

ปัจจัยที่เหมาะสมในการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 5106

Optimization factors in hardening of AISI 5106 carbon steel

สิทธิพงษ์ อุดมบุญญาอนุภาพ¹, นลิน เพียรทอง^{2*}
Sittipong Udomboonyanupap¹, Nalin Pianthong^{2*}

Received: 14 February 2022 ; Revised: 20 July 2022 ; Accepted: 18 August 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการชุบแข็ง เหล็กกล้าคาร์บอน ปัจจัยในการศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิในการชุบ คือ 750, 800 และ 830 °C เวลาในการอบแช่ที่ 2 และ 5 นาที ด้วยสารอบชุบน้ำมัน และน้ำ จากนั้นทำการตรวจสอบความแข็งของชิ้นงาน พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการชุบแข็ง คือที่อุณหภูมิ 764 °C เวลาอบแช่ในการเผา คือ 5 นาที และสารชุบแข็ง คือ น้ำมัน ซึ่งได้ชิ้นงานที่ค่าความแข็งเฉลี่ย 48 HRC นอกจากนี้ยัง พบว่า อุณหภูมิในการชุบส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงาน แต่เวลาอบแช่ในการเผาและสารชุบไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

คำสำคัญ: เหล็กกล้าคาร์บอน AISI 5106 การทดลองแบบแฟกทอเรียล การชุบแข็ง

Abstract

The objective of this research was to determine the optimum factor of the hardening process of carbon steel. The study factors were quenching temperatures at 750, 800 and 830 °C, with 2 and 5 min of holding times, and the quenching media were oil and water. The hardness of the specimens was measured. It was found that the optimal conditions for hardening were at a hardening temperature of 764 °C, hardening for 5 minutes holding using oil quenching. It was found that the average hardness of workpieces was 48 HRC. It was also found that the quenching temperature affected the hardness of the work-piece but the holding times and the quenching medium did not affect the workpiece hardness at 0.05 significance level.

Keywords: AISI 5106 carbon steel, factorial experimental design, hardening

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 ถนน สทลมาร্ক ตำบลเมืองศรีไค
อำเภอวารินชำราบ อุบลราชธานี 34190

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน: Nalin.p@ubu.ac.th

^{1,2} Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, UbonRatchathani University, 85 Sathonlamark Road,
Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani, 34190

* Corresponding author: Nalin.p@ubu.ac.th

บทนำ

เหล็กกล้าคาร์บอนมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรม ทุกภาคส่วนเนื่องจากคุณสมบัติที่มีความยืดหยุ่นต่อกระบวนการผลิตที่ดี ไม่เว้นแม้แต่อุตสาหกรรมระดับชุมชน อาทิ กลุ่มผู้ประกอบการผลิตมีดพริ้วหรืออุปกรณ์ทางการเกษตร ในบรรดาเหล็กกล้าคาร์บอนจำนวนมากเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 5160 หรือเรียกอีกอย่าง คือ เหล็กกล้าสปริงเป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนและโครเมียมปริมาณสูง มักถูกใช้งานในด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยถูกมักใช้ผลิตแหนบรถยนต์ เนื่องจากมีความเหนียวสูง ความแข็งแรง ตลอดจนการทนต่อความล้าที่ดีเยี่ยม (Jaramillo *et al.*, 2019 ; Zambrano *et al.*, 2019 ; Thant *et al.*, 2019) แต่เมื่อถูกใช้งานจนเสื่อมสภาพแล้ว นั้นมักถูกนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น มีดพริ้ว ไขมีดตัด และอุปกรณ์ทางการเกษตร เนื่องจากคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการปรับปรุงทางความร้อนที่ดี (Han *et al.*, 2020 ; Perla *et al.*, 2017) กระบวนการผลิตมีดพริ้วประกอบด้วยกระบวนการขึ้นรูปโดยการตีร้อน การเจียรระในกระบวนการชุบแข็ง และกระบวนการอบคืนไฟ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้มักส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย แต่จากการสังเกตการณ์จากกระบวนการผลิตกลับพบว่ากระบวนการชุบแข็งยังประสบปัญหาต่อผู้ประกอบการ เพราะเป็นกระบวนการ ที่ซับซ้อน จากสาเหตุของปัจจัยในกระบวนการชุบแข็ง เช่น อุณหภูมิในการอบชุบ เวลาในการเผาแซ่หรือแม้แต่สารตัวกลางในการชุบ ปัจจุบันมีรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกระบวนการปรับปรุงทางความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 5160 เช่น Apichai. (2020) ศึกษากระบวนการชุบแข็งที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและโครงสร้างจุลภาคโดยทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิในการชุบและสารตัวกลางในการชุบ จากการตรวจสอบพบว่าอุณหภูมิในการชุบที่ 780 °C ใช้ น้ำเป็นสารตัวกลาง ได้ค่าความแข็งแรงขึ้นงานที่ 40 HRC และลักษณะโครงสร้างจุลภาคพบคาร์ไบต์แทรกขึ้นบนพื้นหลักของมาร์เทนไซต์ Han X *et al.* (2018) ศึกษาการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นเบนไนต์ในกระบวนการออสเทมเปอร์ริงของเหล็ก AISI 5160 โดยทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิในการทำออสเทมเปอร์ริง จากนั้นศึกษาการกระจายตัวของเบนไนต์ภายในโครงสร้างจุลภาค การตรวจสอบพบว่าในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 287-315 องศาเซลเซียส เกิดโครงสร้างเบนไนต์แบบเข็ม (Acicular bainite) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 370-454 องศาเซลเซียส ลักษณะของโครงสร้างเบนไนต์เป็นแบบแผ่น (Feathery bainite) Penha *et al.* (2011) ศึกษาความเร็วในการไหลวนของสารตัวกลางที่ส่งผลต่อความเค้นตกค้างและการบิดงอของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งของเหล็ก AISI 5160 โดยทำการเปรียบเทียบความเร็วในการไหลของน้ำมัน 3 ระดับได้แก่ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง จากการทดลอง

