



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

เวลาและอุณหภูมิของสารเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครงที่มีผลต่อระยะลึกผิวแข็งด้วยกระบวนการแพ็กคาร์บอนไโรซิง

Time and temperature of cockle shell catalyst on the effective case depth in the Pack carburizing process

มานิช รัตนโย ภูมิบุญ พลตัง พงษ์ศักดิ์ นาใจคง สมบัติ น้อยมิ่ง*

สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, จังหวัดนครราชสีมา, 30000

Manote Rithniyo Phumboon Poltang Pongsak Nachaikong Sombut Noyming*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology Rajamangala University of Technology Isan Nakhonratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: sombut.no@rmuti.ac.th 083-4289491

วันที่รับบทความ 28 มกราคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 2 พฤษภาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ 27 ตุลาคม 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็งและระยะลึกผิวแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการชุบแข็งด้วยกระบวนการแพ็กคาร์บอนไโรซิง โดยใช้ผงถ่านเพิ่มคาร์บอนจากกะลามะพร้าวผสมกับสารเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครง เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อค่าความแข็งและระยะลึกผิวแข็งของชิ้นทดสอบ ปัจจัยในการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ปัจจัย 3 ระดับ โดย ปัจจัยแรก คือ อุณหภูมิอบเพิ่มคาร์บอน ได้แก่ 900, 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่สอง คือ เวลาอบเพิ่มคาร์บอน ได้แก่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบเพิ่มคาร์บอนที่ผิวแล้วจะถูกนำไปทำการชุบแข็งด้วยอุณหภูมิที่ทำให้เป็นออสเทนไนต์ 780 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วจุ่มชุบในน้ำทันที จากนั้นนำไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ ชิ้นทดสอบจะถูกนำมาทดสอบความแข็งด้วยวิธีไมโครวิกเกอร์สตามแนวความลึกจากขอบผิวชิ้นทดสอบ ผลจากการวิเคราะห์หาค่าความแข็งที่ผิว และระยะลึกผิวแข็งตามมาตรฐาน พบว่า ค่าความแข็งที่ผิวของอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง 861 HV และระยะลึกผิวแข็งอยู่ที่ 1.92 มิลลิเมตร โดยการเพิ่มคาร์บอนจากถ่านกะลามะพร้าวผสมสารเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครงสามารถนำมาใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์บอนไโรซิงได้

คำสำคัญ

กระบวนการแพ็กคาร์บอนไโรซิง ถ่านกะลามะพร้าว เปลือกหอยแครง ระยะลึกผิวแข็ง

Abstract

This research aims to study the factors affecting the hardness and case depth of low carbon steel subjected to the pack carburizing process using carbon-enriched coconut shell charcoal mixed with an accelerator from cockle shells. The goal is to determine the optimal factors for hardness and case depth of the test specimens. The study involves two factors, each with three levels. The first factor is the carburizing temperature, set at 900°C, 950°C, and 1,000°C. The second factor is the carburizing time, set at 2, 4, and 6 hours. After the surface carburizing process, the specimens are subjected to hardening at 780°C austenitizing temperature for 30 minutes, followed by immediate quenching in water. The specimens are then tempered at 180°C for 60 minutes and allowed to air cool. The hardness of the specimens is tested using the micro Vickers hardness method along the depth from the surface. The analysis results show that the

highest surface hardness, 861 HV, was achieved at 1,000°C and 6 hours, with a case depth of 1.92 mm. It is concluded that carbon enrichment using coconut shell charcoal mixed with cockle shell accelerants can be effectively utilized in the pack carburizing process.

Keywords

pack carburizing process; coconut shell charcoal; cockle shell; effective case depth

1. คำนำ

อุตสาหกรรมเหล็กมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากปริมาณการใช้เหล็กในประเทศไทยมีมากถึง 1.29 ล้านตัน [1] ตามการเติบโตของกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ และกลุ่มอุตสาหกรรมชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ส่งผลให้กระทรวงพาณิชย์ได้มีการส่งเสริมการใช้นวัตกรรมเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ แต่ด้วยข้อจำกัดบางอย่าง เช่น ข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตซึ่งส่งผลให้ประเทศไทยต้องนำเข้าเหล็กในปริมาณสูงถึง 921,088 ตัน โดยเฉพาะเหล็กที่มีคุณภาพสูงเพื่อรักษาคุณภาพและมาตรฐานในการผลิต เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เพราะเหล็กชนิดนี้มีความแข็งแรง แต่มีความเหนียว สามารถแปรรูปได้ง่าย และยังสามารถนำมาปรับปรุงสมบัติทางกลตามความต้องการในการใช้งาน เนื่องจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีปริมาณธาตุของคาร์บอนอยู่ในเนื้อเหล็กไม่เกิน 0.2 เปอร์เซ็นต์ [2] เมื่อมีปริมาณธาตุคาร์บอนอยู่น้อยทำให้เหล็กชนิดนี้ไม่สามารถนำมาชุบผิวแข็งได้ การแก้ปัญหาที่จะทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำให้มีความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการชุบผิวแข็งด้วยวิธีแพ็กคาร์บอนไรซิงวิธีนี้สามารถทำให้เหล็กมีความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น โดยอาศัยการเพิ่มคาร์บอนซึ่งอาศัยกลไกการแพร่ของอะตอมคาร์บอนเข้าสู่ผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ณ อุณหภูมิที่เหล็กมีเฟสเป็นออสเทนไนต์ เป็นผลให้อะตอมของคาร์บอนสามารถแพร่เข้าสู่ผิวเหล็กที่ละน้อย [3] ในกระบวนการเพิ่มคาร์บอนเข้าสู่ผิวเหล็ก โดยจะใช้คาร์บอนจากถ่านไม้หรือถ่านโค้กผสมกับสารเร่งปฏิกิริยา เมื่อปริมาณคาร์บอนในผิวเหล็กเพิ่มสูงมากขึ้น นั้นหมายความว่าความสามารถในการชุบแข็งมีประสิทธิภาพสูงขึ้นจากการศึกษาของ Terver Aulsebrook [4] การเพิ่มปริมาณคาร์บอนเข้าสู่ผิวเหล็กจะได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และชนิดของสารเร่งปฏิกิริยา โดยกระบวนการแพ็กคาร์บอนไรซิงนั้นแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดขึ้นจากสารเร่งปฏิกิริยาจะเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับผิวด้านแล้วให้คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอนจากงานวิจัย Anil Kumar Sinha [5] พบว่า การใช้สารเพิ่มคาร์บอนเพียงอย่างเดียวส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนแพร่เข้าสู่ผิวเหล็กได้น้อยกว่าการใช้สารเพิ่มคาร์บอนผสมสารเร่งปฏิกิริยาจากการศึกษาของงานวิจัยของ ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และคณะ [6] พบว่า สารเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยให้คาร์บอนจากผิวด้านเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมคาร์บอนนั้นสามารถนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภคที่มีส่วนประกอบของสารแคลเซียมคาร์บอเนตมาเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบคาร์บอเนต ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) โดยสารเร่งปฏิกิริยาจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ แบบผสมขึ้นมาใช้เอง และแบบหาซื้อได้ตามท้องตลาด

