารางที่ 5



หมายเหตุ:

- SS = ความเร็วเฟลาหมุน
- FR = อัตราการป้อน
- DC = ระยะการป้อนลึก

รูปที่ 6 ผลกระทบสำหรับปัจจัยการควบคุมในอัตราส่วน S/N



รูปที่ 7 ผลกระทบสำหรับปัจจัยการควบคุมในอัตราส่วน Mean

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์และค่าที่ได้จากการสังเกตสำหรับหลักเหนียว

NO.	A	B	C	MRR	S/N	MEAN
1	220	0.221	0.5	8.95	-18.6280	6.76
2	220	0.221	1.0	11.09	-21.3071	13.28
3	840	0.476	0.5	31.21	-29.4774	29.02
4	840	0.476	1.0	62.48	-36.3233	64.67
5	220	0.476	0.5	9.45	-19.9171	11.64
6	220	0.476	1.0	12.47	-21.5089	10.28
7	840	0.221	0.5	27.56	-29.2140	29.75
8	840	0.221	1.0	75.47	-37.1471	73.28

3.2.1 ทดลองซ้ำการทดลอง

การทดลองครั้งที่สองเป็นการทดลองซ้ำกับปัจจัยเดิมด้วยการดำเนินการตามขั้นตอนเดิมแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าที่ได้จากการทดลองซ้ำ

Job No.	A	B	C	D	E	F	G	H
1	220	0.221	0.5	45.86	1,210	800	410	8.94
2	220	0.221	1.0	35.104	1,200	810	390	11.11
3	840	0.476	0.5	13.282	1,210	800	410	30.87
4	840	0.476	1.0	6.635	1,210	800	410	61.79
5	220	0.476	0.5	41.009	1,200	810	390	9.51
6	220	0.476	1.0	31.949	1,200	800	400	12.52
7	840	0.221	0.5	14.488	1,200	800	400	27.61
8	840	0.221	1.0	5.173	1,200	810	390	75.39

จากตารางที่ 6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการซ้ำการทดลองมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยสำหรับเวลาที่ใช้การกลึงและอัตราการกำจัดเศษลดลง ส่วนค่าน้ำหนักก่อนและหลังไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจเกิดจากควบคุมกระบวนการกลึงและตรวจสอบอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและผู้ปฏิบัติงานจึงทำให้ค่าที่ได้มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงซึ่งไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

ในส่วนของการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความถดถอยและการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 หุ่นจำลองสัมประสิทธิ์สำหรับอัตราส่วน S/N

Estimated Model Coefficients for SN ratios				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-26.6904	0.4084	-65.348	0.010
SS 220	6.3501	0.4084	0.041	0.041
FR 0.221	0.1163	0.4084	0.285	0.823
DC 0.5	2.3812	0.4084	5.830	0.108
SS*FR 220 0.221	0.2564	0.4084	0.628	0.643
SS*DC 220 0.5	-1.3135	0.4084	0.192	0.192
FR*DC 0.221 0.5	0.2718	0.4084	0.665	0.626
S = 1.155 R-Sq = 99.7% R-Sq(adj) = 97.6%				

จากค่า p-value ในตารางที่ 7 ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์สำหรับอัตราส่วน S/Nn ของกระบวนการกลึงที่ระดับนัยสำคัญ 5%(0.05) คือ ปัจจัยที่ 1 (SS220) ผลลัพธ์ของหุ่นจำลองสัมประสิทธิ์ของค่า S/N ซึ่งมีค่า p-value ที่ไม่เกินระดับนัยสำคัญ 5% (0.05) สรุปว่ามีผลต่อค่า S/N (มีนัยสำคัญ) ส่วนปัจจัยที่ 2 (FR0.221) ปัจจัยที่ 3 (DC 0.50) และปัจจัยร่วมระหว่าง SS*FR 220 0.221, SS*DC 220 0.5 และ ค่า FR*DC 0.221 0.5 ผลลัพธ์ของหุ่นจำลองสัมประสิทธิ์ของค่า S/N ซึ่งมีค่า p-value ที่เกินระดับนัยสำคัญ 5% (0.05) สรุปว่าไม่มีผลต่อค่า S/N (ไม่มีนัยสำคัญ) ในส่วนตารางที่ 8 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า S/N ซึ่งมีค่า p-value ที่เกินระดับ

นัยสำคัญ 5% (0.05) สรุปว่าทั้งสามปัจจัยและปัจจัยร่วมทั้งสามไม่มีผลต่อค่า S/N (ไม่มีนัยสำคัญ)

