สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 โดยวิธีทากูชิ

OPTIMIZATION OF FLAME HARDENING PROCESS IN AISI 1045 CARBON STEEL USING TAGUCHI METHOD

มนตรี วิมล*, ธนากร จันทรศรีชา, สิริเดช กุลหิรัญบวร, นริศรา สุวิเชียร

Montri Wimol*, Tanakorn Jantarasricha, Siridech Kunhirunbawon, Narisara Suwichien

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: montri.m@psru.ac.th

วันที่เข้าระบบ 2 กันยายน 2564
วันที่แก้ไขบทความ 7 ธันวาคม 2564
วันที่ตอบรับบทความ 10 ธันวาคม 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 ด้วยเปลวไฟโดยวิธีทากูชิ ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักได้แก่ อุณหภูมิชุบผิวแข็ง ระยะห่างของหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงาน และความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงาน ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ระยะห่างของหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงาน 30 มิลลิเมตร และความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงาน 2 รอบต่อนาที ให้ค่าความแข็งสูงสุด (HRC) ที่ 54.12 และค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุด 0.0582 กรัม และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย พบว่าทุกปัจจัยส่งผลต่อการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเพื่อยืดอายุการใช้งาน

คำสำคัญ: การชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ, เหล็กกล้าคาร์บอน, วิธีทากูชิ

Abstract

The objective of this study is to determine the optimal conditions of the flame hardening process in AISI 1045 carbon steel using the Taguchi method consisted of three factors: surface hardening temperature, distance from the nozzle, and speed. The results showed that the temperature of 950 °C, the distance between the gas nozzle and the workpiece of 30 mm, and the rotation speed of 2 rpm were found to be the most optimal conditions, with the maximum surface hardness (HRC) of 54.12 and the lowest wear rate of 0.0582 g. According to the analysis of variance (ANOVA), it was found that all of the factors significantly affected the flame hardening process at a 95 percent confidence interval. The findings of this study can be utilized to improve the surface characteristics of mechanical parts in order to improve their service life.

Keywords: Flame hardening process, Carbon steel, Taguchi method

1. บทนำ

เฟืองโซ่เป็นชิ้นส่วนที่มีความสำคัญในระบบขับเคลื่อนในเครื่องจักรกล เช่น จักรยาน เลื่อยยนต์ รถจักรยานยนต์ และสายพานลำเลียง เป็นต้น โดยทั่วไปเฟืองโซ่ทำหน้าที่ส่งกำลังเคลื่อนที่จากต้นกำลังไปยังจุดที่ต้องการ (Thipprakmas, 2011) เนื่องจากสภาพการทำงานของเฟืองโซ่ในสายพานลำเลียงจะได้รับแรงกระทำซ้ำกันทำให้มีโอกาสที่ได้รับความเสียหายและสึกหรอได้ง่าย (Woldman *et al*., 2015) ดังนั้นเพื่อให้เฟืองโซ่สามารถทนต่อการใช้งาน กระบวนการทางโลหะวิทยาจึงถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านความต้านทานการสึกหรอของเฟืองโซ่

การชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ (Flame hardening) เป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพของผิวชิ้นงาน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงด้วยก๊าซเชื้อเพลิง-ออกซิเจน และตามด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Grönegress, 1964) ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือ แกนกลางจะยังมีคุณสมบัติเดิมซึ่งยังคงความเหนียวกว่าบริเวณผิวแข็ง เป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก และมีต้นทุนที่ต่ำ (Lee *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2006) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของเหล็กกล้า เช่น Jeyaraj *et al.* (2015) ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อกระบวนการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ ภายใต้ปัจจัยด้านอุณหภูมิ ระยะห่างของเปลวไฟกับชิ้นทดสอบ เวลาในการเย็นตัว (Quenching time) โดยใช้วิธีการทากูชิ ต่อมา Chucheep *et al.* (2017) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิชุบแข็งต่อคุณสมบัติความแข็งที่ผิว และการสึกหรอของใบเลื่อยสายพานสำหรับแปรรูปไม้ยางพาราด้วยวิธีการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ และ Starosta (2019) นำเสนอผลกระทบของพารามิเตอร์การชุบแข็งด้วยเปลวไฟที่มีต่อค่าความแข็งเหล็กกล้าผสมเกรด CR45 ในระหว่างการซ่อมแซมชิ้นส่วนเครื่องจักรของเรือเดินสมุทรขณะอยู่ใน