สารเร่งปฏิกิริยาแบบผสมขึ้นมาใช้ โดยการนำมาจากธรรมชาติหรือเศษเหลือทิ้งจากการบริโภค เช่น เปลือกหอยแครง ซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลัก จากงานวิจัย สุภกร บุญยืน และคณะ [7] พบว่าเปลือกหอยแครงอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มีโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ จะเกิดการสลายตัวเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแคลเซียมออกไซด์เมื่อได้รับความร้อนที่สูงขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญของกระบวนการแพ็กคาร์บอนไรซิง คือ ปัจจัยของเวลา จากการศึกษางานวิจัยของ พีรวัส คงสง และคณะ [8] พบว่า ผลของเวลาในกระบวนการแพ็กคาร์บอนไรซิงที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ระยะซึมลึกของชั้นผิวแข็งมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอะตอมของคาร์บอนมีเวลามากพอที่จะแพร่เข้าไปในชิ้นงาน และความแข็งสูงจากการศึกษางานวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยได้นำหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) มาทำการทดลอง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ข้อมูลทางสถิติ และสามารถสรุปผลการ

ทดลองได้อย่างสมเหตุสมผลตามที่ต้องการ จากการศึกษา งานวิจัยของ ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และคณะ [9] ได้ ทำการศึกษาอุณหภูมิ และเวลาอบเพิ่มคาร์บอนที่เหมาะสมใน การชุบแข็งมิตได้ด้วยกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิงที่ใช้เปลือก หอยเชอรี่เป็นสารเร่งปฏิกิริยา พบว่า ปังจี้ทั้งสามปังจี้มี อิทธิพลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ และระดับของปังจี้มี ผลต่อค่าความแข็งของมิตได้ จากการศึกษางานวิจัยข้างต้น ทำ ให้ทราบว่า การเพิ่มความแข็งและระยะลึกผิวแข็งเหล็กกล้า คาร์บอนต่ำผ่านการชุบแข็งด้วยกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง สามารถนำหลักการออกแบบการทดลองมาวิเคราะห์ปังจี้ที่ เหมาะสมของการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วย กระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการชุบแข็งด้วยกระบวนการ แพ็กคาร์โบไรซิง โดยนำหลักการออกแบบการทดลองทาง สถิติมาวิเคราะห์ผลระยะลึกผิวแข็งในการทดลองโดยการนำผง ถ่านกะลามะพร้าวมาเป็นสารเพิ่มคาร์บอน และใช้เปลือก หอยแครงเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถที่จะนำวัสดุที่เหลือทิ้งมาก่อให้เกิดประโยชน์ และเพิ่ม มูลค่าของวัสดุ

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

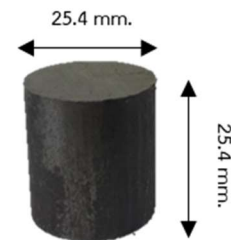
1. ถ่านกะลามะพร้าว
2. เปลือกหอยแครง
3. เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1020

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่

1. เตาอบชุบความร้อนแบบขดลวดความต้านทาน ยี่ห้อ Modutem รุ่น WW51A
2. เครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส ยี่ห้อ Mitsuzawa รุ่น MHT2
3. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX 60 M
4. เครื่องตรวจสอบปริมาณธาตุ ยี่ห้อ (Arc Emission Spectrometer) รุ่น MAX x LMF 05

2.2 การเตรียมชิ้นทดสอบ

ลักษณะชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดลองด้วยกระบวนการ แพ็กคาร์โบไรซิง เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีลักษณะเป็น เหล็กเพลากลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 25.4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นทดสอบเริ่มต้น

2.3 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

ชิ้นทดสอบก่อนนำมาทำการชุบแข็งด้วยกระบวนการแพ็ก คาร์โบไรซิง โดยการนำชิ้นงานทดสอบมาวิเคราะห์หาปริมาณ คาร์บอน และธาตุผสมอื่น ๆ ด้วยเครื่องตรวจสอบปริมาณธาตุ (Arc Emission Spectrometer) โดยจะทำการทดสอบจำนวน 3 จุด

2.4 การออกแบบการทดลอง

การหาปังจี้ชุบแข็งด้วยกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง โดยนำหลักการทางสถิติมาออกแบบการทดลองในรูปแบบของ full factorial design โดยใช้การกำหนดค่าระยะลึกผิวแข็ง เป็นผลคำตอบของการทดลอง ปังจี้ที่ใช้ในการศึกษามีอยู่ 2 ปังจี้ ซึ่งประกอบไปด้วยปังจี้แรก คือ อุณหภูมิในการอบเพิ่ม คาร์บอน และปังจี้ที่สอง คือ เวลาในการอบเพิ่มคาร์บอน โดย ในแต่ละปังจี้จะมีอยู่ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปังจี้การศึกษาอุณหภูมิและเวลา

Factors	Level		
	Low (-1)	Medium (0)	High (+1)
Temperature (°C)	900	950	1,000
Time (hr.)	2	4	6

เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของข้อมูลในแต่ละปังจี้ โดยใช้ การทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ในแต่ละปังจี้ ซึ่งทำให้มี กระบวนการทดลองทั้งหมด 27 ครั้ง โดยรูปแบบการทดลองจะ

ใช้ลำดับการรันแบบสุ่ม เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลำดับการรันแบบสุ่ม

Run Order	Std Order	Temperature	Time
1	9	1000	6
2	17	1000	4
3	26	1000	4
4	20	900	4
5	4	950	2
6	7	1000	2
7	15	950	6
8	14	950	4
9	5	950	4
10	24	950	6
11	8	1000	4
12	6	950	6
13	12	900	6
14	3	900	6
15	19	900	2
16	21	900	6
17	11	900	4
24	-	-	-
25	-	-	-
26	-	-	-
27	1	900	2

2.5 การเตรียมสารแพ็คเกจเบอร์ชิง

สารแพ็คเกจเบอร์ชิงที่ใช้ทำการทดลองประกอบไปด้วยสารเพิ่มคาร์บอนจากถ่านกะลามะพร้าว ผสมกับสารเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยแครง โดยการถ่านกะลามะพร้าวดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) มาบดให้ละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรงที่มีขนาดรูตะแกรง 2.0 มิลลิเมตร โดยผงถ่านกะลามะพร้าวที่ร่อนแล้วแสดงในรูปที่ 2 (ข) จากนั้นนำเปลือกหอยแครงมาเตรียมเป็นสารเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2 (ค) โดยการนำเปลือกหอยแครงมาล้างทำความสะอาดเพื่อให้สิ่งเจือปนหลุดออกจากเปลือกหอยแครง แล้วนำมาผึ่งแดดให้แห้ง จากนั้นนำมาบดร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2.0 มิลลิเมตร ผงของเปลือกหอยแครงที่ผ่านการร่อนแล้วแสดงในรูปที่ 2 (ง) ภายหลังจากการเตรียมสารเร่งปฏิกิริยาจึงนำมาผสมให้เข้ากันในสัดส่วนผงถ่านกะลามะพร้าว 70 เปอร์เซ็นต์ และเปลือกหอยแครง 30 เปอร์เซ็นต์



(ก) ถ่านถ่านกะลามะพร้าว



(ข) ถ่านกะลามะพร้าวบดละเอียด



(ค) ลักษณะเปลือกหอยแครง



(ง) เปลือกหอยแครงบดละเอียด

รูปที่ 2 สารเพิ่มคาร์บอนผงถ่านกะลามะพร้าว และสารเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยแครง



(ก) ชิ้นงานบนกล่อ่ง



(ข) การบรรจุสารเพิ่มคาร์บอน



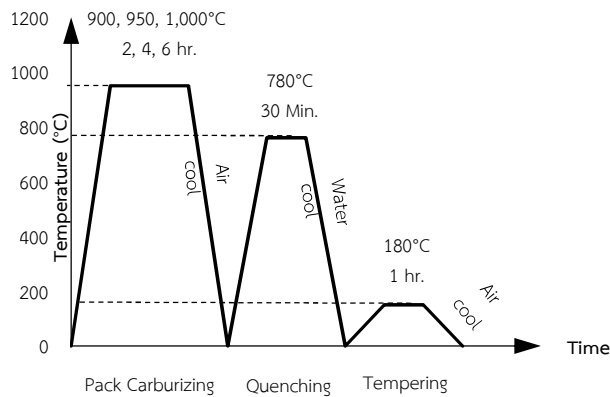
(ค) การปิดฝากล่อ่งแล้วทับด้วยดินเหนียว

รูปที่ 3 การบรรจุชิ้นงาน และการเติมสารเพิ่มคาร์บอน

2.6 การแพ็คเกจเบอร์ชิงและการชุบแข็ง

บรรจุสารเพิ่มคาร์บอนที่ผสมเสร็จแล้วลงในกระบอกลูกทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร สูง 100 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร นำชิ้นทดสอบใส่เข้าไปในกระบอกลูกทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) แล้วเติมสารเพิ่มคาร์บอนให้เต็มกล่อ่งแสดงในรูปที่ 3 (ข) จากนั้นทำการปิดฝากล่อ่งและใช้ดินเหนียวปิดทับอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันการรั่วซึมของแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 3 (ค) จากนั้นนำกล่อ่งที่บรรจุสารไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนและการเย็นตัวแสดงดังในรูปที่ 4 โดยขั้นตอนแรกเป็นกระบวนการแพ็คเกจเบอร์ชิง หรือการอบเพิ่มคาร์บอน ชิ้นทดสอบแบ่งออกเป็นชุด ๆ เพื่อทำการอบเพิ่มคาร์บอนที่อุณหภูมิ และเวลาต่างกัน โดยมีขั้นตอนทดสอบตามปัจจัยที่กำหนด คือ อุณหภูมิอบเพิ่มคาร์บอน 900, 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส และเวลาอบเพิ่มคาร์บอน 2, 4 และ 6 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบเพิ่มคาร์บอนมาทำการชุบแข็งที่อุณหภูมิออสเทนไนต์ 780

องศาเซลเซียส อบเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำออกมาจุ่มชุบในน้ำทันที สุดท้ายนำชิ้นทดสอบมาอบเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที

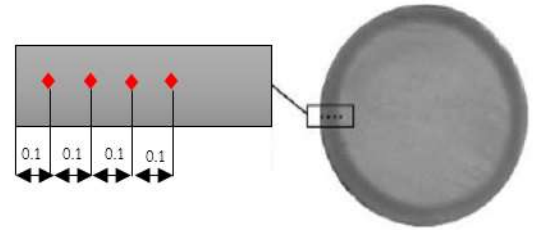


รูปที่ 4 ลำดับขั้นตอนการให้ความร้อน เวลาและการเย็นตัว

2.7 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็ง และระยะลึกผิวแข็ง จะใช้เครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ เนื่องจากเครื่องทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์เหมาะสำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบแข็งที่ผิว และชิ้นงานชุบเคลือบที่ผิว เป็นต้น โดยทำการทดสอบบริเวณขอบผิวของชิ้นงาน ที่ระยะ 0.1 มิลลิเมตร เข้าไปบริเวณผิวด้านในของชิ้นทดสอบ โดยใช้ระยะห่างจุดทดสอบที่ 0.1 มิลลิเมตร ในการทดสอบค่าความแข็ง แล้วจะดำเนินไปถึงระยะลึกผิวชิ้นงานที่ 2.4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 โดย

