อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการอบคืนไฟต่อคุณสมบัติเชิงกลของมีดโต้
Optimal tempering process on mechanical properties of chopping knife

สมบัติ น้อยมิ่ง[1*], วรรณา หอมจะบก[2], มาโนช ริทินโย[3], ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ[4]
Sombut Noyming[1*], Wanna Homjabok[2], Manote Rithniyo[3], Narongsak Thammachot[4]

Received: 23 January 2021 ; **Revised**: 13 September 2021 ; **Accepted**: 30 September 2021

บทคัดย่อ
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของมีดโต้ที่ผ่านกระบวนการอบคืนไฟ ทำการทดลองชุบแข็งมีดโต้ด้วยกระบวนการอบคืนไฟ โดยการนำเหล็กแหนบมาตีขึ้นรูปให้มีรูปทรงเดียวกับมีดโต้ของชุมชน ซึ่งได้นำคุณสมบัติเชิงกลของมีดโต้ที่ประกอบด้วยค่าความแข็งและความต้านทานแรงกระแทกมาเปรียบเทียบมีดโต้ที่ตีขึ้นรูปและผ่านการชุบแข็งจากชุมชน ในส่วนการวิเคราะห์ผลการทดลองการอบชุบทางความร้อนโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง (DOE) มาวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมตามหลักการทางสถิติ ปัจจัยในการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ปัจจัย โดยปัจจัยแรก คือ อุณหภูมิในการอบคืนไฟมีอยู่ 3 ระดับ ได้แก่ 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่สอง คือ เวลาอบคืนไฟมีอยู่ 3 ระดับ ได้แก่ 60, 90 และ 120 นาที ผลจากการวิเคราะห์ พบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิอบคืนไฟ คือ 200 องศาเซลเซียส เวลาในการอบคืนไฟ คือ 83 นาที โดยค่าความแข็งเฉลี่ย 579.9 HV และค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ยต่ำสุด 35.8 Joules ผลของการอบคืนไฟเพื่อยืนยันผลโดยใช้อุณหภูมิและเวลาอบคืนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสม ได้ค่าความแข็งเฉลี่ย 549.9 HV และค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ย 38.8 Joules ซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงกลของชุมชนตีมีดที่สอดคล้องตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนตีมีด

คำสำคัญ: อบคืนไฟมีดโต้ อุณหภูมิอบคืนไฟ เวลาอบคืนไฟ

Abstract
The objective this research was to study the optimization of the time factors that effected the mechanical properties of the of hardened chopping knife in the tempering process. The mechanical properties were hardness and impact values. The experiment was conducted by forging the chopping knife made from medium carbon steel with the same shape as community chopping knife. The principle of Design of Experiment (DOE) was used to design the experimental and analyze the optimization by statistics. There were two factors in this study, tempering temperature and tempering time. The tempering temperature consists of three levels at 180, 200 and 220°C, and also, the tempering time consists of

[1] อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, จังหวัดนครราชสีมา, 30000
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, จังหวัดนครราชสีมา, 30000
[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, จังหวัดนครราชสีมา, 30000
[4] รองศาสตราจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, จังหวัดนครราชสีมา, 30000
[1] Lecturer, Department of Material Engineering, Faculty of Engineering and Architecture. Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima 30000
[2] Assistant Professor, Department of Material Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima 30000
[3] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima 30000
[4] Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima 30000
* Corresponding author ; Sombut Noyming, Material Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima, 30000, Thailand. E-mail: sombut.no@rmuti.ac.th, 081-2654795

three levels such as 60, 90 and 120 minutes. The number of trials was 9 times, and in order to ensure the accuracy of the data for all factors, the experiment was repeated 5 times. The analyzed results showed that the tempering temperature was 200 °C and the optimized tempering time was 83 minutes. These conditions resulted in an average hardness of 579.9 HV and the minimum average impact value of 35.8 Joules. The optimum values of tempering temperature and time were used for verification. The result of average hardness was 549.9 HV and the average impact value was 38.8 Joules, which coincided with the cutting edge Thai community Product Standard