ทะเล ด้วยพารามิเตอร์หลักได้แก่ ระยะเวลาในการเผาด้วยเปลวไฟ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงาน โดยใช้วิธีทากูชิ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการศึกษาของ Kim *et al.* (2006) ที่เสนอแนวทางการลดความเค้นตกค้างที่เหมาะสมในกระบวนการชุบแข็งผิวด้วยเปลวไฟ เพื่อให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ 12Cr มีความแข็งสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่ากระบวนการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟจะต้องควบคุมพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสมต่อชิ้นงานนั้น ๆ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งและค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงาน ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบผิวแข็งเฟืองโซ่ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางด้วยเปลวไฟ โดยการออกแบบการทดลอง (Design of experiment) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของเฟืองโซ่ให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานสำหรับการส่งกำลังระบบขับเคลื่อนในเครื่องจักรกล

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

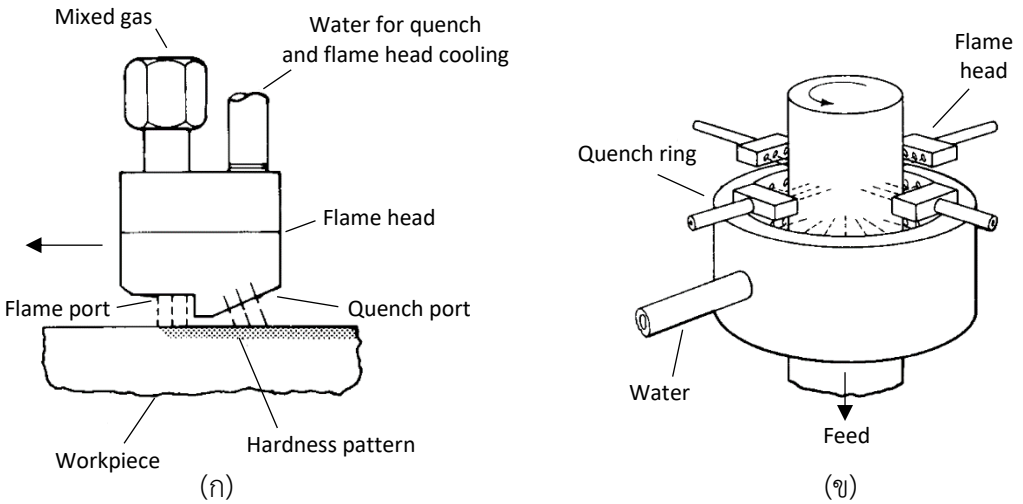
เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบผิวแข็งเฟืองโซ่ เหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 ด้วยกระบวนการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ โดยวิธีทากูชิ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ในหัวข้อวิธีการดำเนินงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ คือ การชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ การทดลองชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ ปัจจัยควบคุมและระดับของปัจจัยในการทดลอง วิธีทากูชิ และการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ

การชุบแข็งเหล็กกล้าด้วยวิธีนี้ ต้องใช้เหล็กกล้าที่มีค่าความเร็วเย็นตัววิกฤติต่ำ เช่น เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนผสมมากพอสมควร หรือมีสารเจือชนิดอื่นผสมอยู่อีก เช่น โครเมียม (Cr) โมลิบดินัม (Mo) เป็นต้น โดยการให้ความร้อนจนชิ้นงานมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างออสเตไนต์ โดยการใช้เปลวไฟจากแก๊สเชื้อเพลิง เช่น อาซิทีลิน มีเทน หรือโพเพน (สมนึก, 2557) ลักษณะการชุบมีหลายวิธี เช่น ชิ้นงานอยู่กับที่ และเปลวไฟเคลื่อนที่ หรือในทางกลับกันคือ ชิ้นงานเคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพที่ 1 นอกจากนั้นหลังจากทำให้ชิ้นงานร้อนแล้ว ชิ้นงานจะถูกทำให้เย็นลงด้วยการพ่นน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันไม่ให้บริเวณแกนกลางได้รับความร้อนมากเกินไป (ASM Handbook, 2013)