ใช้มาตรฐานทดสอบตามเอกสารอ้างอิง [11] เป็นเกณฑ์วัดระยะลึกผิวแข็ง



รูปที่ 5 ลักษณะตำแหน่งการทดสอบความแข็ง

3. ผลการวิจัย

3.1 ส่วนผสมทางเคมี

การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1020 ในขั้นตอนก่อนนำชิ้นทดสอบไปทำการชุบแข็งด้วยกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง โดยนำชิ้นงานขัดผิวหน้าของเหล็กด้วยกระดาษทราย จากนั้นล้างด้วยแอลกอฮอล์ เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นทดสอบ แล้ววิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน และปริมาณธาตุประกอบอื่น ๆ ด้วยเครื่องตรวจสอบปริมาณธาตุ ยีห้อ (Arc Emission Spectrometer) รุ่น MAX x LMF 05 ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ทดสอบ 3 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1020 ก่อนชิ้นงานผ่านการอบเพิ่มคาร์บอน

เหล็ก	Chemical Composition (% by weight)									
	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
มาตรฐาน AISI1020	0.2		0.05	0.05	0.45					Bal.
			max	max						
ชิ้นงานทดสอบ	0.24	0.253	0.0056	0.0032	0.48	0.0163	0.33	0.0022	0.01	Bal.

3.2 ความแข็งและระยะลึกผิวแข็ง

ระยะลึกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1020 ที่ผ่านการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง 900 องศาเซลเซียส เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง เมื่อใช้สารเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยแครง โดยพิจารณาที่ระดับค่าความแข็งที่ 550 HV โดยใช้มาตรฐาน SAE

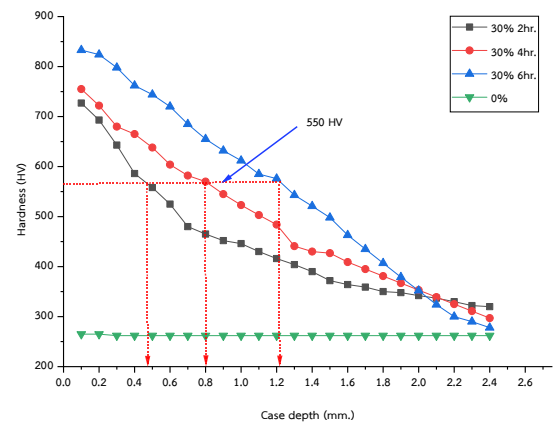
J423 [10] เป็นเกณฑ์วัดระยะ ระยะลึกผิวแข็งพบว่า ช่วงเวลาในการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง จะส่งผลต่อระยะลึกผิวแข็ง ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง แสดงดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า เมื่ออุณหภูมิ และเวลาการอบเพิ่มคาร์บอนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น การทดสอบระยะลึกผิวแข็ง

พบว่า ช่วงเวลาในการแพ็คคาร์บอนโรซิง จะส่งผลต่อระยะลึกผิวแข็ง แสดงดังรูปที่ 6 (ก) โดยเวลาในการอบเพิ่มคาร์บอน 2 ชั่วโมง จะให้ระยะลึกผิวแข็ง 0.45 มิลลิเมตร ส่วนเวลา 4 ชั่วโมง ให้ระยะลึกผิวแข็ง 0.83 มิลลิเมตร และเวลา 6 ชั่วโมง ให้ระยะลึกผิวแข็ง 1.25 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาจาก ระยะลึกผิวแข็งที่ระดับค่าความแข็งที่ 550 HV เมื่อปรับเวลาการเพิ่มคาร์บอนให้สูงขึ้น ระยะลึกผิวแข็งจะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการแพ็คคาร์บอนโรซิงที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 6 (ข) พบว่าเวลาที่ 2 ชั่วโมง ให้ระยะลึกผิวแข็ง 0.79 มิลลิเมตร เวลาเพิ่มขึ้น 4 ชั่วโมงระยะลึกผิวแข็ง 1.27 มิลลิเมตร และเวลา 6 ชั่วโมง ให้ระยะลึกผิวแข็งมากถึง 1.54 มิลลิเมตร การเพิ่มขึ้นของระยะลึกผิวแข็ง เป็นเพราะอุณหภูมิในการแพ็คคาร์บอนโรซิงเพิ่มขึ้นส่งผลต่อระยะลึกผิวแข็ง แสดงดังรูปที่ 6 (ค) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ช่วงเวลาการแพ็คคาร์บอนโรซิงที่เวลา 2 ชั่วโมง ให้ระยะลึกผิวแข็งอยู่ที่ 1.11 มิลลิเมตร แต่เมื่อเพิ่มเวลาไปที่ 4 ชั่วโมง ระยะลึกผิวแข็งอยู่ที่ 1.55 มิลลิเมตร และ 6 ชั่วโมง ค่าระยะลึกผิวแข็งจะเพิ่มขึ้นถึง 1.92 มิลลิเมตร

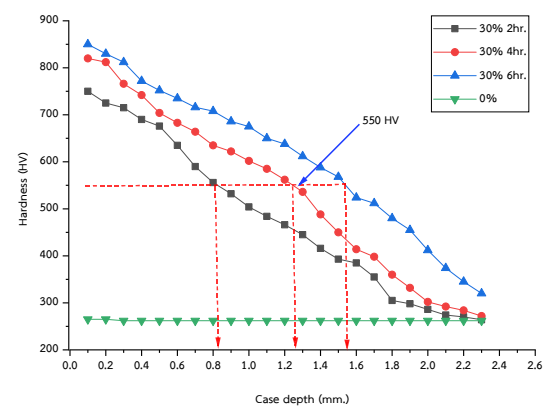
3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