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วน S/N

Analysis of Variance for S/N ratios					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
SS	1	322.589	322.589	241.72	0.041
FR	1	0.108	0.108	0.08	0.823
DC	1	45.361	45.361	33.99	0.108
SS*FR	1	0.526	0.526	0.39	0.643
SS*DC	1	13.802	13.802	10.34	0.192
FR*DC	1	0.591	0.591	0.44	0.626
Residual Error	1	1.335	1.335		
Total	384.312	384.312			

รูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับอัตราส่วน S/N ค่า P-Value เท่ากับ 0.041 และการปรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 97.6 % แสดงดังตารางที่ 7 ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจาก P-Value อัตราส่วน S/N มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงดังตารางที่ 8 ส่วนสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าอัตราส่วน S/N ตามสมการที่ 5 คือ

$$\begin{aligned}
 &= -26.6904 + SS220(6.3501) + FR 0.221 (0.1163) \\
 &\quad + DC 0.5 (2.3812) + SS220*FR0.221 \\
 &\quad (0.2564) - SS220*DC0.5 (1.3135) \\
 &\quad + FR0.221*DC0.5 (0.2718)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

4. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้พิจารณาผลกระทบหลักในการป้อนค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงในการกลึงชิ้นงานที่ทำจากเหล็กเหนียวและมีดกลึงที่ทำจากเหล็กอบสูงโดยใช้วิธีการทากูชินั้น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือลำดับการทดลองที่ 5 กล่าวคือความเร็วเฟดละหมุน 220 รอบต่อ นาที อัตราการป้อน 0.476 มิลลิเมตรต่อรอบ และระยะการป้อนลึกเท่ากับ 0.50 มิลลิเมตรทำให้ได้รอยละอัตรากำจัดเศษอยู่ที่ 9.45 กรัมต่อนาที ใช้เวลาในการกลึงเท่ากับ 41.269 นาที อัตราส่วน S/N อยู่ที่ -19.9171 และค่าเฉลี่ย เท่ากับ 11.64 เพราะว่าผิวของชิ้นงานดีที่สุดในการทดลองได้ทำซ้ำการทดลองรวมทั้งยืนยันพบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองในช่วงแรกด้วยการ

คำนวณโดยวิธีทาคุชิ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ กล่าวคือในช่วงแรกก่อนการทดลองได้กำหนดค่าเบื้องต้นได้แก่ ความเร็วเพลาลูกหมุน 220 รอบต่อนาที ปัจจัยที่สองคืออัตราการป้อนเท่ากับ 0.476 มิลลิเมตรต่อรอบและปัจจัยที่สามเป็นระยะการป้อนลึก 0.50 มิลลิเมตร ได้อัตราการกำจัดเศษเป็น 9.83 กรัมต่อนาทีแต่ใช้เวลา 43.321 นาที ผิวชิ้นงานดีที่สุด ส่วนค่าที่ได้จากการออกแบบการทดลองในครั้งแรกพบว่าได้อัตราการกำจัดเศษเป็น 9.45 กรัมต่อนาทีแต่ใช้เวลา 41.269 นาที ผิวชิ้นงานดีที่สุด และผลการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่าอัตราการกำจัดเศษเท่ากับ 9.51 ใช้เวลาอยู่ที่ 41.009 นาที ได้ผิวชิ้นงานดีที่สุดเช่นกัน จะเห็นได้ว่าเวลาจะลดลงแต่อัตราการกำจัดเศษจะเพิ่มขึ้นแต่ไม่มากนักทั้งนี้อาจเกิดจากการปรับแต่งปัจจัยที่ทำการควบคุมทำให้ค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นวิธีการทาคุชิสามารถนำมาออกแบบกระบวนการกลึงด้วยการกลึงโดยใช้มีดกลึงที่ทำจากเหล็กอบสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสภาวะดังกล่าวจะถูกนำไปเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตที่ได้จากกระบวนการผลิตด้วยเครื่องกลึงให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ที่นำเข้าเป็นหลักซึ่งมีผลต่อร้อยละของอัตราการกำจัดเศษซึ่งนำมาวิเคราะห์และพิจารณาเลือกเป็นแบบผลตอบเดียวในกระบวนการกลึงด้วยการกลึงจากวัสดุมีดกลึงที่ใช้เหล็กอบสูงกับวัสดุชิ้นงานที่ใช้เหล็กเหนียวมาทำการทดสอบ ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงจำนวนปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบต่อกระบวนการกลึงด้วยมีดกลึงที่ทำจากเหล็กอบสูง พบว่าปัจจัยทั้งสามมีความสำคัญต่อกระบวนการ กล่าวคือ ความเร็วเพลาลูกหมุนที่มากกว่าในรายงานจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกลึง อัตราการป้อนต่ำหรือสูงขึ้นจะมีผลต่อผิวของชิ้นงาน และระยะการป้อนลึกที่ป้อนเข้าไปถ้ามากเกินไปจะทำให้อายุคมมีดกลึงสั้นลงสึกหรอเร็วขึ้น หมายความว่าถ้าได้ผิวชิ้นงานที่หยาบ เพราะฉะนั้นปัจจัยทั้งสามที่ได้กำหนดและค่าที่เหมาะสมที่สุดจะช่วยให้มีประสิทธิภาพและทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึงให้ได้ อัตราส่วนการกำจัดเศษต่ำสุด ส่วนวัสดุชิ้นงาน วัสดุทำมีดกลึง เครื่องกลึง น้ำหล่อเย็น และสภาพแวดล้อมในการทำงานตลอดจนผู้ปฏิบัติงานก็เป็นปัจจัยในกระบวนการผลิต

