ผลของเวลาอบแช่ในกระบวนการอบชุบความร้อนแบบไซคลิกต่อโครงสร้างคาร์ไบด์แบบตาข่ายของเหล็กกล้าคาร์บอนคาร์เบอร์ไรซิง

The Effect of Holding Time in Cyclic Heat Treatment Process on Network Carbide Structure of Carburized Carbon Steel

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ วรรณา หอมจะบก* อมรศักดิ์ มาใหญ่ และ สมบัติ น้อยมิ่ง

Narongsak Thammachot, Wanna Homjabok*, Amornsak Mayai and Sombut Noyming

Received: 7 March 2019, Revised: 30 July 2019, Accepted: 15 October 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเวลาอบแช่ในการอบชุบความร้อนแบบไซคลิกที่มีต่อโครงสร้างคาร์ไบด์แบบตาข่ายและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรด์ การทดลองทำโดยการนำชิ้นทดสอบมาทำการให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิวิกฤติเส้น A_1 ที่อุณหภูมิ 780 °C สลับกับต่ำกว่าเส้น A_1ที่อุณหภูมิ 680 °C จำนวน 5 รอบ แต่ละรอบใช้เวลาอบแช่ 0, 5 และ 10 นาที จากนั้น นำชิ้นทดสอบมาทำการชุบแข็งโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิออสเทนไนต์ 780 °C เวลา 30 นาที จุ่มชุบในน้ำแล้วเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 180 °C เวลา160 นาที จากนั้น ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรซิงเกิดโครงสร้างโปรยูเทกตอยด์ซีเมนไทต์หรือคาร์ไบด์แบบตาข่ายในเมทริกซ์เพอร์ไลต์ เมื่อผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกที่เวลาการอบแช่ที่ต่างกัน ทำให้โครงสร้างโปรยูเทกตอยด์ซีเมนไทต์และยูเทกตอยด์ซีเมนไทต์เปลี่ยนแปลงไปเป็นคาร์ไบด์ก้อนกลมกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์เพอร์ไลต์ โดยแนวโน้มของคาร์ไบด์ก้อนกลมจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาอบแช่มากขึ้น ภายหลังทำการชุบแข็งและการเทมเปอร์พบว่า เมทริกซ์เพอร์ไลต์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์เมทริกซ์โดยมีคาร์ไบด์ก้อนกลมกระจายอยู่ทั่วไป ในขณะที่สมบัติทางกลทั้งค่าความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก และความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาอบแช่มากขึ้น

คำสำคัญ: การอบชุบความร้อนแบบไซคลิก, คาร์ไบด์ก้อนกลม, คาร์ไบด์แบบตาข่าย, แพ็คคาร์เบอไรซิง

หน่วยวิจัยโลหวิทยาและการอบชุบความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Metallurgy and Heat Treatment Research Unit, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): whomjabok@hotmail.com

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effect of holding time of cyclic heat treatment on network carbide and mechanical properties of pack carburized low carbon steel. The experiments were conducted by heating the specimens over critical temperature A_1 line at 780 °C followed by cooling down to lower critical temperature A_1 line at temperature of 680 °C. The cycles of heating and cooling were 5 cycles, each of cycle was held at 0, 5 and 10 minutes. They were then hardened by austenitizing temperature of 780 °C with the holding time of 30 minutes followed by quenching in water. Finally, the specimens were tempered at 180 °C for 30 minutes. The microstructure inspection and mechanical properties testing were carried out. The results of this experiment showed that the microstructure of pack carburized specimens consisted of pro-eutectiod cementite or network carbide in pearlite matrix. After cyclic heat treatment, the pro-eutectiod cementite and eutectoid cementite structure transformed to spheroidized carbides and distributed in pearlite matrix. The tendency of spheroidized carbides grew when the holding time increased. After hardening and tempering, the pearlite matrix transformed to martensite matrix with the distributed of spheroidized carbides. The mechanical properties such as hardness, impact and tensile strength tended to rise when the holding time increased.

Key words: cyclic heat treatment, spheroidized carbide, network carbide, pack carburizing

บทนำ

กระบวนการทางความร้อนมีความสำคัญอย่างมากในการปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะให้ดีขึ้นและให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน เหล็กเครื่องมือ (Tool steel) เป็นเหล็กที่มีธาตุผสมสูง มีความสามารถในการชุบแข็งที่ดี ส่งผลทำให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นด้วย (มนัส, 2537) ส่วนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นเหล็กที่ไม่สามารถทำการชุบแข็งได้ เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนที่ต่ำ จึงไม่สามารถเกิดโครงสร้างมาเทนไซต์ได้ภายหลังการชุบแข็ง ทำให้มีสมบัติทางกลที่ด้อยกว่า แต่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีจุดเด่นคือต้นทุนที่ถูกกว่าเหล็กเครื่องมืออยู่มาก จึงมีการศึกษาวิธีการที่จะทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสามารถทำการชุบแข็งได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการชุบแข็งผิวโดยการเพิ่มธาตุคาร์บอนเข้าไปในเนื้อเหล็ก หนึ่งในวิธีการที่มีต้นทุนต่ำ คือ การแพ็คคาร์เบอไรซิง (มนัส, 2537) งานวิจัยนี้จึงอาศัยวิธีแพ็คคาร์เบอไรซิงเพื่อเพิ่มธาตุคาร์บอนที่ผิวของชิ้นงาน จะทำให้สามารถทำการชุบแข็งได้โดยยังคงความเหนียวไว้ภายในโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม เมื่อเหล็กผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงแล้วจะทำให้เกิดโครงสร้างคาร์ไบด์แบบตาข่ายขึ้นบริเวณขอบเกรนของเพอร์ไลต์ ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อสมบัติทางกล และยังทำให้กระบวนการตัด กลึง ไส ทำได้ยาก จึงต้องมีกระบวนอบชุบความร้อนที่สามารถเปลี่ยนคาร์ไบด์แบบตาข่ายให้เป็นคาร์ไบด์ก้อนกลม หนึ่งในกระบวนการอบชุบความร้อนให้ได้คาร์ไบด์ก้อนกลมคือกระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิก ซึ่งเป็นกระบวนที่ทำให้คาร์ไบด์ที่มีลักษณะเป็นตาข่ายขาดออกจากกันและเปลี่ยนไปเป็นคาร์ไบด์ก้อนกลม โดยที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษากระบวนการดังกล่าว เช่น Atanu *et al*. (2010) ได้ศึกษาผลของ