Keywords: chopping knife tempering, tempering temperature, tempering time

บทนำ

ปัจจุบันมีดทางการเกษตรส่วนใหญ่นั้นจะถูกตีขึ้นรูปจากเหล็กแหนบและเหล็กใบเลื่อย เนื่องจากเหล็กทั้งสองชนิดนี้มีปริมาณคาร์บอนที่สูงสามารถนำมาชุบแข็งได้ จากการศึกษาชุมชนตีมีดมีดทางการเกษตร จังหวัดนครราชสีมา พบว่ามีดที่ผ่านการตีขึ้นรูปยังมีองค์ประกอบอีกหลายอย่างในการปรับปรุงคุณสมบัติของมีดเพื่อให้มีความคงทนมีคุณสมบัติทางด้านความแข็งและความเหนียวยืดอายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มคุณสมบัติทางด้านความเหนียว เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สามารถนำมาปรับปรุงคุณสมบัติหลังจากการใช้กระบวนการชุบแข็ง โดยใช้กระบวนการทางความร้อนมาปรับปรุง มนัส สถิรจินดา (2540) ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอน ที่ผ่านกระบวนการอบคืนไฟ ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ (2556) ซึ่งในกระบวนการนี้จะส่งผลต่อค่าความแข็งให้ลดลงเล็กน้อยและความเหนียวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมาร์เทนไซต์ Kumara (2003) ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลขณะทำการอบคืนไฟจะมีความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อค่าความแข็งและความสามารถในการรับแรงกระแทก จากการศึกษางานวิจัยของวรรณา หอมจะบก และคณะ (2558) พบว่ามีดโต้ที่ผ่านการตีขึ้นรูปจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยผ่านการอบเพิ่มคาร์บอนด้วยกระบวนการแพ็กคาร์เบอไรซิง เปรียบเทียบกับมีดโต้ที่ผลิตจากเหล็กแหนบในท้องตลาด จากผลการทดลองพบว่า มีดโต้ที่ผลิตจากเหล็กแนบจะประกอบไปด้วยโครงสร้างคาร์ไบด์กระจายตัวบนเนื้อพื้นโครงสร้างมาเทนไซต์ โดยโครงสร้างคาร์ไบด์จะมีขนาดเล็กลง เมื่อมีระยะลึกเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มีดมีความเปราะ คุณสมบัติในการรับแรงกระแทกลดน้อยลง ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยของณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และคณะ (2562) พบว่ามีดโต้ที่ผลิตจากภูมิปัญญาของชุมชนตีมีด 4 จังหวัดในประเทศไทย ค่าความแข็งของมีดโต้มีความแตกต่างกัน โดยมีดโต้ของจังหวัดพระนครศรีอยุธยามีความแข็งสูงสุด รองลงมาคือมีดโต้จากจังหวัดนครราชสีมา น่าน และต่ำสุดคือมีดโต้จากจังหวัดสงขลา จะเห็นได้ว่ามีดโต้ที่ทำการชุบแข็งเสร็จแล้วนั้นค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 450-600 HV จากปัญหาที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากขั้นตอนการชุบแข็งมีดเพราะการชุบแข็งแต่ละครั้งจะใช้ประสบการณ์ในการชุบแข็งโดยค่าความแข็งที่ได้จะไม่เท่ากัน ซึ่งค่าความแข็งของเหล็กที่ใช้ทำมีดโต้นั้น จะขึ้นอยู่กับลักษณะของปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็ก โดยการทดสอบค่าความแข็งจะใช้ปริมาณค่าคาร์บอนเป็นหลักในการคำนวนค่าความแข็ง โดยกำหนดปริมาณค่าคาร์บอน 0.3-0.5 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน จะใช้ค่าความแข็งอยู่ที่ 550 HV จากการศึกษางานวิจัย (สิทธิพงษ์ อุดมบุญญานุภาพ และนลิน เพียรทอง, 2557) พบว่าปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการตีมีดด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ เพื่อให้มีดที่ผ่านการตีขึ้นรูปมีขนาดที่สม่ำเสมอสามารถให้ค่าคุณสมบัติเชิงกลของมีดตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ในขณะเดียวกันมีนักวิจัยได้นำหลักการสถิติมาประยุกต์ใช้ในการชุบแข็งมีดทางการเกษตร จากการศึกษางานวิจัยของศักดิ์สิทธิ์ ศรีสุข และคณะ (2560) พบว่าได้ศึกษาการออกแบบการทดลองของปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของมีดโต้ที่ผ่านขั้นตอนการชุบแข็งด้วยกระบวนการแพ็กคาร์เบอไรซิง ทำให้ทราบว่าปัจจัยของอุณหภูมิและเวลามีผลต่อสมบัติเชิงกล โดยจากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่าการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิตินั้น Montgomery (2013) สามารถนำมาหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติของมีดโต้ด้วยการอบคืนไฟ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลมีดโต้ที่ผ่านการอบคืนไฟ ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถทำการเลือกใช้ปัจจัยของอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการอบคืนไฟมีดโต้ที่ผ่านการชุบแข็งให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการศึกษา

วัสดุ

- เหล็กแหนบ
- มีดโต้ของชุมชนที่ผ่านการตีขึ้นรูปและชุบแข็ง ดังแสดงใน Figure 1

Figure 1 Shape of community big knife

อุปกรณ์

- เตาอบชุบด้วยความร้อนขดลวดความต้านทาน ยี่ห้อ SNOL รุ่น IP 20
- เครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ Leeds รุ่น LS102DE
- เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ยี่ห้อ Matsuzawa รุ่น MHT2
- เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบ ยี่ห้อ METKON รุ่น Q-3A
- เครื่องตรวจสอบปริมาณธาตุผสม ยี่ห่อ METEX รุ่น MAX x LMF 05

วิธีการศึกษา

การเตรียมมีด

มีดโต้ที่ใช้สำหรับนำมาทำการอบคืนไฟ เตรียมโดยการนำเหล็กแหนบที่มีลักษณะแบนมาตีขึ้นรูปให้มีรูปร่างและขนาดเช่นเดียวกับมีดโต้ชุมชน ดังแสดงใน Figure 2 จากนั้นทำการทดลองด้วยกระบวนการอบคืนไฟเรียบร้อยแล้วจะตัดเฉพาะส่วนที่เป็นตัวมีดที่ถูกใช้งาน คือ มาทำการทดลอง หลังจากการอบคืนไฟเสร็จ ชิ้นทดสอบที่จะทำการทดสอบความแข็งจะตัดจากส่วนที่ 1 ขนาด 20´ 20 มิลลิเมตร และชิ้นทดสอบที่จะทำการทดสอบการรับแรงกระแทกจะตัดจากส่วนที่ 2 ขนาด 20 ´ 70 มิลลิเมตร

Figure 2 The big knife made of low carbon steel and positions for test pieces

การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

เหล็กแหนบที่ใช้ในการตีขึ้นรูปมีดโต้ จะถูกนำมาตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุผสม (Optical Emission Spectrometer : OES) ยี่ห้อ MAX x รุ่น LMF 05 เพื่อให้ทราบปริมาณคาร์บอนและธาตุผสมอื่นๆ ในเนื้อเหล็ก

กระบวนการอบคืนไฟ

มีดโต้ที่ถูกตีขึ้นรูปจากเหล็กแหนบตามขนาดและรูปร่างของมีดทางชุมชน นำมาผ่านการอบคืนไฟ ซึ่งเป็นการนำมีดโต้ที่ผ่านกระบวนการตีขึ้นรูปพร้อมชุบแข็งมาแล้ว จากนั้นทำการทดลองด้วยกระบวนการอบคืนไฟที่เวลา 60, 90 และ 120 นาที ซึ่งในการพิจารณาตามระดับอุณหภูมิในการอบคืนไฟจะใช้อุณหภูมิในการอบคืนไฟที่อุณหภูมิต่ำ เพราะเหมาะสมกับเหล็กกล้าคาร์บอนที่ผ่านการชุบผิวแข็งโดยนำมีดโต้ไปทำการอบคืนไฟ (Tempering) ที่อุณหภูมิ 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส ในการเลือกอุณหภูมิช่วงการทดลองนี้ดังแสดงใน Figure 3