5. ข้อเสนอแนะ

การนำเอาเทคนิควิธีการทาคุชิมาช่วยในการออกแบบการทดลอง ง่ายสะดวกและเป็นวิธีดำเนินการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการหาค่าที่ดีที่สุดที่ต้องการด้วยการเข้าใกล้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการออกแบบไว้อย่างเหมาะสมที่สุดกับมีการปรับค่าบางค่าตามเงื่อนไขของข้อกำหนดและการตัดสินใจพิจารณาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ การออกแบบทาคุชิเป็นเครื่องมือที่สำคัญ ทาคุชิได้ให้คำแนะนำอย่างง่ายและเป็นวิธีที่เป็นระบบจนนำไปสู่สมรรถนะ ต้นทุนที่ต่ำและคุณภาพของกระบวนการผลิต

จะเห็นได้ว่าวิธีการทาคุชิเป็นวิธีการการควบคุมคุณภาพอีกหนึ่งวิธีที่สามารถช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิต ควบคุมกระบวนการผลิต ตลอดจนสามารถช่วยลดเวลา ประหยัดวัสดุ งานที่ได้มีคุณภาพสามารถยืนยันผลได้แต่ละลำดับการทดลองตามที่ได้ออกแบบทดลองด้วยวิธีการทาคุชิ ที่ผ่านมาผู้วิจัยและคณะได้ศึกษาค้นคว้าด้วยวิธีการทาคุชิสามารถยืนยันผลการทดลองได้เป็นอย่างดี 2 บทความด้วยวิธีการดังกล่าวโดยทำการทดลองเครื่องกลึงเครื่องเดิม มีดกลึงใช้วัสดุเดิม อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตชนิดเดิม แตกต่างกันทางด้านทางเลือกวัสดุที่นำมาทำการทดลอง สามารถพิสูจน์หาผลลัพธ์ที่ได้คือค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการผลิตโดยเฉพาะการผลิตด้วยเครื่องกลึงแต่ทั้งนี้ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีการวางแผนการเตรียมงานอย่างเป็นระบบว่าจะเลือกใช้เครื่องมือตรวจสอบชนิดใดให้เหมาะสมกับงานที่ทำการศึกษาวิจัยและเลือกเครื่องมือตรวจสอบชนิดใดให้เหมาะสมถูกต้อง เหตุผลดังที่กล่าวมานี้มีความจำเป็นที่สุดต่อกระบวนการผลิต

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณ โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน ประจำปี 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการนำเสนอผลงานในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรพงศ์ บางพาน, พีรพันธ์ บางพาน, ธิติกานต์ บุญแข็ง. การประยุกต์วิธีการทากูชิสำหรับ ค่าที่ดีที่สุดโดยศึกษาของกระบวนการ กะเทาะข้าวกล้อง ด้วยลูกยางกะเทาะเปลือก. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ม.ช. 2557; 22(1):59-67.
- [2] สุรพงศ์ บางพาน. การประยุกต์วิธีการทากูชิสำหรับ กระบวนการกลึงที่ดีที่สุดโดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ของ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต.วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ. 2557; 7(2):104-112.
- [3] Krishankant, Jatin Taneja, Mohit Bector, Rajesh Kumar. Application of taguchi method for optimizing turning process by the effects of machining parameters. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2012; 2(1).
- [4] Roy, R.K. A primer on the Taguchi competitive manufacturing Series. Van Nostrand Reinhold New York. 1990.
- [5] Roy, R. K. Design of experiments using the Taguchi approach. John Wiley & Sons, Inc., New York. 2001.
- [6] Umass [Internet]. 2014 [cited Feb 23 2014] Available from: <http://www.ecs.umass.edu/Mie/labs/fea/>.
- [7] Kujar, R., Ranchi, H. Application of Taguchi method for process parameters optimization in semi-solid forging of A356 Al-Alloy. IRACST-Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ) ISSN: 2250-3498. 2012; 2(4).