3.3.1 ตรวจสอบความถูกต้องข้อมูล

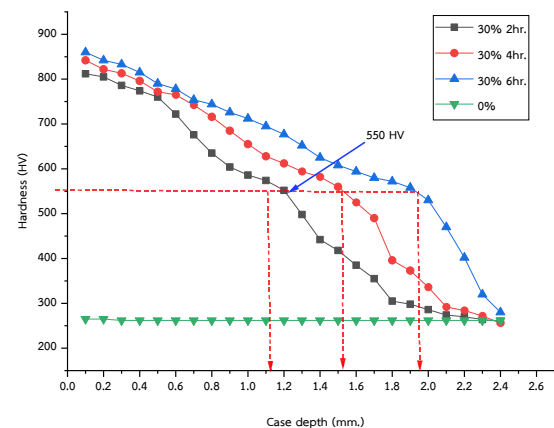
การวิเคราะห์ทางสถิติทางผู้วิจัยใช้โปรแกรม Minitab 17 ในการวิเคราะห์ ก่อนการวิเคราะห์ที่ปัจจัยที่เหมาะสม จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลของผลการทดสอบค่าความแข็งรวม ถึงการตรวจสอบสมมติฐานด้วยหลักทางสถิติและตรวจสอบค่าความแปรปรวน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ การทดสอบ Test for normality ของค่าความแข็งของเหล็กที่ทำการทดลอง โดยตั้งสมมติฐานคือ H_0 : เศษตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ H_1 : เศษตกค้างไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติจากการทดสอบด้วย Anderson-darling test ของค่าความแข็ง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่ามีค่า P-Value 0.608 ของความแข็งมีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงถึงเศษตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



(ก) อบเพิ่มคาร์บอน 900 องศาเซลเซียส

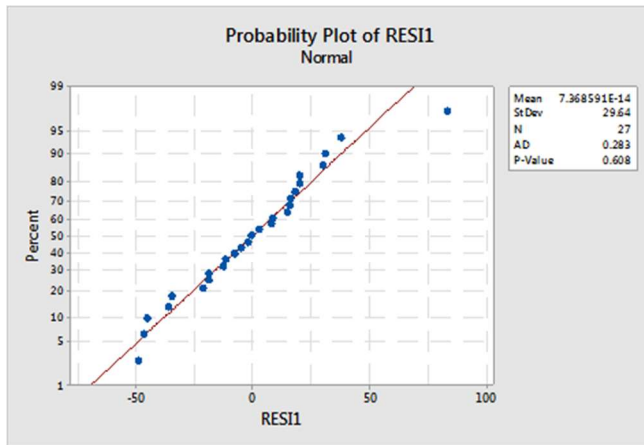


(ข) อบเพิ่มคาร์บอน 950 องศาเซลเซียส



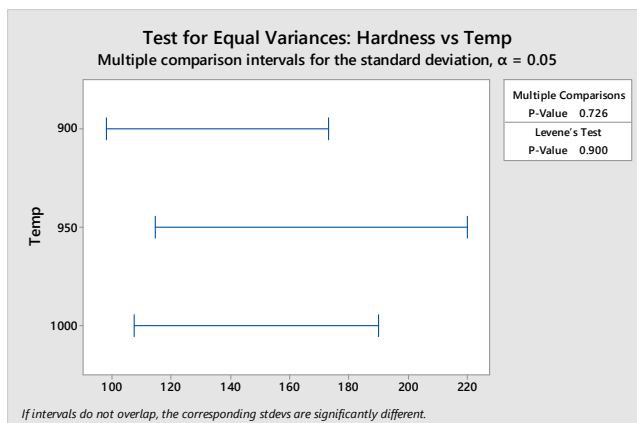
(ค) อบเพิ่มคาร์บอน 1,000 องศาเซลเซียส

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์อุณหภูมิอบเพิ่มคาร์บอนต่อระยะลึกผิวแข็ง



รูปที่ 7 Probability plot ของค่าความแข็ง

สำหรับการทดสอบ Homogeneity of variance ของค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง โดยตั้งสมมติฐานไว้ คือ H_0 : ความแปรปรวนของเศษตกค้างทุกกลุ่มเท่ากัน H_1 : ความแปรปรวนของเศษตกค้างแตกต่างกันอย่างน้อย 2 กลุ่ม จากผลของค่า Multiple comparisons ของค่าความแข็ง แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าได้ค่าของ P-Value 0.726 ในขณะเดียวกันค่า Levene's test ของค่าความแข็งได้ค่า P-Value 0.900 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงว่าเศษตกค้างมีความแปรปรวนที่เท่ากัน



รูปที่ 8 ทดสอบ Homogeneity of variance ค่าความแข็ง

การทดสอบ Test for independence ของค่าความแข็งที่ได้จากการทดลอง จากผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่

9 โดยตั้งสมมติฐาน คือ H_0 : เศษตกค้างเป็นอิสระกัน H_1 : เศษตกค้างไม่ได้เป็นอิสระกัน พบว่าความแข็งมีค่า P-value 0.895 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงว่าเศษตกค้างเป็นอิสระต่อกัน

Runs Test: Hardness

Runs test for Hardness

Runs above and below K = 662.519

The observed number of runs = 14
The expected number of runs = 14.3333
15 observations above K, 12 below
P-value = 0.895

รูปที่ 9 ทดสอบ Independence ค่าความแข็ง

จากการตรวจสอบข้อสมมติฐานด้วยหลักทางสถิติ ทั้ง 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 ดังนั้น จึงสามารถนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้

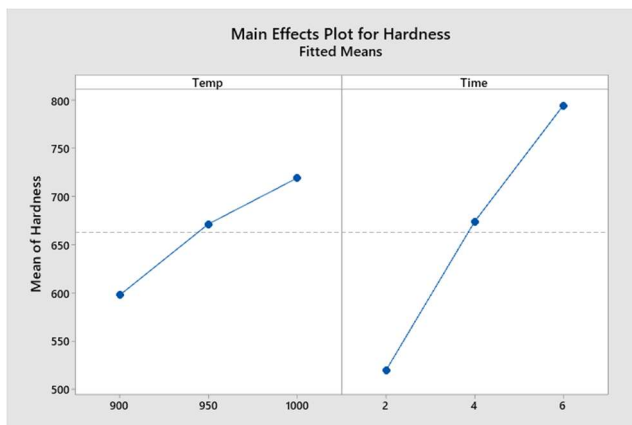
3.3.2 อิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง

การวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิ อบเพิ่มคาร์บอน เวลาอบเพิ่มคาร์บอน และปัจจัยร่วมนั้นมีผลต่อค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กที่นำมาทำการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยตารางที่ 4 แสดงรายละเอียดของปัจจัยร่วมมีค่า P-value น้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ทุกปัจจัย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยร่วมดังกล่าวนี้มีผลต่อค่าความแข็งเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ และจากผลการทดลองได้ค่าของ R-sq เท่ากับ 94.78 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่า R-sq (adj) มีค่าเท่ากับ 92.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าของ R-sq แสดงถึงข้อมูลมีจำนวนเพียงพอในการวิเคราะห์

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ variance

General factorial regression: Hardness versus temperature, time						
Factorial information						
Factor	Levels		Values			
Temp	3	900	950	1,000		
Time	3	2	4	6		
Analysis of variance						
Source		Df	Adj. SS	Adj. MS	F-Value	P-Value
Model		8	414761	51845	40.6	0.000
Linear		4	41048	102621	80.87	0.000
Temp		2	67635	33818	26.65	0.000
Time		2	342849	171425	135.10	0.000
2Way interaction		4	4276	1069	0.84	0.516
Temp*Time		4	4276	1069	0.84	0.516
Error		18	22840	1269		
Total		26	437601			
Model summary						
S		R-Sq		R-Sq (adj)		R-Sq (pred)
35.6215		94.78%		92.46%		88.26%

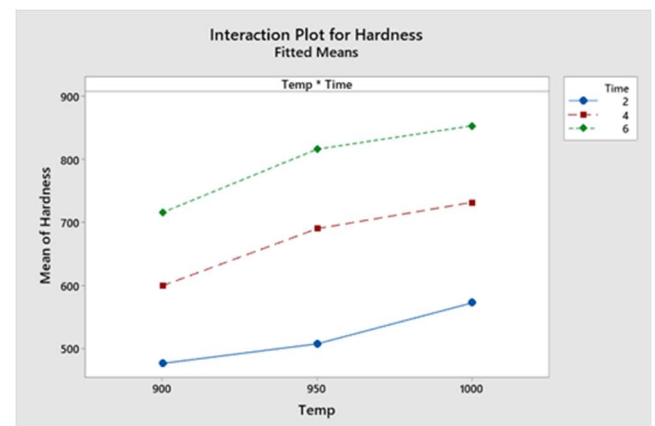
ผลการวิเคราะห์อิทธิพลจากปัจจัยหลักทั้ง 2 ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่า การปรับปัจจัยของอุณหภูมินั้นมีผลต่อค่าความแข็ง แต่น้อยกว่าการปรับระดับปัจจัยของเวลาโดยพิจารณาจากความชันของเส้นกราฟ การปรับเวลาอบเพิ่มคาร์บอนที่ระดับสูงสุดนั้นทำให้ค่าความแข็งเท่ากับ 861 HV ซึ่งมากกว่าการปรับอุณหภูมิอบเพิ่มคาร์บอนที่ให้ค่าความแข็งเท่ากับ 731 HV



รูปที่ 10 กราฟวิเคราะห์ปัจจัยหลักค่าความแข็งของสารเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครง

การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมทั้ง 2 ปัจจัย ดังแสดงในรูปที่ 11 ปัจจัยของอุณหภูมิอบเพิ่มคาร์บอนต่อเวลาต่าง ๆ พบว่า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เมื่อทำการปรับเวลาที่ 2, 4 และ

6 ชั่วโมง ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยโดยมีค่าความแข็งเท่ากับ 477, 508 และ 572 HV ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิอบเพิ่มคาร์บอนที่ 950 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความชันของกราฟคล้ายกับอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งเท่ากับ 599, 690 และ 731 HV ส่วนค่าความแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส โดยใช้การปรับเวลาที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเท่ากับ 715, 815 และ 852 HV

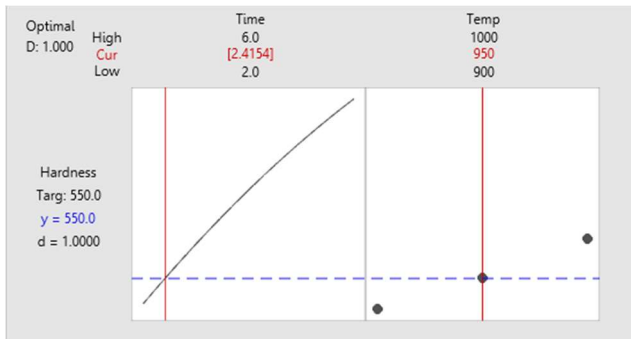


รูปที่ 11 กราฟวิเคราะห์ปัจจัยร่วมค่าความแข็งของสารเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครง

3.3.3 ปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความแข็ง

ระดับของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 12 พบว่า เมื่อทำการกำหนดเป้าหมายของค่าความแข็ง Target เท่ากับ 550 HV เห็นได้ว่าปัจจัยที่เหมาะสมของอุณหภูมิในการอบ

เพิ่มคาร์บอน คือ 950 องศาเซลเซียส และเวลาในการอบเพิ่มคาร์บอน คือ 2.41 นาฬิกา โดยค่าความแข็งอยู่ที่ 550 HV พบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการแพ็คคาร์บอนโรซิงอยู่ในช่วงที่ต้องการเพิ่มความแข็งที่ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 12 กราฟวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมค่าความแข็งของสารเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครง