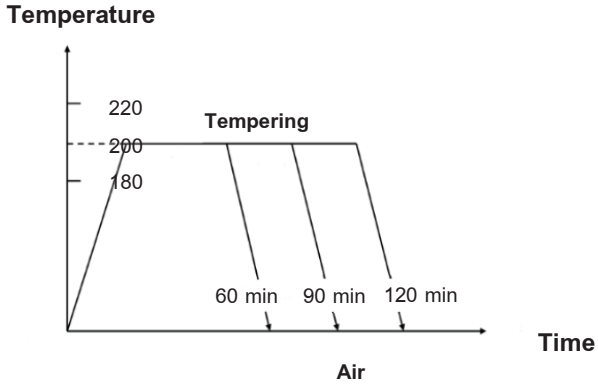


Figure 3 Time-temperature sequence for experiment

การออกแบบการทดลอง

เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของมีดโต้ด้วยกระบวนการอบคืนไฟ โดยให้มีความสอดคล้องตามหลักการทางสถิติ จึงนำการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบมาใช้ศึกษาของปัจจัย (Full factorial design) โดยกำหนดให้ค่าความแข็งเป็นผลคำตอบของการทดลอง เพราะความแข็งเป็นผลที่นำมาพิจารณาคุณภาพของมีดโต้ภายหลังจากกระบวนการอบคืนไฟ ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษามีอยู่ 2 ปัจจัย ดังแสดงใน Table 1 ประกอบไปด้วย ปัจจัยแรก คือ อุณหภูมิอบคืนไฟ และปัจจัยที่สอง คือ เวลาอบคืนไฟ

Table 1 Parameters and notations

Factors	Level			Unit
	Low (-1)	Medium (0)	High (+1)	
1. Tempering Temp (A)	180	200	220	ºC
2. Tempering Time (B)	60	90	120	min

จากปัจจัยในการทดลองที่มีอยู่ 2 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยมีอยู่ 3 ระดับ จะได้จำนวนครั้งในการทดลองเท่ากับ 9 ครั้ง และเพื่อให้เกิดความแม่นยำของข้อมูลในทุกปัจจัยจึงมีการทดลองทำซ้ำ 5 ครั้ง ดังนั้นการทดลองทั้งหมดจะเท่ากับ 45 การทดลอง ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Design table showing the randomized run order of the experiment

Run Order	Std Order	Temperature (°C)	Time (Min)
1	10	180	60
2	14	200	90
3	18	220	120
4	17	220	90
5	15	200	120
6	11	180	90
7	13	200	60
8	12	180	120
9	16	220	60
10	42	200	120
11	44	220	90
12	37	180	60
13	41	200	90
14	38	180	90
15	40	200	60
16	45	220	120
17	39	180	120
18	43	220	60
19	25	220	60
20	20	180	90
21	19	180	60
22	22	200	60
23	21	180	120
24	23	200	90
25	24	200	120
25	26	220	90
27	27	220	120
28	3	180	120
29	7	220	60
30	4	200	60
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
45	28	180	60

การเตรียมชิ้นทดสอบ

นำมีดที่ผ่านการตีขึ้นรูปเป็นมีดโต้ มาทำการตรวจสอบปริมาณคาร์บอน และส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุผสม ดังแสดงใน Figure 4 ก่อนนำไปทำการทดสอบการอบคืนไฟโดยนำชิ้นงานขัดผิวหน้าของเหล็กด้วยกระดาษทรายจากนั้นล้างด้วยแอลกอฮอล์ เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นทดสอบ แล้ววิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนและธาตุประกอบอื่นๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุผสม รุ่น MAX x LMF 05 ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ทดสอบ 3 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ย

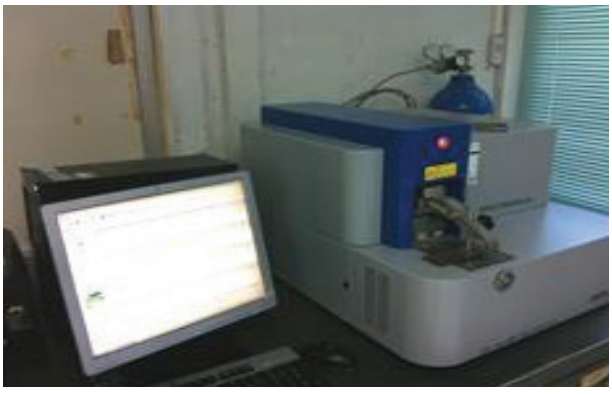
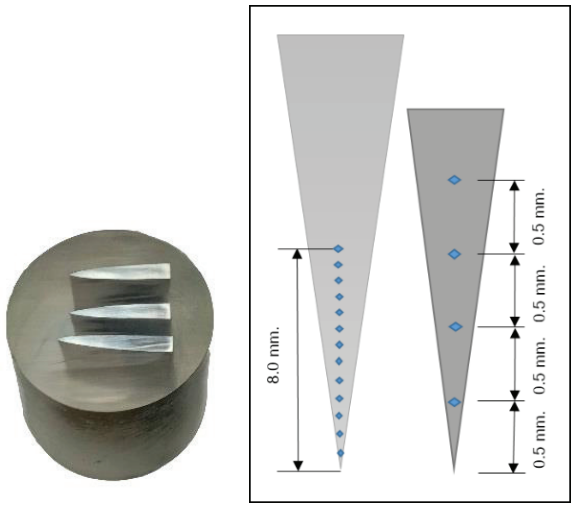


Figure 4 Chemical composition of specimens

การทดสอบความแข็ง

เมื่อชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการทดลองเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาทำการตัดออกเป็นส่วนๆ จากนั้นทำการขึ้นเรือนเย็นชิ้นทดสอบที่ถูกตัด ดังแสดงใน Figure 5 (a) ชิ้นทดสอบที่ถูกขึ้นเรือนเย็นจะถูกนำมาขัดด้วยกระดาษทรายโดยเริ่มจากกระดาษทรายเบอร์ 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับเพื่อให้ชิ้นงานได้ระนาบและทำการขัดมัน จากนั้นทำการวัดค่าความแข็งด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์ส ตามหลักการของสมนึก วัฒนศรียกุล (2549) ดังแสดงใน Figure 5 (b) ในการวัดค่าความแข็งชิ้นทดสอบจะถูกวัดจากคมของมีดเข้าไปเป็นระยะ 8 มิลลิเมตร และนำค่าที่ได้มาทำการเฉลี่ยจากนั้นทำการบันทึกผลการทดลอง



(a) (b)

Figure 5 (a) Test piece embed in solid resin (b) Hardness test positions on the sharp edge of the knife