พบว่าอัตราการไหลวนของน้ำมันในการจุ่มชุบระดับกลางให้ผลของความเค้นตกค้างและการบิดงอต่ำสุด และมีอีกหลากหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงตัวแปรของกระบวนการทางความร้อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 5160 (Herbirowo *et al.*, 2019 ; MacKenZie, 2014 ; Lozano *et al.*, 2012)

จากรายงานการศึกษางานวิจัยที่กล่าวถึงเบื้องต้นพบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 5160 ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา สารตัวกลาง หรือแม้แต่ความเร็วในการไหลของสารตัวกลางก็มักส่งผลต่อความแข็งแรงสุดท้ายหลังการชุบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาตัวแปรในการชุบแข็งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental: DOE) เป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ การวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ จะใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) ซึ่งเป็นการศึกษาระดับ (Level) ของพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลคำตอบ (Response) อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยการหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Response Optimization) จะเป็นการหาค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของของผลคำตอบเป็นไปตามที่ต้องการ (Pimenta *et al.*, 2018 ; Bankole *et al.*, 2018) สุภัทรวีร์ ศรีนอก และคณะ (2559) ศึกษาการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแพ็คคาร์โบไรซิงสำหรับการชุบแข็งมีดตัดด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าสามารถวิเคราะห์ปัจจัยในการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และคณะ (2563) ทดลองการชุบแข็งผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในกระบวนการแพ็คคาร์โบไรซิง โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง 2^k พบว่า อิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าคาร์บอน Ramos-Azpeitia *et al.* (2021) ศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการทางความร้อนเหล็กหล่อผสม CA-6NM ด้วยกระบวนการออกแบบการทดลองแบบ และเมื่อทำการทดลองตามการออกแบบการทดลอง สามารถเลือกระดับการทดลองที่เหมาะสมในการปรับปรุงปัจจัยในการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถใช้ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตอื่นๆ (Sathiya *et al.*, 2009 ; Richmire *et al.*, 2018 ; Bitondo *et al.*, 2011 ; Shinde *et al.*, 2021)

จากข้อมูลที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะทำการศึกษาปัจจัยในการชุบแข็งมีดพริ้วของชุมชนผู้ผลิตมีดพริ้ว บ้านนาถ่อนทุ่ง อำเภอลำดวน จังหวัดนครพนม โดยในการศึกษาครั้งนี้เป็นการนำข้อมูลจริงจากผู้ผลิตมาทำการ

ออกแบบการทดลอง โดยทำการศึกษาศาสตร์ตัวกลางในการจุ่มชุบ เวลาในการให้ความร้อน และอุณหภูมิในการชุบ โดยใช้การออกแบบการทดลอง (design of experiments: DOE) ในการวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ในการผลิต และผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิต และผู้ที่สนใจในการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการอบชุบต่อไปในอนาคต

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ใช้ค่าความแข็งเฉลี่ยของมิตที่จำหน่ายในท้องตลาดเป็นเกณฑ์โดยวัดระยะความลึกจากคมมีดเข้าไปในตัวมีด 10 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานของ มผช.82/2546 (ลักษณะ อินทร์ปึ้ง และคณะ, 2020) โดยค่าเฉลี่ยความแข็งของมีดพัวที่ 48 HRC โดยการทดลองในการชุบแข็งมีดพัวมีขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