3.3.4 การทดลองเพื่อยืนยันผล

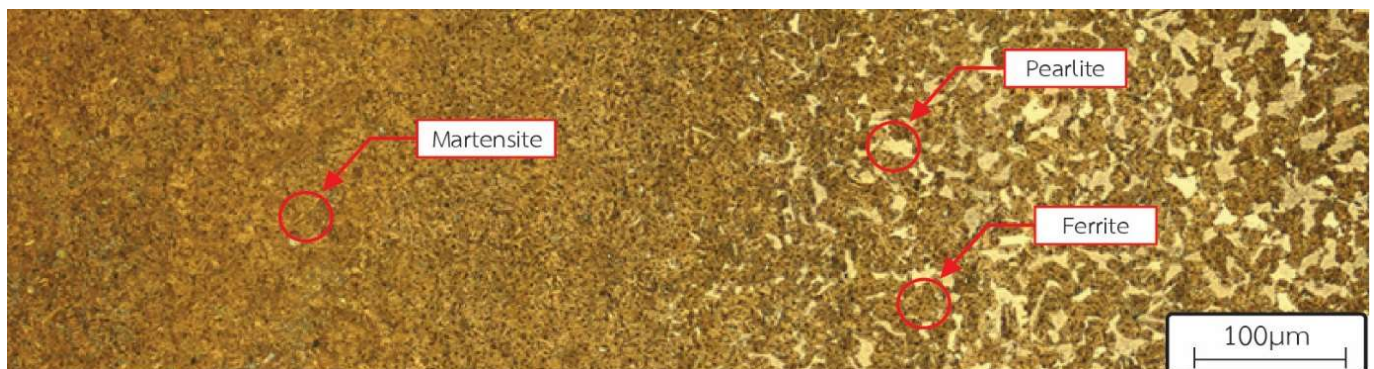
การทดลองเพื่อยืนยันผลของระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากค่าทางสถิติ จึงทำการทดลองชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1020 ด้วยกระบวนการแพ็คคาร์บอนโรซิง ตามสถานะของเวลา และอุณหภูมิอบเพิ่มคาร์บอนที่ได้จากค่าที่เหมาะสมของสารเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครง โดยผลการทดสอบค่าความแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 733 HV โดยค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำอยู่ในช่วงควบคุมระหว่าง 456-865 HV

ตารางที่ 5 ค่าความแข็งของการทดลองเพื่อยืนยันผล

No.					Average	SD
1	2	3	4	5		
720	749	770	725	704	733	26

3.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

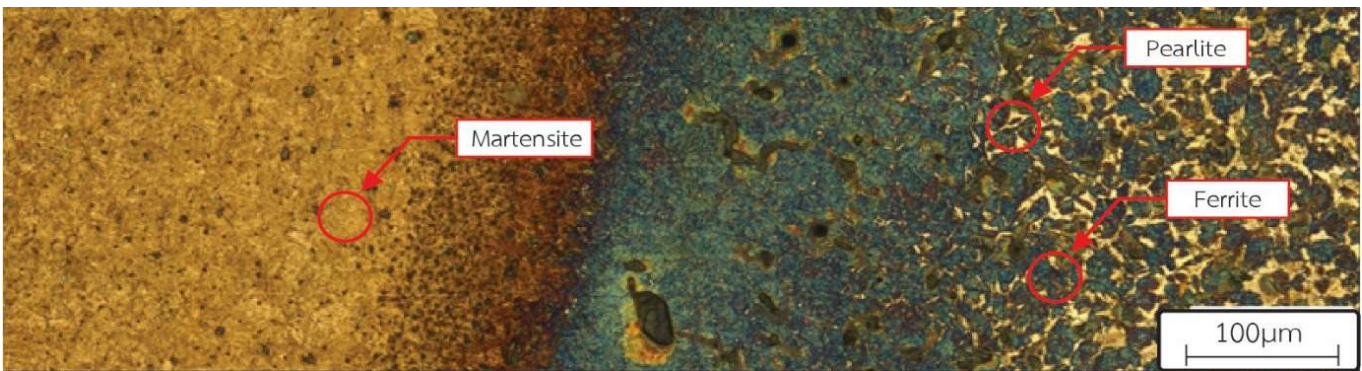
จากรูปที่ 13 – 15 แสดงโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์บอนโรซิงโดยใช้สารเพิ่มคาร์บอนจากถ่านกะลามะพร้าว 70 เปอร์เซ็นต์ และสารเร่งปฏิกิริยาจากเปลือกหอยแครง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 900 950, และ 1,000 องศาเซลเซียส เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ จากนั้นทำเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส โดยวัดระยะจากขอบของชิ้นงานเข้าไปด้านในของชิ้นงานตามระยะที่กำหนดคือระยะ 0.1 ถึง 2.5 มิลลิเมตร จากรูปที่ 13 เวลาในการอบเพิ่มคาร์บอนที่ 2 ชั่วโมง ที่ระยะ 0.1 – 0.7 มิลลิเมตร พบโครงสร้างเป็นมาเทนไซต์ส่วนใหญ่ ที่ระยะลึกผิว 0.7 – 2.5 มิลลิเมตร พบโครงสร้างมาเทนไซต์น้อยลง ส่วนโครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์มีมากขึ้น จากรูปที่ 14 เวลาในการอบเพิ่มคาร์บอนที่ 4 ชั่วโมง ที่ระยะ 0.1 – 1.0 มิลลิเมตร พบโครงสร้างมาเทนไซต์ ซีเมนไทต์ เพิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ ที่ระยะ 1.0 – 2.5 มิลลิเมตร พบโครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ และจากรูปที่ 15 เวลาในการอบเพิ่มคาร์บอนที่ 6 ชั่วโมง ที่ระยะ 0.1 – 1.3 มิลลิเมตร พบโครงสร้างมาเทนไซต์ ซีเมนไทต์ มากขึ้น ส่วนเพิร์ลไลต์ และเฟอร์ไรต์ ที่ระยะ 1.3 – 2.5 มิลลิเมตร โครงสร้าง เฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์จะน้อยลง



รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคการอบเพิ่มคาร์บอนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 14 โครงสร้างจุลภาคการอบเพิ่มคาร์บอนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง



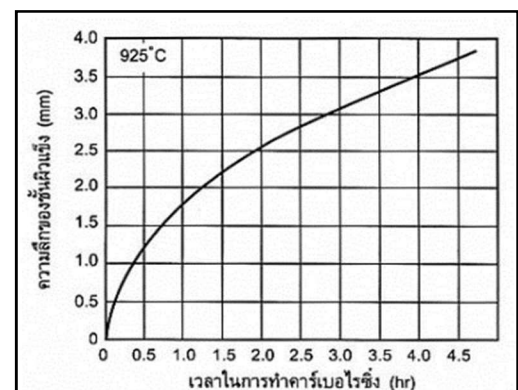
รูปที่ 15 โครงสร้างจุลภาคการอบเพิ่มคาร์บอนที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง