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

ชิ้นทดสอบแรงกระแทกขนาด 20 ´ 70 มิลลิเมตร จะถูกนำมาวางในลักษณะตั้ง โดยหันด้านข้างของชิ้นทดสอบเข้าหาจุดกระทบของลูกตุ้ม ดังแสดงใน Figure 6 เนื่องจากสภาวะในการแตกหักของมีดนั้นมักเกิดจากแรงในการดัดทางด้านข้างมีด เมื่อทดสอบแรงกระแทก

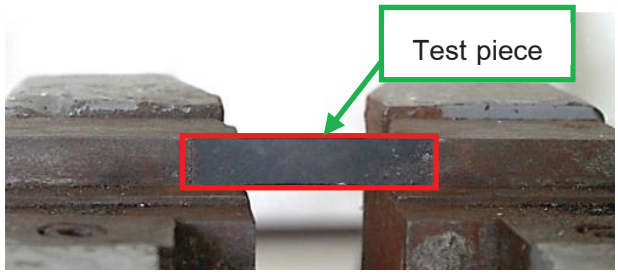


Figure 6 Position of test piece on impact test

ผลการทดลอง

ส่วนผสมทางเคมี

การตรวจสอบปริมาณธาตุผสมในเหล็กที่นำมาตีขึ้นรูป ด้วยเครื่องเครื่องวิเคราะห์ธาตุผสม โดยทำการสุ่มตัดเหล็กแหนบมาทั้งหมด 3 ชิ้น ขนาด 3 x 3 เซนติเมตรและนำมาขัดผิวเพื่อให้เห็นเนื้อเหล็ก จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุผสม และนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของธาตุผสมต่างๆ ซึ่งสามารถเทียบใกล้เคียงเหล็กเกรด (AISI 5160) ดังแสดง Table 3

Table 3 Chemical composition of test piece

Steel No.	Chemical Composition (% by weight)						
	C	Si	S	P	Mn	Cr	Mo
มาตรฐาน AISI 5160	0.50-0.65	0.15-0.35	<0.04	<0.035	0.45	0.10-0.90	
1	0.526	0.253	0.0012	0.007	0.780	0.145	0.010
2	0.615	0.328	0.0021	0.010	0.823	0.265	0.016
3	0.561	0.221	0.0100	0.008	0.788	0.184	0.014
Average	0.567	0.267	0.004	0.008	0.797	0.198	0.013

ค่าความแข็ง

การวิจัยครั้งนี้ใช้ค่าความแข็งของมีดโต้ที่ดีขึ้นรูปจากทางชุมชนเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบมีดโต้ที่ผ่านการอบคืนไฟ โดยนำมีดโต้จากชุมชนจำนวน 5 เล่ม มาทำการตัดวัดค่าความแข็งตามมาตรฐาน (ASTM E-140–02) จากนั้นนำค่าความแข็งที่วัดได้ในแต่ละจุดมาหาค่าเฉลี่ยแสดงข้อมูลใน Table 4 จากข้อมูลพบว่ามีดโต้ทางชุมชนมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 704.1 HV ซึ่งในส่วนชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบคืนไฟทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่องไมโครวิกเกอร์ส โดยค่าความแข็งแสดงใน Table 5 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาการอบคืนไฟเพิ่มขึ้นพบว่าค่าความแข็งของมีดโต้ลดลง ดังแสดงใน Figure 7 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ และเวลาการอบคืนไฟที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบลดลงที่เป็นเช่นนี้ เพราะอุณหภูมิและเวลาเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลในเนื้อเหล็ก

Table 4 Hardness values of the big knife of community

Position	Number	Average	sd	LCL	UCL
0.1	5	826.6	46.8	890	774
0.5	5	784.8	13.1	795	763
1.0	5	773.2	8.5	786	763
1.5	5	767.2	13.5	780	746
2.0	5	761.2	10.8	776	746
2.5	5	749.4	10.5	763	735
3.0	5	727.6	17.9	749	709
3.5	5	707.2	17.6	726	685
4.0	5	686.2	14.3	694	661
4.5	5	680.6	13.5	694	661
5.0	5	665.8	17.9	685	639
5.5	5	662.0	16.7	685	639
6.0	5	648.6	14.8	661	626
6.5	5	646.4	15.4	661	626
7.0	5	633.0	7.0	639	625
7.5	5	629.0	10.0	639	618
8.0	5	620.6	12.6	639	606
		704.1	15.4	721	684

Table 5 Hardness values of the test pieces

Temperature (°C)	Time (Min)	Hardness Values (HV)							
		No.	1	2	3	4	5	Average	sd
180	60		669.7	640.8	670.2	634.5	657.5	**654.5**	**16.4**
	90		615.0	622.2	615.6	593.4	580.2	**605.3**	**17.7**
	120		614.3	618.9	607.6	579.2	595.0	**603.0**	**16.1**
200	60		599.7	588.4	596.2	597.9	610.2	**598.5**	**7.8**
	90		584.2	588.6	581.6	541.9	549.5	**569.2**	**21.7**
	120		584.1	588.9	562.9	549.6	551.9	**567.5**	**18.2**
220	60		569.2	561.6	553.8	559.7	561.6	**561.2**	**5.5**
	90		537.4	538.0	559.5	548.9	556.3	**548.0**	**10.2**
	120		533.5	557.6	521.0	541.6	564.2	**543.6**	17.6

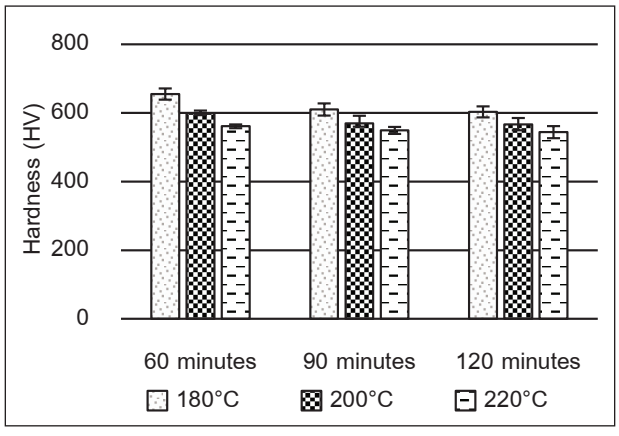


Figure 7 Hardness graph for each condition

ความต้านทานแรงกระแทก

ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกของมีดโต้ของชุมชนโดยใช้มาตรฐาน (ISO 148-2:2008) เป็นแนวทางในการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก ดังแสดงใน Table 6 ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ยอยู่ที่ 13.6 Joules ส่วนชิ้นทดสอบเหล็กแหนบที่ผ่านกระบวนการอบคืนไฟ ผลของค่าความต้านทานแรงกระแทก แสดงดัง Table 7 โดยค่าความต้านทานแรงกระแทกนั้นจะแตกต่างจากค่าความแข็ง นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิและเวลาการอบคืนไฟเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกนั้น เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะชิ้นทดสอบที่มีความแข็งลดลง ดังแสดง Figure 8 จะทำให้เหล็กมีความเปราะน้อยลงจึงมีความสามารถในการรับแรงกระแทกได้มากขึ้น