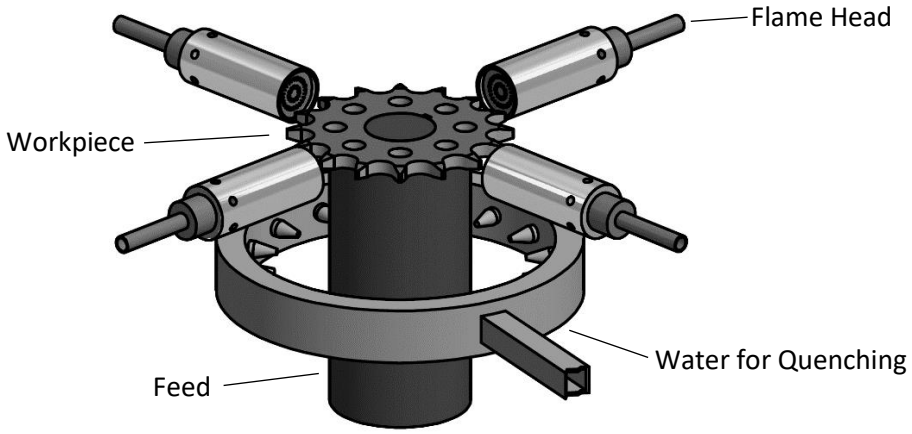
ภาพที่ 1 หลักการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ (ก) ชิ้นงานอยู่กับที่ (ข) ชิ้นงานเคลื่อนที่ (ASM Handbook, 2013)

3.2 การทดลองการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ

สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ วัสดุที่ใช้ในการวิจัยเป็นเฟืองโซ่ RS35 ชนิด Single hub ทำจากเหล็กกล้า AISI 1045 โดยมีส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกล ดังตารางที่ 1 ในการศึกษาปัจจัยของกระบวนการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ ได้แก่ อุณหภูมิชุบผิวแข็ง ระยะห่างของหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงาน และความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงาน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อสมบัติความแข็งและการสึกหรอของชิ้นงาน เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองจะถูกออกแบบให้สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้ เช่น การควบคุมอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัพเปิ้ลชนิดเคสำหรับวัดอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงาน การกำหนดระยะห่างระหว่างหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงานจะมีแคลมป์สำหรับจับยึดหัวฉีดแก๊ส (Nozzle) ทั้ง 4 หัวฉีด และสามารถปรับระยะได้โดยการหมุนปรับที่เกลียวของขาจับยึดแนวตั้ง ในงานวิจัยนี้การให้ความร้อนชิ้นงานใช้เปลวไฟจากแก๊สเชื้อเพลิงผสมระหว่าง อาซิทีลีน-ออกซิเจน ตามปริมาณและความดันที่เหมาะสม เปลวกลางจะถูกใช้ในทุกสภาวะการทดลอง และชิ้นงานทดลองจะถูกทำให้เย็นตัวด้วยการฉีดน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด โดยการใช้นาฬิกาจับเวลาเพื่อตรวจสอบเวลาเย็นตัว ซึ่งลักษณะการทดลองแสดงดังภาพที่ 2 จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการมาทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (HRC) โดยวัดความแข็งบริเวณผิวของฟันเฟืองตามมาตรฐานของ ASTM E18 นอกจากนี้ชิ้นงานทดสอบจะถูกนำไปทดสอบอัตราการสึกหรอ ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี ตามมาตรฐาน ASTM G65

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของชิ้นงานทดลอง

	Chemical composition					Mechanical Properties
AISI 1045	C	Si	Mn	Cr	Ni	Hardness
(%wt.)	0.452	0.258	0.537	0.018	0.015	179 HB (8 HRC)



ภาพที่ 2 การปรับตั้งสภาวะที่ใช้ทดลอง

3.3 ปัจจัยควบคุม และระดับของปัจจัยในการทดลอง

การกำหนดตัวแปรในการทดลองนี้จะประกอบด้วย ปัจจัยควบคุม (Control factor) และระดับของปัจจัยควบคุม (Factor levels) โดยพิจารณาจากปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) ระยะห่างของหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงาน (Distance from the nozzle) และความเร็วรอบ (Speed) ในแต่ละปัจจัยจะมี 3 ระดับ ดังตารางที่ 2 ส่วนปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Noise factor) เช่น สภาพอากาศ จะไม่ถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการ

ตารางที่ 2 ปัจจัย และระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

Experimental Factors	Level 1	Level 2	Level 3
Temperature (°C)	750	850	950
Distance from the Nozzle (mm)	10	20	30
Speed (RPM)	2	4	6