1. การออกแบบการทดลอง

การหาปัจจัยในการผลิตที่เหมาะสมจะกำหนดค่าความแข็งของมีดพัวหลังการชุบแข็งเป็นผลตอบของการทดลอง ในการศึกษาใช้สารตัวกลางในการชุบเป็นน้ำ และน้ำมัน อุณหภูมิในการชุบที่ 750, 800, 830 °C เวลาในการเผาแช่ที่ 2 และ 5 นาที ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ได้จากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Apichai. 2020 ; Han *et al.*, 2018) ดังนั้นผู้วิจัยจึงแบ่งปัจจัยในการศึกษาดังแสดงใน Table 1

Table 1 Degree of factor in the experiment

Parameter	Level			Unit
	-1	0	+1	
Quenching medium	Water		Oil	-
Holding time	2		5	min
Temperature	750	850	830	°C

จาก Table 1 พบว่ามีปัจจัยในการทดลองอยู่ 3 ปัจจัย แบ่งเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ Low (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง High (+1) เลือกรูปแบบการทดลองแบบ 3 x 2 x 2 (Multilevel factorial design) ซึ่งจะให้อ่านจำนวนครั้งในการทดลองเท่ากับ 12 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทดลองจึงได้จำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 24 การทดลอง ด้วยโปรแกรม Minitab-V19 โดยลำดับการทดลองจะใช้การทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ เช่น บรรยากาศสภาวะแวดล้อมต่างๆ และการวัดความพึงพอใจของผลตอบ (Composite Desirability: D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าอยู่

ระหว่าง 0-1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์

2. การเตรียมชิ้นทดสอบ

เหล็กกล้าคาร์บอนได้จากการนำเหล็กเหนียวชนิดที่ยังไม่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ (Spectrometer) ส่วนผสมทางเคมีแสดงดัง Table 2 จากนั้นทำการเทียบเคียงปริมาณส่วนผสมทางเคมีของเหล็กตามมาตรฐาน AISI โดยทำการคำนวณหาปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon equivalent) ดังแสดงในสมการที่ (1) มีค่าคาร์บอนเทียบเท่าเท่ากับ 0.85 พบว่ามีค่าเทียบเท่ากับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอย จากนั้นให้ผู้ประกอบการตีขึ้นรูปให้เป็นมีดพัว ดังแสดงใน (Figure 1) แล้วนำมาทำการชุบแข็งตามปัจจัยที่ได้ออกแบบไว้ใน Table 4 นำมีดพัวที่ผ่านการชุบมาทำการตัดตามแนวขวางด้วยเครื่องตัดระบบน้ำหล่อเย็น (Micro Cutter) แล้วนำมาหล่อหุ้มเรือนชิ้นงานทดสอบด้วยเรซินสำหรับตรวจสอบความแข็งในการทดสอบความแข็งใช้การกดทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ ด้วยน้ำหนักกด 9.81 kgf. ระยะในการกด 0.5 มิลลิเมตร ทำการกดทั้งหมด 4 จุด ตำแหน่งในการทดสอบแสดงดัง (Figure 1)

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + Si}{5} + \frac{Ni + P + S}{15} \tag{1}$$

Table 2 Chemical composition of specimen

C	Mn	Cr	P	Si	S	Fe
0.53	0.84	0.64	0.026	0.224	0.038	Bal.

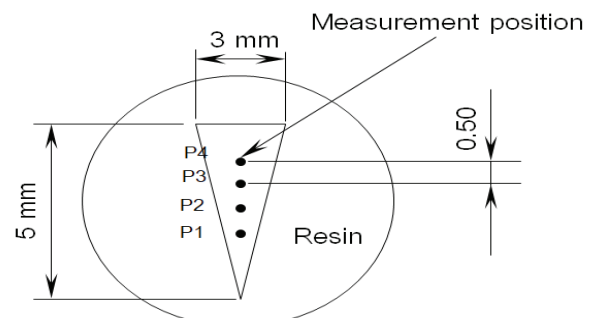
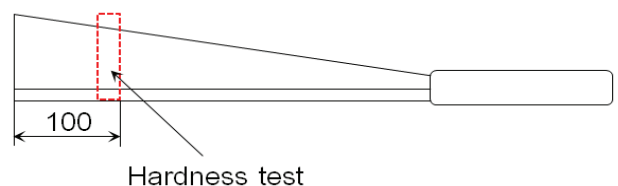


Figure 1 Preparation of test specimen and position of hardness measurement (mm).