Table 6 Impact values of the big knife of community

Impact values (Joules)							
No.	1	2	3	4	5	Average	sd
	14.0	17.0	10.0	16.0	11.0	**13.6**	**3.04**

Table 7 Impact values of the test pieces

Temperature (°C)	Time (Min)	Impact values (Joules)							
		No.	1	2	3	4	5	Average	sd
180	60		30	27	25	24	27	**26.6**	**2.3**
	90		31	30	35	30	31	**31.4**	**2.1**
	120		38	33	37	32	30	**34.0**	**3.4**

Table 7 Impact values of the test pieces (cont.)

Temperature (°C)	Time (Min)	Impact values (Joules)							
		No.	1	2	3	4	5	Average	sd
200	60		32	33	35	37	36	**34.6**	**2.1**
	90		36	39	32	36	35	**35.6**	**2.5**
	120		42	44	40	42	38	**41.2**	**2.3**
220	60		35	38	40	38	40	**38.2**	**2.0**
	90		38	40	42	44	45	**41.8**	**2.9**
	120		49	50	48	48	45	**48.0**	**1.9**

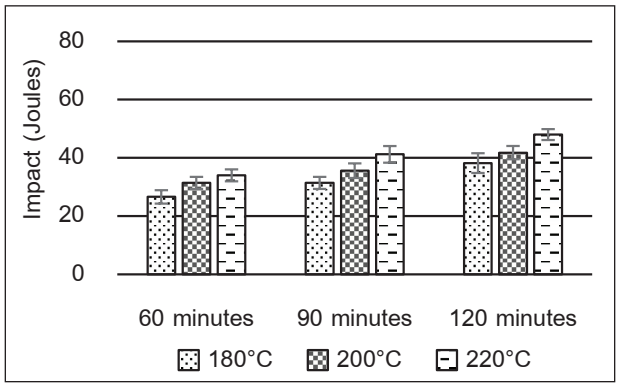


Figure 8 Impact resistance values

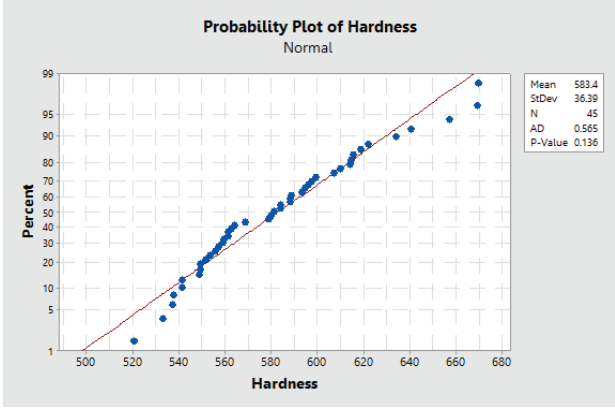


Figure 9 Probability plot of hardness

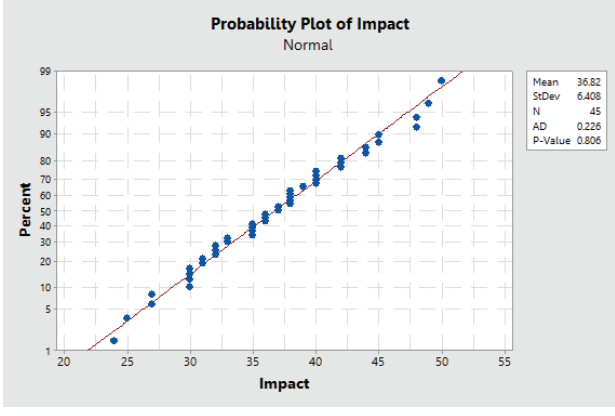


Figure 10 Probability plot of impact

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

การวิเคราะห์ทางสถิติทางผู้วิจัยใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการวิเคราะห์ ก่อนการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสม จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล ของผลการทดสอบค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงกระแทก รวมถึงการตรวจสอบสมมติฐานด้วยหลักทางสถิติและตรวจสอบค่าความแปรปรวน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Test for normality) ของค่าความแข็ง และค่าความต้านทานแรงกระแทกของมีดโต้ที่ใช้ในการทดลอง โดยตั้งสมมติฐาน คือ

H_0 : เศษตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : เศษตกค้างไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

จากการทดสอบของแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิ่ง (Anderson-darling test) ของค่าความแข็ง ผลการทดสอบแสดงใน Figure 9 พบว่ามีค่า P-Value 0.136 ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีผลการทดสอบแสดงใน Figure 10 ซึ่งมีค่า P-Value 0.806 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของสมบัติทางกลทั้งสองมีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงถึงเศษตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

สำหรับการทดสอบความแปรปรวนเท่ากัน (Test for homogeneity of variance) ของค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ใช้ในการทดลอง ตั้งสมมติฐานไว้ คือ

H_0 : ความแปรปรวนของเศษตกค้างทุกกลุ่มเท่ากัน

H_1 : ความแปรปรวนของเศษตกค้างแตกต่างกันอย่างน้อย 2 กลุ่ม

จากผลของค่าความแข็งการเปรียบเทียบ แสดงดัง Figure 11 พบว่าได้ค่าของ P-Value 0.096 ค่าความต้านทาน

แรงกระแทก แสดงดัง Figure 12 ได้ค่าของ P-Value 0.916 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงว่าเศษตกค้างทุกกลุ่มมีความแปรปรวนเท่ากัน ในขณะเดียวกันค่าการทดสอบของเลวีน (Levene's test statistic) ของค่าความแข็งได้ค่า P-Value 0.556 ส่วนค่าความต้านทานแรงกระแทกได้ค่า P-Value 0.900 มีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงว่าเศษตกค้างมีความแปรปรวนที่เท่ากัน