3.4 วิธีทากูชิ

วิธีทากูชิเป็นเทคนิคการออกแบบการทดลอง โดยการใช้ Orthogonal arrays และช่วยลดผลกระทบของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ปรัชญาพื้นฐานของวิธีทากูชิคือสร้างความเชื่อมั่นในขั้นตอนการออกแบบ ข้อดีที่มีประโยชน์มากของวิธีนี้คือ การลดระยะเวลาการทดลอง ลดต้นทุน และค้นหาปัจจัยสำคัญในช่วงเวลาที่สั้นลง (Asiltürk & Akkuş, 2011) แนวคิดหลักของวิธีทากูชิโดยทั่วไปจะพิจารณาต้นทุนการผลิต (Production cost) และลดผลกระทบจากปัจจัยรบกวน การใช้ลักษณะของคุณภาพและความแปรปรวน วิธีการนี้ใช้ประโยชน์จากอัตราส่วน S/N (Signal) ของค่าเฉลี่ย กับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Noise) วิธีทากูชิจำแนกลักษณะของคุณภาพทั่วไปออกเป็น 3 ประเภท คือ ลักษณะคุณภาพยิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller the better) ลักษณะคุณภาพยิ่งมากยิ่งดี (Larger the better) และลักษณะคุณภาพตรงตามค่าออกแบบ (Target the better) อัตราส่วน S/N สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1)–(3) ตามลำดับที่สอดคล้องกับคุณลักษณะของคุณภาพประเภทต่าง ๆ เพื่อเลือกสมรรถนะที่ดีที่สุดตามลักษณะการใช้งาน (Freeman *et al*., 2021; Ryan, 2005)

Smaller the better characteristic

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

Larger the better characteristic

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

Target the better characteristic

$$\frac{S}{N} = 10\log_{10}\left(\frac{\bar{y}}{S^2}\right) \quad (3)$$

3.5 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ

ในงานวิจัยนี้มีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมในการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟจำนวน 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 3 ระดับ ซึ่งสอดคล้องกับ Orthogonal arrays แบบ $L_9(3^3)$ ของวิธีทากูชิ โดยจะมีลำดับการทดลองทั้งหมด 9 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้ลักษณะคุณภาพในรูปแบบของวิธีทากูชิ แบบลักษณะคุณภาพยิ่งมากยิ่งดีกับค่าตอบสนองในด้าน

ความแข็ง และแบบลักษณะคุณภาพยิ่งน้อยยิ่งดีกับค่าตอบสนองในด้านอัตราการสึกหรอ ของผิวชิ้นงาน

ตารางที่ 3 ลำดับการทดลอง แบบ Orthogonal L_9 (3^3) array

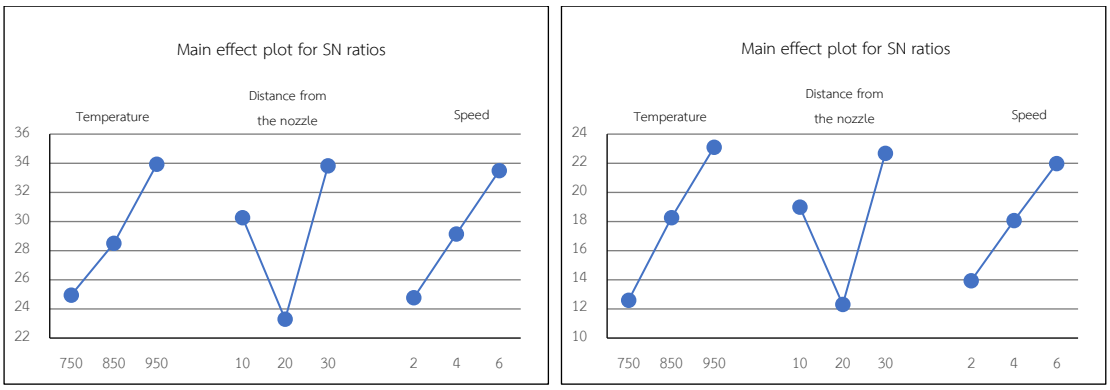
Experiments	Temperature	Distance from the nozzle	Speed
1	750	30	6
2	750	20	4
3	750	10	2
4	850	30	4
5	850	20	2
6	850	10	6
7	950	30	2
8	950	20	6
9	950	10	4

4. ผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการชุบผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางด้วยเปลวไฟ โดยการปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานในการทดลองคือ ค่าความแข็ง และค่าอัตราการสึกหรอ ดังมีรายละเอียดของผลการวิจัยต่อไปนี้

4.1 ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการชุบผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการชุบผิวแข็งด้วยเปลวไฟ โดยทำการศึกษาค่าความแข็งที่เกิดขึ้นหลังการทดลอง ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากอัตราส่วน S/N ดังภาพที่ 3 (ก) ของการทดลองแบบลักษณะคุณภาพยิ่งมากยิ่งดี พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิชุบผิวแข็งคือ 950 องศาเซลเซียส ระยะห่างของหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงาน 30 มิลลิเมตร และความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานที่ 2 รอบต่อนาที จะให้ค่าความแข็ง (HRC) มากสุดเท่ากับ 54.12 และแนวโน้มของผลกระทบของอัตราส่วน S/Nแสดงดังภาพที่ 3 (ข) ของการทดลองแบบลักษณะคุณภาพยิ่งน้อยยิ่งดีของค่าอัตราการสึกหรอ พบว่า สภาวะการทดลองลำดับที่ 7 ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งมีค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ 0.0582 กรัม



(ก) (ข)

ภาพที่ 3 ผลกระทบสำหรับอัตราส่วน S/N

(ก) ค่าความแข็ง (ข) ค่าอัตราการสึกหรอ

ตารางที่ 4 ผลการทดลองหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานโดยวิธีทากูชิ

Experiments	Hardness (HRC)	S/N Ratio	Wear loss (g)	S/N Ratio
1	43.64	32.7977	0.0997	20.0261
2	9.48	19.5362	0.3993	7.9740
3	13.36	22.5161	0.3241	9.7864
4	50.24	34.0210	0.0684	23.2989
5	7.16	17.0983	0.4326	7.2783
6	52.51	34.4048	0.0615	24.2225
7	54.12	34.6672	0.0582	24.7015
8	45.97	33.2495	0.0826	21.6604
9	49.25	33.8481	0.0713	22.9382

4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองนี้ กำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง จากผลการทดลองดังตารางที่ 5 พบว่า ค่า P-Value ของปัจจัยอุณหภูมิชุบผิวแข็งมีค่าเท่ากับ 0.04 ระยะห่างของหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.03 และความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.05 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าทุกปัจจัยส่งผลต่อค่าความแข็งของผิวชิ้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าอัตราการสึกหรอ พบว่า ค่า P-Value ของปัจจัยอุณหภูมิชุบผิวแข็งมีค่าเท่ากับ 0.04 ระยะห่างของหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.03 และความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 0.05 ตามลำดับ ซึ่งค่า P-Value ของทุกปัจจัยมีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าทุกปัจจัยส่งผลต่อค่าอัตราการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperature	2	1145.19	572.59	26.34	0.04
Distance from the nozzle	2	1234.65	618.32	28.44	0.03
Speed	2	759.00	379.50	17.46	0.05
Error	2	43.48	21.74		
Total	8	3184.32			

Remark S = 4.66265 R-sq = 98.63% R-sq(pred) = 72.35%

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าอัตราการสึกหรอ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperature	2	0.062668	0.031334	22.03	0.04
Distance from the nozzle	2	0.081799	0.040900	28.76	0.03
Speed	2	0.054380	0.027190	19.12	0.05
Error	2	0.002844	0.001422		
Total	8	0.201691			