3. กระบวนการชุบแข็ง

สำหรับการออกแบบการทดลองชุบแข็งในงานวิจัยนี้ ใช้เตาไฟฟ้าในการให้ความร้อนให้อุณหภูมิสูงสุด 1000-1300°C ควบคุมอุณหภูมิโดย Digital Temperature Controller ให้ความร้อนอ้างอิงจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า โดยในการศึกษาใช้อุณหภูมิในการอบชุบที่ 750, 800 และ 830 °C เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองจากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและคำนวณปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าพบว่าจัดอยู่ในกลุ่มไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ ดังนั้นการเลือกอุณหภูมิในการชุบแข็งจึงพิจารณาอุณหภูมิเหนือเส้น A_{cm} และ A_1 ระยะเวลาในการอบแช่ (X_2) คือ 2 และ 5 นาที พิจารณาจากความหนาของชิ้นงานทดสอบโดยที่ความหนาเฉลี่ยของมีดพริ้วเท่ากับ 3 มม. จากมาตรฐานการอบชุบที่ความหนาของวัสดุในการชุบ 1 นิ้ว ใช้เวลาในการชุบ 30 นาที เมื่อทำการเทียบความหนาของมีดพริ้วกับเวลามาตรฐานจะใช้เวลาในการชุบ 3.54 นาที ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้เวลาดังกล่าวเป็นค่ากลางในการทดลอง โดยให้เอ็นตัวในสารชุบ 2 ประเภท คือ น้ำมัน และน้ำซึ่งเป็นสารตัวกลางในการชุบที่ใช้จริงของผู้ประกอบ

การ ก่อนทำการวัดค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ กระบวนการชุบแข็งแสดงดัง (Figure 2) โดยที่ $X_1 = 75$ sec

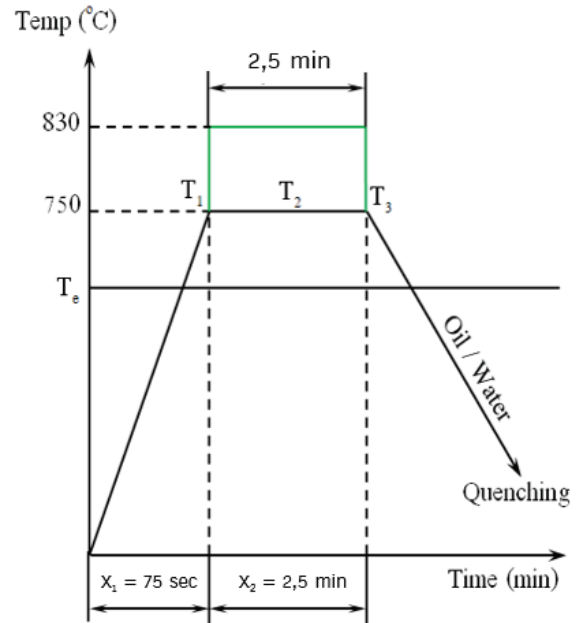


Figure 2 Diagram of heat treatment process.

Table 4 Experimental design table and hardness test experiment results

No.	Run Order	Temperature (°C)	Quenching medium	Holding Time (Min)	Hardness (HRC)					
					P.1	P.2	P.3	P.4	Average	SD
21	1	750	Oil	2	50.50	43.00	40.00	41.00	43.62	4.75
3	2	750	Oil	2	43.00	42.00	40.50	41.00	41.62	1.11
11	3	750	Oil	5	48.00	43.00	45.00	40.00	44.00	3.37
22	4	750	Oil	5	47.00	45.00	43.00	46.00	45.25	1.71
16	5	800	Oil	2	54.00	45.00	60.00	55.00	53.50	6.24
5	6	800	Oil	2	67.00	59.50	48.00	61.00	58.87	7.94
10	7	800	Oil	5	58.00	57.00	55.00	52.00	55.50	2.65
1	8	800	Oil	5	53.00	58.50	54.00	60.00	56.37	3.40
15	9	830	Oil	2	55.50	56.00	47.00	65.50	56.00	7.56
20	10	830	Oil	2	52.00	57.00	50.50	50.00	52.37	3.20
14	11	830	Oil	5	64.00	55.00	50.00	40.00	52.25	10.01
18	12	830	Oil	5	46.00	50.00	56.00	57.50	52.37	5.34
9	13	750	water	2	45.50	48.00	45.00	35.00	43.37	5.74
12	14	750	water	2	43.00	44.00	48.00	41.00	44.00	2.94
4	15	750	water	5	48.00	43.00	45.00	40.00	44.00	3.37
13	16	750	water	5	45.00	42.00	48.50	47.00	45.62	2.81
23	17	800	water	2	53.00	48.00	59.00	51.50	52.87	4.59
17	18	800	water	2	55.00	71.00	63.50	78.00	66.87	9.89
8	19	800	water	5	62.00	65.00	55.00	49.00	57.75	7.18
6	20	800	water	5	50.00	62.00	58.00	57.00	56.75	4.99

Table 4 Experimental design table and hardness test experiment results (cont.)