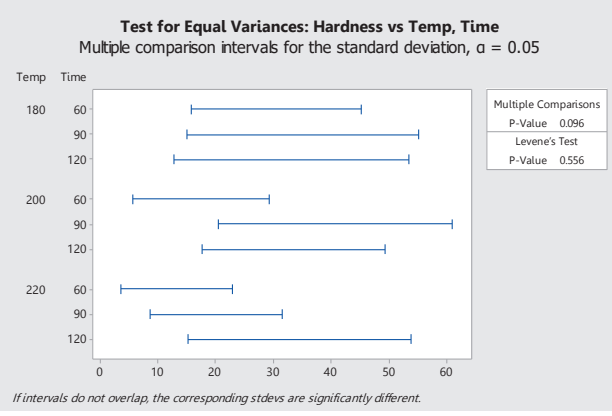


Figure 11 Test for homogeneity of variance of hardness values

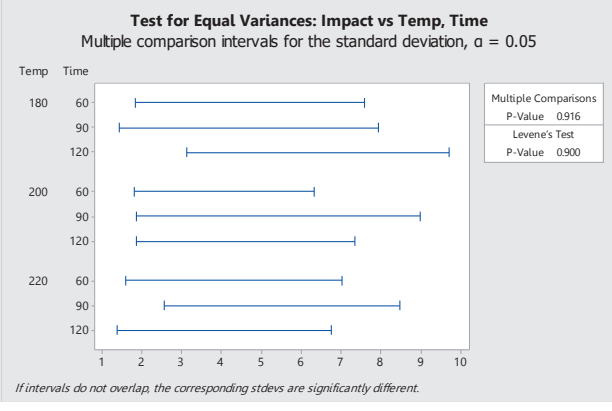


Figure 12 Test for homogeneity of variance of impact values

การทดสอบความเป็นอิสระกัน (Test for independence) ของค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงกระแทกของมีดโต้ที่ใช้ในการทดลอง แสดงผลดัง Figure 13 (a) พบว่า ค่าความแข็ง P-Value 0.050 และค่าความต้านทานแรงกระแทก แสดงดัง Figure 13 (b) คือ มีค่า P-Value 0.289 โดยตั้งสมมติฐาน คือ

H_0 : เศษตกค้างเป็นอิสระกัน

H_1 : เศษตกค้างไม่ได้เป็นอิสระกัน

จากผลการทดสอบ พบว่า มีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงว่าเศษตกค้างเป็นอิสระต่อกัน

```
Runs test for Hardness

Runs above and below K = 583.413

The observed number of runs = 17
The expected number of runs = 23.4889
22 observations above K, 23 below
P-value = 0.050
```

(a) Hardness values

```
Runs test for Impact

Runs above and below K = 36.8222

The observed number of runs = 27
The expected number of runs = 23.4889
23 observations above K, 22 below
P-value = 0.289
```

(b) Impact values

Figure 13 Test for independence

จากการตรวจสอบข้อสมมติฐานด้วยหลักทางสถิติทั้ง 3 ส่วน คือ Test for normality, Test for independence และ Test for homogeneity of variance ค่า P-Value ของทั้ง 3 ส่วนมีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปได้

ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อค่าความแข็ง

จากรูปกราฟ (Contour Plot) ค่าความแข็งของอุณหภูมิและเวลาในการอบคืนไฟดังแสดงใน Figure 14 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มระดับของปัจจัยทั้ง 2 ค่าขึ้น จะทำให้ค่าความแข็งลดลง โดยในช่วงของค่าความแข็งที่ต้องการคือ 550 HV ซึ่งพบว่าค่าความแข็งอยู่ในช่วง 550-575 HV ในบริเวณที่สีเขียวปานกลาง

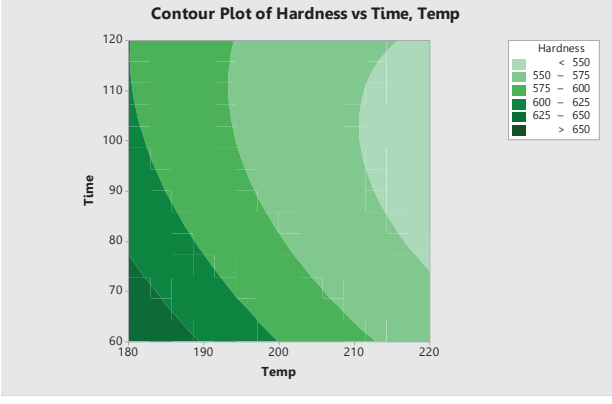


Figure 14 Contour plot of hardness

ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก

จากรูปกราฟ (Contour Plot) ของค่าความต้านทานแรงกระแทกของอุณหภูมิและเวลาอบคืนไฟดังแสดงใน Figure 15 พบว่า เมื่อเพิ่มระดับของปัจจัยทั้ง 2 ค่าขึ้น จะทำให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้น โดยในช่วงของค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ต้องการคือ 35 Jules จะอยู่ในช่วง 30-35 Jules ในบริเวณสีเขียวปานกลาง

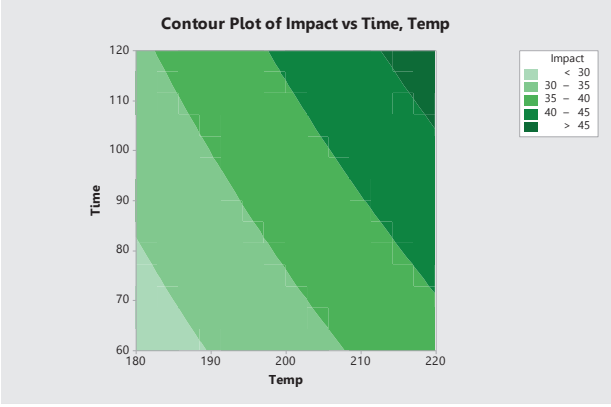


Figure 15 Contour plot of impact

การหาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงกระแทก

การวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิอบคืนไฟ เวลาอบคืนไฟ และปัจจัยร่วมนั้นมีผลต่อค่าความแข็งเฉลี่ยของมีดโต้ที่นำมาทำการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ใน Table 8 แสดงรายละเอียดของปัจจัยร่วมมีค่า P-value น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ทุกปัจจัย ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยร่วมดังกล่าวนั้นมีผลต่อค่าความแข็งเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ และจากผลการทดลองได้ค่าของ R-sq เท่ากับ 85.26 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่า R-sq (adj) มีค่าเท่ากับ 81.99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าของ R-sq แสดงถึงจำนวนของข้อมูลมีจำนวนเพียงพอที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสม

Table 8 Variance analysis results Hardness value of temperature and time

Factorial information

Factor	Levels	Values		
Temp	3	180	200	220
Time	3	60	90	120

Analysis of variance

Source	Df	Adj. SS	Adj. MS	F-Value	P-Value
Model	8	49693	6211.6	26.03	0.000
Linear	4	47622	11905.4	49.90	0.000
Temp	2	37336	18667.8	78.24	0.000
Time	2	10286	5143.0	21.56	0.000
2-Way interaction	4	2071	517.8	2.17	0.092
Temp*Time	4	2071	517.8	2.17	0.092
Error	36	8589	238.6		
Total	44	58282			

Model summary

S	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)
15.4465	85.26%	81.99%	76.97%

การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทก ทำให้ทราบว่าปัจจัยของอุณหภูมิอบคืนไฟ เวลาอบคืนมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกของมีดโต้ที่ใช้ทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงตัวอย่างใน Table 9 โดยค่า P-Value ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 นั่นหมายความว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกระแทกอย่างมีนัยสำคัญ

โดยผลของการทดลองได้ค่า R-sq ของการอบคืนไฟค่าเท่ากับ 88.31 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่า R-sq (adj) มีค่าเท่ากับ 85.71 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าของ R-sq แสดงถึงจำนวนของข้อมูลมีค่าที่มากพอที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

Table 9 Variance analysis results impact value of temperature and time

General factorial regression: Impact value versus temperature, time

Factorial information

Factor	Levels	Values		
Temp	3	180	200	220
Time	3	60	90	120

Analysis of variance

Source	Df	Adj. SS	Adj. MS	F-Value	P-Value
Model	8	1595.38	199.422	33.99	0.000
Linear	4	1561.16	390.289	66.53	0.000
Temp	2	1082.18	541.089	92.23	0.000
Time	2	478.98	239.489	40.82	0.000
2-Way interaction	4	34.22	8.556	1.46	0.235
Temp*Time	4	34.22	8.556	1.46	0.235
Error	36	211.20	5.867		
Total	44	1806.58			

Model summary

S	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)
2.42212	88.31%	85.71%	81.73%

ปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงกระแทก

จากรูปกราฟ Optimal ใน Figure 16 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิอบคืนไฟ คือ 200 องศาเซลเซียส เวลาในการอบเพิ่มคาร์บอนคืนไฟ คือ 83.6 นาที โดยได้ค่าความแข็งเฉลี่ย 572.9 HV และค่าความต้านทานแรงกระแทกเฉลี่ยต่ำสุด 35.8 Joules จากผลของปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้ ผู้วิจัยจึงได้นำระดับปัจจัยของทั้งสองเงื่อนไขดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อยืนยันผลจำนวน 5 การทดลอง โดยเงื่อนไขที่ใช้ คือ อุณหภูมิอบเพิ่มคาร์บอน 200 องศาเซลเซียส และเวลาอบเพิ่มคาร์บอน 83 นาที

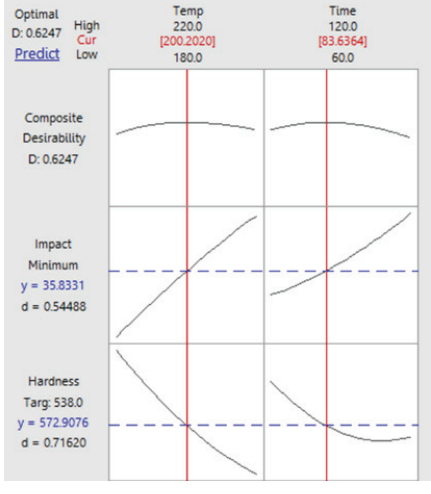


Figure 16 Optimization plot of the effect of each factor

การทดลองเพื่อยืนยันผล

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากค่าทางสถิติ จึงทำการทดลองชุบแข็งมีดโต้ด้วยการอบคืนไฟตามสภาวะของอุณหภูมิและเวลาในการอบคืนไฟ โดยผลการทดสอบค่าความแข็งแสดงดัง Table 10 และค่าความต้านทานแรงกระแทกแสดงดัง Table 11 จะเห็นได้ว่า ค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 549.9 HV และความต้านทานแรงกระแทก 38.8 Joules ซึ่งอยู่ในค่าตามเป้าหมายของมีดชุมชน

Table 10 Hardness values of repeated experiment

No.					Average	sd
1	2	3	4	5		
565.5	574.2	554.6	522.8	532.6	549.9	21.7

Table 11 Impact values of repeated experiment

No.					Average	sd
1	2	3	4	5		
42.0	38.0	35.0	41.0	38.0	**38.8**	**2.8**

วิจารณ์ผล

ผลการทดลองชุบแข็งมีดโต้ด้วยกระบวนการอบคืนไฟ จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาการอบคืนไฟเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้องนำมาทำการอบคืนไฟ (Tempering) เพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไป หรือ ให้เหลืออยู่น้อยที่สุด ดังงานวิจัยของสมศักดิ์ แก้วพลอย (2559) ที่ใช้ปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการศึกษากระบวนการอบคืนไฟ ซึ่งพบว่าทั้งสองปัจจัยมีผลต่อพลังงานแรงกระแทก