Remark S = 0.0377099 R-sq = 98.59% R-sq(pred) = 71.45%

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการชุบผิวแข็งเฟืองโซ่ด้วยเปลวไฟ โดยกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ 750 850 และ 950 องศาเซลเซียส ระยะห่างของหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงาน 10 20 และ 30 มิลลิเมตร ความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงาน 2 4 และ 6 รอบต่อนาที สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดคือ อุณหภูมิชุบผิวแข็ง 950 องศาเซลเซียส ระยะห่างของหัวฉีดแก๊สกับชิ้นงาน 30 มิลลิเมตร และความเร็วรอบการหมุนของชิ้นงาน 2 รอบต่อนาที โดยให้ค่าความแข็ง (HRC) เท่ากับ 54.12 และค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานเท่ากับ 0.0582 กรัม ซึ่งจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงให้เห็นว่าทุกปัจจัยส่งผลต่อกระบวนการชุบผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยเปลวไฟอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chucheep *et al*. (2017) ที่ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิชุบแข็งที่ส่งผลต่อความแข็งและการสึกหรอของเหล็กกล้าใบเลื่อยสายพาน ด้วยวิธีการชุบแข็งด้วยเปลวไฟ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิผิวสูงสุดมีผลต่อการเพิ่มความแข็งและลดการสึกหรอของชิ้นงาน และ Jeyaraj *et al*. (2015) ได้ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ของการชุบแข็งด้วยวิธีทากูชิ โดยใช้พารามิเตอร์หลักได้แก่ อุณหภูมิชุบแข็งที่ผิวชิ้นงาน ระยะห่างของหัวเชื่อม และเวลาเย็นตัวของชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงานทดลองมีความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 242 HV (~20.5 HRC) ถึงความแข็งสูงสุด 801 HV (~64 HRC) ซึ่งแสดงเห็นว่าทุกพารามิเตอร์มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามภายใต้สภาวะการใช้งานจริงของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลคณะผู้วิจัยได้พิจารณาผลของอัตราการสึกหรอ

ของชิ้นงานเข้ามาร่วมด้วย เพื่อส่งผลถึงอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ดังนั้นผลการวิจัยนี้ภายใต้เงื่อนไขค่าความแข็งสูงสุดและอัตราการสึกหรอต่ำสุดสามารถนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ได้ให้ความสนับสนุนสถานที่สำหรับดำเนินการวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

สมนึก วัฒนศรียกุล. (2557). **โลหะวิทยา** (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Asiltürk, I., & Akkuş, H. (2011). Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. **Measurement**, 44(9), 1697–1704.

Chucheep, T., Mahathaninwong, N., Janudom, S., & Wannasin, J. (2017). Effect of Flame Hardening Temperature on Hardness and Wear Properties of Band Saw Steel. **ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports**, 20(1), 67-74.

Dargacz, M., & Starosta, R. (2018). Influence of flame heating parameters on the hardness of hardened C45 steel. **Journal of KONES**, 25.

Dossett, J. L.,& Totten, G. E. (2013). **ASM Handbook, Vol. 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes.** Asm International.

Freeman, K. P., Cook, J. R., & Hooijberg, E. H. (2021). Introduction to statistical quality control. **Journal of the American Veterinary Medical Association**, 258(7), 733-739.

Grönegress, H. W. (2013). **Flame hardening**. Springer Science & Business Media.

Jeyaraj, S., Arulshri, K., Harshavardhan, K., & Sivasakthivel, P. (2015). Optimization of Flame Hardening Process Parameters Using L9 Orthogonal Array of Taguchi Approach. **International Journal of Engineering and Applied Sciences**, 2(3), 257976.

Kim, G. H., Lee, M. K., Kim, G. M., Hong, S. M., Kim, W. W., & Rhee, C. K. (2006).

Optimization of Movable Flame Hardening Process for the Turbine Blade 12Cr Steel. **Solid State Phenomena**, 118, 185–190.

Lee, M. K., Kim, G. H., Kim, K. H., & Kim, W. W. (2004). Control of surface hardnesses, hardening depths, and residual stresses of low carbon 12Cr steel by flame hardening. **Surface and coatings technology**, 184(2-3), 239-246.

Lee, M. K., Kim, G. H., Kim, K. H., & Kim, W. W. (2006). Effects of the surface temperature and cooling rate on the residual stresses in a flame hardening of 12Cr steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 176(1–3), 140–145.

Makrahy, M. M., Ghazaly, N. M., Abd El-Gwwad, K. A., Mahmoud, K. R., & Abd-El-Tawwab, A. M. (2013). Optmization of operation parameteres on a novel wedge disc brake by taguchi method. **American Journal of Vehicle Design**, 1(2), 30-35.

Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y., Taguchi, S., & Yano, H. (2005). **Taguchi's quality engineering handbook**. Wiley-Interscience.

Thipprakmas, S. (2011). Improving wear resistance of sprocket parts using a fine-blanking process. **Wear**, 271(9-10), 2396-2401.

Woldman, M., Tinga, T., Van Der Heide, E., & Masen, M. A. (2015). Abrasive wear based predictive maintenance for systems operating in sandy conditions. **Wear**, 338, 316–324.