No.	Run Order	Temperature (°C)	Quenching medium	Holding Time (Min)	Hardness (HRC)					
					P.1	P.2	P.3	P.4	Average	SD
24	21	830	water	2	51.50	51.50	53.00	58.00	53.50	3.08
7	22	830	water	2	48.00	60.00	48.50	51.00	52.21	5.57
19	23	830	water	5	63.00	45.50	53.00	55.00	54.12	7.19
2	24	830	water	5	76.00	53.00	52.00	60.00	60.25	11.09

ผลการทดลอง

ผลการตรวจสอบค่าความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานการทดสอบ พบว่ามีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 41.62-66.87 HRC ดัง Table 4 การวิเคราะห์ความสำคัญของปัจจัยแบบจำลองการถดถอยที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ แสดงดัง Table 5 พบว่าค่า P-Value ของเวลาในการอบแช่และสารตัวกลางในการชุบมีค่ามากกว่า 0.05 โดยนัยสำคัญแสดงว่าเวลาในการอบแช่และสารตัวกลาง ในการชุบไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งสำหรับการชุบแข็งมีดพัว แต่ในทางตรงกันข้ามจากการวิเคราะห์ปัจจัยการทดลองทั้งหมด อุณหภูมิในการอบชุบมีค่า P-Value เท่ากับ

0.00 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งให้เห็นว่าอุณหภูมิในการชุบส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นของการทดลองร้อยละ 77.07 สาเหตุเกิดจากอุณหภูมิมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิออสเทนไนต์ และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์จากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มสารชุบ ส่วนสาเหตุที่ทำให้ความแข็งของชิ้นงานแตกต่างกัน เกิดจากความแตกต่างของปริมาณโครงสร้างมาเทนไซต์ โครงสร้างที่เปลี่ยนเป็นเฟสมาร์เทนไซต์มากกว่า จะมีค่าความแข็งมากกว่าซึ่งเกิดขึ้นที่ปลายมีด ส่วนที่ระยะห่างจากปลายมีดอุณหภูมิจะต่ำกว่า ทำให้ความแข็งลดลง

Table 5 Analysis of Variance for hardness, using adjusted SS for tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Temperature	2	802.751	802.751	401.376	40.79	0.000
Holding Time	1	0.548	0.548	0.548	0.06	0.818
Quenching medium	1	19.037	19.037	19.037	1.93	0.190
Temperature*Holding Time	2	15.162	15.162	7.563	0.77	0.485
Temperature*Quenching medium	2	5.652	5.652	2.826	0.29	0.755
Holding Time*Quenching medium	1	0.709	0.709	0.709	0.07	0.793
Temperature*Holding Time*Quenching medium	2	25.293	25.293	12.646	1.29	0.312
Error	12	118.086	118.086	9.840		
Total	23	987.202				

S = 3.13696 R-Sq = 88.04% R-Sq(adj) = 77.07%

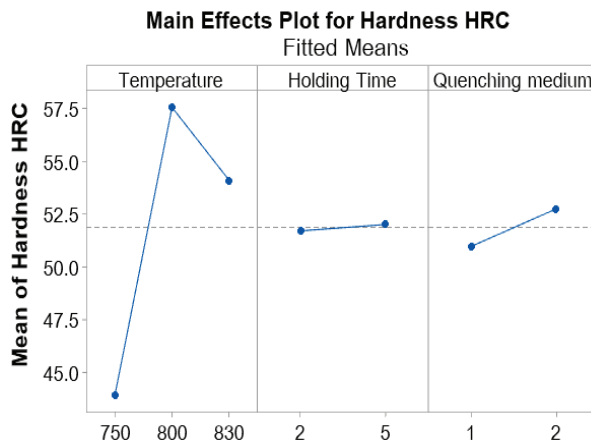


Figure 3 The main effect plot of factor.