4. อภิปรายผล

การชุบแข็งที่ผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์โบไรซิ่ง โดยใช้ผงถ่านกลามะพร้าวผสมกับสารเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยแครงที่ปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 900, 950 และ 1,000 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับอุณหภูมิกระบวนการแพ็คคาร์โบไรซิ่งที่เพิ่มสูงมากขึ้นส่งผลให้ค่าระยะลึกผิวแข็งเพิ่มมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงมากขึ้นส่งผลให้พลังงานความร้อนเพิ่มสูงมากขึ้น จึงทำให้คาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อเหล็กได้มากขึ้น และทำให้คาร์บอนสามารถละลายเข้าไปในเนื้อเหล็กได้มากขึ้นโดย จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงมากขึ้น ความสามารถในการละลายของคาร์บอนในออสเทนไนต์จะเพิ่มสูงมากขึ้น

อีกปัจจัยหนึ่งของกระบวนการแพ็คคาร์โบไรซิ่ง ที่มีผลต่อค่าความแข็ง และระยะลึกผิวแข็ง คือ เวลาการอบเพิ่มคาร์บอน จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาการอบเพิ่มคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ระยะลึกผิวแข็งเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 16 ที่เป็นเช่นนี้เพราะเวลาอบเพิ่มคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น ทำให้คาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปในผิวเหล็กได้เพิ่มมากขึ้น [2] ดังนั้นเวลาที่

ใช้ในการทดสอบการอบเพิ่มคาร์บอนที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง จึงทำให้ค่าระยะลึกผิวแข็งชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นที่เวลา 6 ชั่วโมง ระยะลึกผิวแข็ง 1.92 มิลลิเมตร ที่ว่าค่าความแข็งจะสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนให้ค่าความแข็ง และระยะลึกผิวแข็ง โดยมีปริมาณคาร์บอนสูง เพราะอะตอมของคาร์บอนมีเวลามากพอที่จะแพร่เข้าไปในชิ้นงาน



รูปที่ 16 ผลของเวลาในการอบแช่ที่มีต่อค่าความลึกชั้นผิวแข็ง

5. สรุป

การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ โดยการนำหลักการออกแบบการทดลองทางสถิติมาวิเคราะห์ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการแพ็กคาร์บอนโรซิงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด AISI 1020 เพื่อหาระยะลึกผิวแข็ง และค่าความแข็งภายใต้เงื่อนไขการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าความแข็งและระยะลึกที่เพิ่มขึ้นหลังจากกระบวนการชุบแข็งด้วยกระบวนการแพ็กคาร์บอนโรซิง โดยใช้เปลือกหอยแครงเป็นสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าปัจจัยที่ทำให้ระยะลึกผิวแข็งมาก คือ อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ที่เวลา 6 ชั่วโมง

2. เมื่อพิจารณาผลกระทบหลังการแพ็กคาร์บอนโรซิงพบว่า ผลของระยะลึกผิวแข็งมีความแตกต่างกันออกไปถึงระยะลึกผิวแข็งว่ามีผลที่เพิ่มขึ้นตามขอบเขตของการแพ็กคาร์บอนโรซิง

3. เมื่อพิจารณาผลของระยะลึกผิวแข็งของการใช้สารเร่งปฏิกิริยาเปลือกหอยแครง พบว่าสามารถนำมาเป็นสารเร่งปฏิกิริยา โดยให้ค่าความแข็งที่ผิว 850 HV และระยะลึกผิวแข็ง 1.92 มิลลิเมตร

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำวิจัยขอขอบพระคุณกองทุนวิจัยพื้นฐานเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน สำหรับบุคลากรสายของวิชาการคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยปีงบประมาณ 2566 และขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้ ส่งผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. รายงานสถานการณ์อุตสาหกรรมเหล็ก. กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม. เข้าถึงได้จาก: <https://www.mreport.co.th/news/industry-movement/308-Thai-steel-industry-2022-continues-to-grow> [เข้าถึงเมื่อ 20 มีนาคม 2567].
- [2] มนัส สติรจินดา. วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2538

- [3] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. โลหะวิทยา. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2556.
- [4] Ogo DUI, Terver A, Ibanga EJ. The use of river clam shells as an energizer in case carburization of mild steels. *ISIJ International*. 2004;44(5): 865-868.
- [5] Sinha, A. K. *Physical Metallurgy Handbook*. McGraw-Hill Company Inc; 2003.
- [6] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, สมบัติ น้อยมิ่ง, วรรณ หอมจะบก, อมรศักดิ์ มาใหญ่, จารุพงษ์ บรรเทา. อุณหภูมิและเวลาอบเพิ่มคาร์บอนที่เหมาะสมในการชุบแข็งมิตได้ด้วยกระบวนการแพ็กคาร์บอนโรซิงที่ใช้เปลือกหอยเชอรี่เป็นสารเร่งปฏิกิริยา. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.* 2540;14(4): 116-128.
- [7] สุภกร บุญยืน, มณฑา มาลัยทอง, อภิสิทธิ์ โพธิ์แก้ว. การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 2558;4(2): 115-122.
- [8] พีรวัส คงสง, นันทนา จันทรโสม, ศิริพร เผ่าหนองคู. การเปรียบเทียบสารเร่งปฏิกิริยาระหว่างเถ้าไม้ยางพารากับแคลเซียมคาร์บอเนตในกระบวนการแพ็กคาร์บอนโรซิงโดยใช้ผงถ่านไม้ยางพารา. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*. 2562;11(2): 208-218.
- [9] ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. *วัสดุวิศวกรรม*. บริษัท ส.เอเชียเพรส (1989) จำกัด; 2558.
- [10] SAE. (1998). J423: Case Depth.
- [11] Genel K, Demirkol M. A method to predict effective case depth in ion nitride steels. *Surface and Coatings Technology*. 2005;1(23): 116-120.
- [12] Hosseini ESR. The simulation of case depth of cementation steels according to Fick's laws. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012;19(11): 71-78.