ดังนั้นเวลาในการอบคืนไฟที่เวลา 60, 90 และ 120 นาที จะพบว่าเวลาอบคืนไฟที่ 120 นาที ทำให้ค่าความแข็งลดลงจากมีดโต้ผลิตของชุมชน 704.1 HV ลดลงอยู่ที่ 549.9 HV ส่วนค่าความต้านทานแรงกระแทก จาก 14.0 Joules มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น 38.8 Joules ซึ่งสอดคล้องตามหลักการณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ (2556) ที่ว่าเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมานั้นจะมีสมบัติที่แข็งและเปราะ เพราะการเย็นตัวที่รวดเร็วจะทำให้เกิดความเครียดขึ้นภายใน ส่งผลให้เหล็กขาดความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทก ในส่วนของการอบคืนไฟจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำ โดยใช้ปัจจัยของอุณหภูมิการอบคืนไฟที่ 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส จะพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงซึ่งสอดคล้องตามหลักการ มนัส สถิรจินดา (2540) ที่ว่าการอบคืนไฟในช่วงอุณหภูมินี้ความแข็งจะลดลงเล็กน้อยแต่ความเครียดภายในจะถูกทำลายไปเกือบหมดแต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ทราบว่าเหล็กภายหลังที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายในอันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูง แต่จะขาดสมบัติด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทก (Poor impact strength) และความเครียดภายในที่เกิดขึ้น จะมีส่วนทำให้ชิ้นงานมีความเปราะ หรืออาจเกิดการแตกร้าวในขณะใช้งาน อย่างไรก็ตามเมื่อมีดโต้มีค่าความแข็งที่ลดลงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการอบคืนไฟ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุภกิจ ขาวเนตร (2552) พบว่าผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก เมื่ออุณหภูมิการอบคืนไฟเพิ่มขึ้นหลังจากชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มสูงขึ้น

ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่ใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลอง และปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการอบคืนไฟสามารถนำไปใช้หาระดับของอุณหภูมิและเวลาอบคืนไฟ ซึ่งทำให้ค่าความแข็งมีดโต้ที่ผ่านการอบคืนไฟให้ใกล้เคียงกับค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงกระแทกตามขอบเขตคุณสมบัติทางกลของมีดชุมชน ดังงานวิจัยของวรรณา หอมจะบก และคณะ (2558) ที่ว่ามีดโต้ที่ผลิตจากเหล็กแนบประกอบไปด้วยโครงสร้างคาร์ไบด์กระจายตัวบนเนื้อพื้นโครงสร้างมาเทนไซต์ โดยคาร์ไบด์จะมีขนาดเล็กลง เมื่อมีระยะลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มีดมีความเปราะ คุณสมบัติในการรับแรงกระแทกน้อยลง และจากผลของการทดลองยืนยันผล พบว่า ค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงกระแทก นั้นมีค่าอยู่ในขอบเขตของสมบัติทางกลของมีดโต้ทางชุมชน ซึ่งสอดคล้องตามคุณสมบัติ มาตรฐานผลิตภัณฑ์มีดชุมชน (2552)

สรุปผลการวิจัย

จากการนำหลักการของการออกแบบการทดลองและการใช้สถิติในการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติมีดโต้ด้วยกระบวนการอบคืนไฟ โดยใช้สมบัติทางกลของมีดโต้ที่ตีขึ้นรูปและชุบแข็งโดยชุมชนที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 704.1 HV ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าอยู่ที่ 14.0 Joules เป็นค่าเปรียบเทียบกับมีดโตที่ผ่านกระบวนการอบคืนไฟ ทำให้ทราบว่า จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อสมบัติทางกล ทำให้ได้เวลาในการอบคืนไฟ 83 นาที อุณหภูมิการอบคืนไฟ 200 องศาเซลเซียส โดยทั้งสองปัจจัยจะให้ค่าความแข็งอยู่ที่ 579.9 HV และค่าความต้านทานแรงกระแทกอยู่ที่ 35.8 Jules และเมื่อนำปัจจัยที่เหมาะสมระหว่างเวลาและอุณหภูมิไปทำการทดลองเพื่อยืนยันผลโดยได้ค่าความแข็งอยู่ที่ 549.9 HV และความต้านทานแรงกระแทกอยู่ที่ 38.8 Jules

ดังนั้น ในขั้นตอนการผลิตมีดโต้ควรมีการเพิ่มกระบวนการอบคืนไฟหลังจากการชุบแข็ง ซึ่งจะทำให้มีดมีความคงทนต่อการนำไปใช้งาน และคณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยนี้ควรศึกษาโครงสร้างจุลภาคเพิ่มเติมภายหลังจากกระบวนการอบคืนไฟ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำบทความวิชาการขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทดลองในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. (2556). *โลหะวิทยา*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ วรรณา หอมจะบก อมรศักดิ์ มาใหญ่ และ สมบัติ น้อยมิ่ง. (2562). การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของมีดโต้ที่ผลิตจากภูมิปัญญาท้องถิ่นของชุมชนตีมีด 4 จังหวัดของประเทศไทย. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 18*(1), 60-70.

มนัส สถิรจินดา. (2540). *วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก*. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. (2552). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน*. http://app.tisi.go.th/ otop/otop.html.

วรรณา หอมจะบก ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และนฤดม ทาดี. (2558). ผลของอุณหภูมิออสเทนไนไทซิงในกระบวนการแพ็คคาร์เบอร์ไรซิงเพื่อใช้ผลิตมีดโต้. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 8*(3), 126-136.

สิทธิพงษ์ อุดมบุญญานุภาพ และนลิน เพียรทอง. (2557). *การปรับปรุงกระบวนการผลิตมีดพร้าด้ามปล้องกรณีศึกษาชุมชนบ้านนาถ่อนทุ่ง จังหวัดนครพนม*.

สมนึก วัฒนศรียกุล. (2549). *การทดสอบวัสดุ (พิมพ์ครั้งที่ 2)*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สุภกิจ ขาวเนตร. (2552). ผลของอุณหภูมิการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าชุบเคลือบนิกเกิล. *วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, 20*(2), 87-92.

สมศักดิ์ แก้วพลอย. (2559). การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการอบคืนตัวของเหล็กกล้าผสม โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง. *วารสารข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมไทย, 2*(2), 49-55.

ศักดิ์สิทธิ์ ศรีสุข ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ จารุพงษ์ บรรเทาจิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร วรรณา หอมจะบก อมรศักดิ์ มาใหญ่ และสมบัติ น้อยมิ่ง. (2562). การศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลาที่ส่งผลต่อการชุบแข็งมีดโต้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอไรซิงโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมคาร์บอเนต. *การประชุมวิชาการการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ ประจำปี พ.ศ.2562 (หน้า 201-207)*. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ASTM E-140–02. *Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among BrinellHardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness.*

ISO 148-2 : 2008 Metallic material - Charpy pendulum impact test Part 2: Verification of testing machines

Kumar, S.A. (2003). *Physical Metallurgy Handbook*. McGraw-Hill Company Inc.

Montgomery, D.C. (2013). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.