Figure 3 แสดงผลกระทบหลักในการชุบพบว่า อุณหภูมิในการชุบส่งผลต่อความแข็งของชิ้นงานสูงสุดรองลงมาเป็นสารตัวกลางในการชุบ และเวลาในการชุบตามลำดับ Figure 4 (a-c) แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสาม คือ อุณหภูมิ เวลาและสารตัวกลางในการชุบมีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดลองโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิกับเวลา ดังแสดงใน Figure 4(a) ส่วน Figure 4(b) แสดงความสัมพันธ์ของสารชุบกับอุณหภูมิ และ Figure 4(c) เป็นความสัมพันธ์ของสารชุบและเวลาในการอบ จากการออกแบบการทดลองเบื้องต้นเพื่อคัดกรองปัจจัยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานตัวอย่าง คือ 1) อุณหภูมิในการอบชุบ 2) เวลาในการอบแช่ 3) สารตัวกลางในการชุบ โดยนำปัจจัยทั้งสามปัจจัยไปทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ต่อไป

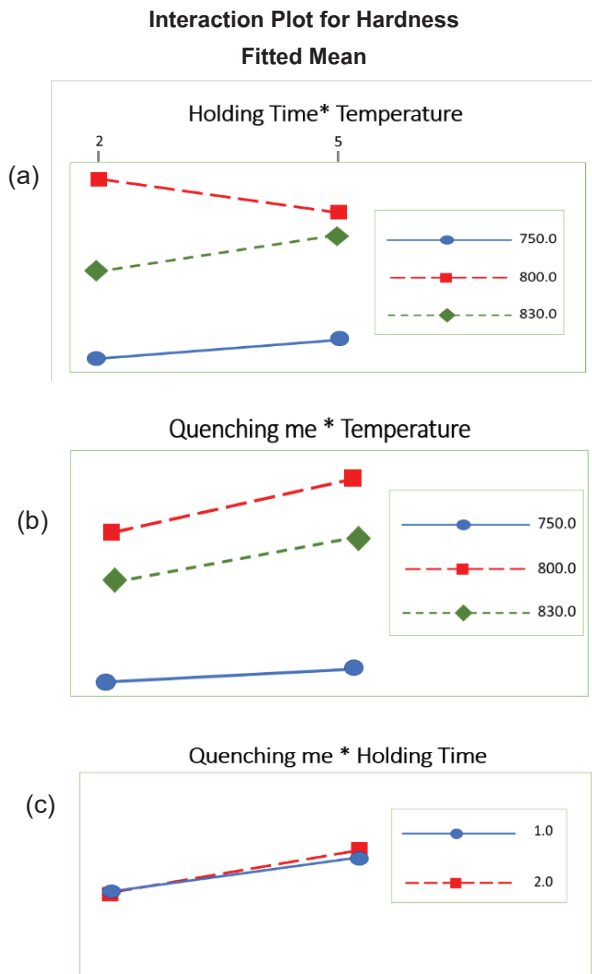


Figure 4 The interaction plot of factor.

Figure 5 แสดงค่าที่เหมาะสมของปัจจัยและการวัดค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลลัพธ์ ค่าปัจจัยในการชุบแข็งที่เหมาะสมจากการคำนวณของโปรแกรมสำหรับการออกแบบการทดลองโดยกำหนดค่าเป้าหมายเท่ากับ 48 HRC คือ อุณหภูมิในการอบชุบที่ 764°C เวลาในการอบแช่ ที่ 5 นาที สารตัวกลางชนิดน้ำมันโดยที่ความพึงพอใจโดยรวม D = 1

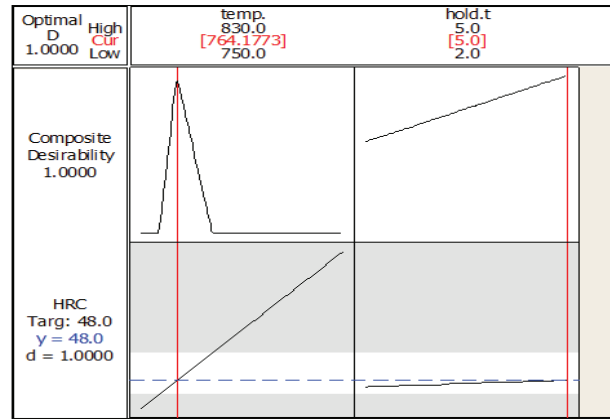


Figure 5 The optimum point of the factor in the hardening

ในการศึกษาปัจจัยของกระบวนการชุบที่ส่งผลต่อความแข็งของมีดพบว่าจาก Table 4 ให้ค่าความแข็งสูงสุดถึง 66.87 HRC ซึ่งเป็นค่าความแข็งที่สูงเกินไปทำให้ค่าความแกร่ง (Toughness) ของคมมีดต่ำเกินไป เมื่อนำไปใช้งานส่งผลให้เกิดการเสียหายได้ง่ายเนื่องจากเกิดการแตกหักแบบเปราะ จากการศึกษาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมในการใช้งานอยู่ในช่วงค่าความแข็งเฉลี่ย 48-50 HRC ดังนั้นการศึกษานี้จึงกำหนดค่าเป้าหมายของค่าความแข็งที่ 48 HRC เป็นค่าที่เหมาะสมของการทดลอง

การยืนยันผลการทดลอง

การดำเนินการยืนยันผลทดลอง โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายค่าความแข็ง คือ อุณหภูมิในการอบชุบที่ 764 °C เวลาในการอบแช่ที่ 5 นาที ใช้ น้ำมันเป็นสารตัวกลาง ในการชุบ ให้ค่าความแข็งเท่ากับ 48 HRC จากนั้นทำการทดลองซ้ำในปัจจัยดังกล่าวจำนวน 3 ครั้ง แล้วเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งอย่างละ 3 ชิ้น และได้ค่าเฉลี่ยความแข็งเท่ากับ 50.07 HRC โดยรวมของค่าความแข็งจากการทดลองเพื่อยืนยันผลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ มีค่าความผิดพลาดโดยรวมของค่าความแข็งเพียง 4.11% ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทำนาย แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แสดงใน Table 6

Table 6 Confirmation Analysis for the hardness at the optimal condition

Test	Hardness (HRC)			Hardness (HRC)
	No.1	No.2	No.3	
1	50.4	49.3	49.8	49.83
2	49.7	50.6	49.4	49.90
3	50.6	49.7	51.2	50.50
Total				50.07

สรุปผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การปรับปรุงเงื่อนไขในการชุบแข็งมีดพริ้วตาม ปล้องโดยใช้ค่าที่เหมาะสมซึ่งได้จากการออกแบบการทดลอง จำนวน 24 การทดลอง และนำชิ้นงานจากการทดลองไป ตรวจสอบค่าความแข็งแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ผลสรุปว่า

1. การทดลองทั้งหมดอุณหภูมิในการอบชุบมีค่า p-value เท่ากับ 0.00 ซึ่งให้เห็นว่าอุณหภูมิในการชุบส่งผล ต่อค่าความแข็งที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีค่า R-Sq(adj) 77.07% นั่นคือความแปรปรวนของค่าความแข็ง อธิบายได้ ด้วยอุณหภูมิในการอบชุบ ร้อยละ 77.07

2. เวลาในการอบแช่และสารตัวกลางในการชุบมีค่า p-value เท่ากับ 0.818 และ 0.190 ตามลำดับ แสดงว่า ไม่ส่งผล ต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และในส่วน เทอมอันตรกิริยาค่าความแปรปรวนสองทางพบว่าไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับ 0.05 กล่าวได้ว่าสารชุบไม่ส่งผลต่อความแข็ง เนื่องจาก บริเวณสันคมตัดมีปริมาณเนื้อโลหะน้อยการถ่ายเทความร้อน จึงไม่แตกต่างกันระหว่างน้ำและน้ำมัน นอกจากนี้ยังพบว่า โลหะชุบยังมีปริมาณ Cr และ C สูงจึงส่งผลให้ความสามารถในการชุบแข็งเพิ่มขึ้น

3. ปัจจัยในการชุบแข็งที่เหมาะสมจากการคำนวณ ของโปรแกรมสำหรับการออกแบบการทดลองนี้ คือ อุณหภูมิ ในการอบชุบ 764 °C เวลาในการอบแช่ที่ 5 นาที ใช้ น้ำมัน เป็น สารตัวกลางในการชุบ โดยค่าสำหรับการทำนาย (Predicted Response: y) ความแข็งหลังการชุบแข็งมีดพริ้วเท่ากับ 48 HRC โดยที่ y คือ ค่าแปลงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งของ ชิ้นงานตัวอย่างที่ความพึงพอใจโดยรวม $D = 1$

เอกสารอ้างอิง

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, สมบัติ น้อยมิ่ง, ศักดิ์สิทธิ์ ศรีสุข, วรณดา หอมจะบก, อมรศักดิ์ มาใหญ่ และ จารุพงษ์บรรเทา. (2563). ปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิและ เวลาการอบ เพิ่มคาร์บอนที่มีต่อสมบัติเชิงกลของมีดตัดที่ชุบแข็งใน กระบวนการแพ็คคาร์โบไรซิงโดยใช้กระดูกวัวเป็นสาร เร่งปฏิกิริยา. *Journal of Science & Technology MSU*, 39(3), 273-283.

สุภัทรวិทย์ ศรีนอก, ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนา, รสรินทร์ ตือขุนทด, สมบัติ น้อยมิ่ง, ชัยวัฒน์ พิรทัตสุวรรณ และ อมรศักดิ์ มาใหญ่. (2559). การหา พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการแพ็คคาร์โบไรซิง โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาจากผงหินปูนสำหรับการชุบแข็ง มีดตัดอ้อย. *การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรม อุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2559 ภาควิศวกรรม อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ขอนแก่น*, (หน้า 1205-1210).

ลักขณา อินทร์บึง, อารดา ชัยเสนา, & รัชดา ภักดิ์ยิ่ง. (2020). ปัจจัยแห่งความสำเร็จของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ที่ได้ รับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน จังหวัดขอนแก่น. *Journal of Roi Kaensarn Academi*, 5(2), 1-12.

Apichai, P. (2020). Effects of quenchants on microstructures and mechanical properties of steel grade AISI 5160. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 30(3).

Bankole, M. T., Mohammed, I. A., Abdulkareem, A. S., Tijani, J. O., Ochigbo, S. S., Abubakre, O. K., & Afolabi, A. S. (2018). Optimization of supported bimetallic (Fe-Co/CaCO₃) catalyst synthesis parameters for carbon nanotubes growth using factorial experimental design. *Journal of Alloys and compounds*, 749, 85-102.

Bitondo, C., Prisco, U., Squilace, A., Buonadonna, P., & Dionoro, G. (2011). Friction-stir welding of AA 2198 butt joints: mechanical characterization of the process and of the welds through DOE analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(5), 505-516.

Han, X., Barber, G., Zhang, Z., Wang, B., Zhu, J., Shi, J., & Sun, X. (2018). Austenite-Bainite transformation kinetics in Austempered AISI 5160 Steel. *European Scientific Journal*, 14.

Han, X., Zhang, Z., Hou, J., Barber, G. C., & Qiu, F. (2020). Tribological behavior of shot peened/austempered AISI 5160 steel. *Tribology International*, 145, 106197.

Herbirowo, S., Hartadi, S., Widodo, R. D., & Adjiantoro, B. (2019). Optimization of mechanical strength and microstructure on Austempering zinc heat treatment in lateritic nickel steels *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 20(4), 144-148.

Jaramillo, S., H. E., de Sánchez, N. A., & Avila D, J. A. (2019). Effect of the shot peening process on the fatigue strength of SAE 5160 steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(12), 4328-4335.

Lozano, D. E., Mercado-Solis, R. D., Colás, R., Canale, L. F., & Totten, G. E. (2012). Surface temperature and heat transfer coefficient determination during quenching for martensite fraction prediction using a parabolic heat transfer model. In *6th Int. Quenching and Control of Distortion Conf.* (pp. 341-348).

- MacKenzie, D. (2014). Selection of oil quenchants for heat treating processes. *International Heat Treatment and Surface Engineering*, 8(1), 8-14.
- Penha, R. N., Canale, L. C., & Chiqueti, C. M. (2011). *Influence of agitation rate on residual stresses and distortion on Quenched AISI 5160 Steel (No. 2011-36-0148)*. SAE Technical Paper.
- Perla, S., Kulkarni, S., Balachandran, G., & Balasubramanian, V. (2017). Influence of section size and grain size on the microstructure evolution and mechanical properties in steel grade AISI 5160. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(9), 2449-2458.
- Pimenta, C. D., Silva, M. B., de Moraes Campos, R. L., & de Campos Junior, W. R. (2018). Desirability and design of experiments applied to the optimization of the reduction of decarburization of the process heat treatment for steel wire SAE 51B35. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 7(1), 35-44.
- Ramos-Azpeitia, M., Ruiz-Ochoa, J. A., Hernandez-Rivera, J. L., & Perez-Alonso, C. A. (2021). Heat treatment optimization of CA-6NM cast alloy using a full factorial design of experiments approach. *International Journal of Metalcasting*, 15(1).
- Richmire, S., Hall, K., & Haghshenas, M. (2018). Design of experiment study on hardness variations in friction stir welding of AM60 Mg alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(3), 215-228.
- Sathiya, P., Aravindan, S., Haq, A. N., & Paneerselvam, K. (2009). Optimization of friction welding parameters using evolutionary computational techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5), 2576-2584.
- Shinde, G. V., & Arakerimath, R. R. (2021). Multi-response optimization of friction stir welding process of dissimilar AA3003-H12 and C12200-H01 alloys using full factorial method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. Thant, K. K., Zaw, C. W. Y., & Zar, K. T. (2019, 31 August). *Stresses analysis on spur gear for different contact ratio*. European Aviation Safety Agency.
- Zambrano, O. A., Gómez, J. A., Coronado, J. J., & Rodríguez, S. A. (2019). The sliding wear behavior of steels with the same hardness. *Materials Science; Wear*, 418, 201-207.