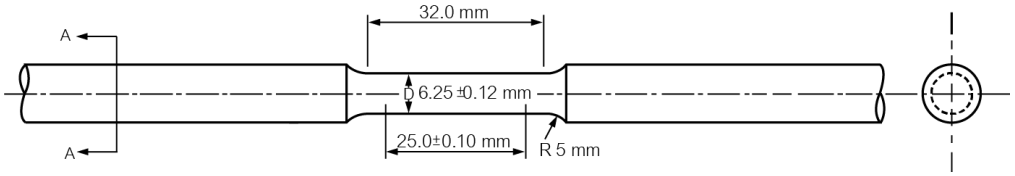
กระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้า Fe-0.6C โดยพบว่าจำนวนรอบที่มากขึ้นจะทำให้ได้โครงสร้างที่เล็กละเอียด ช่วยให้สมบัติทางกลดีขึ้น ต่อมา Lv *et al*. (2013) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเกิดคาร์ไบด์ก้อนกลมจากกระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกในเหล็กกล้า Fe-0.8C ซึ่งทำให้สมบัติทางกลดีขึ้น นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยของ Alok *et al*. (2016) ได้ทำการศึกษากระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกเพื่อใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางกลให้แก่เหล็กกล้า AISI 1080 หรือเหล็กกล้ายูเต็กตอยด์ (eutectoid steel) จะเห็นได้ว่า งานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้กระบวนทางความร้อนแบบไซคลิกให้แก่เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (high carbon steel) แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอร์ไรซิง

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเวลาอบแช่ในการอบชุบความร้อนแบบไซคลิกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรซิงที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว

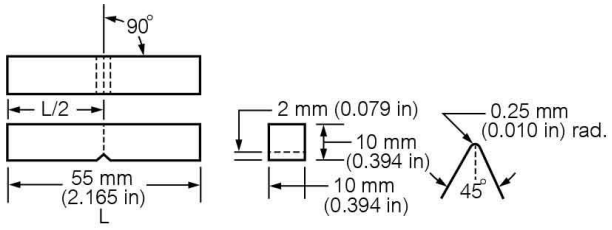
วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมชิ้นทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 มีลักษณะเป็นแท่งกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer พบว่ามีปริมาณธาตุผสมประกอบด้วย 0.163 %C, 0.06 %Mn, 0.0042 %P และ 0.012 %S ตามลำดับ จากนั้นนำเหล็กมาตัดและกลึงขึ้นรูปให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM A370-14 (ASTM, 2016) ดังแสดงในภาพที่ 1 (ก) โดยบริเวณที่จะถูกจับด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงมีการเผื่อขนาดให้มีความยาวมากขึ้นเพื่อตัด (ส่วน A-A) นำไปวัดค่าความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ส่วนชิ้นทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy) แสดงในภาพที่ 1 (ข) จำนวนชิ้นทดสอบที่ใช้แต่ละการทดลองจะใช้จำนวน 3 ชิ้น



(ก)



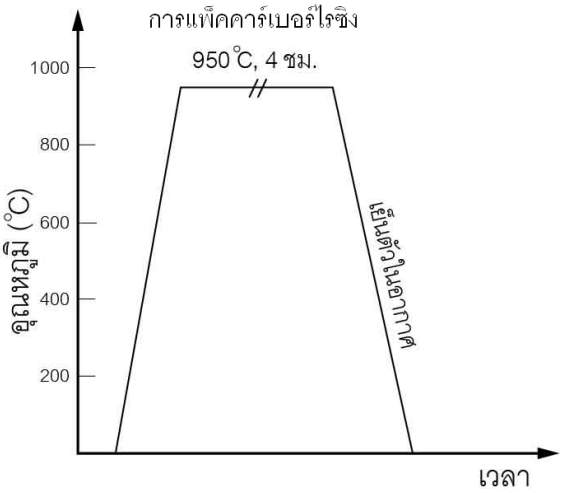
(ข)

ภาพที่ 1 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (2016)
(ก) ชิ้นทดสอบแรงดึง และ (ข) ชิ้นทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปี

2. กระบวนการอบชุบความร้อน

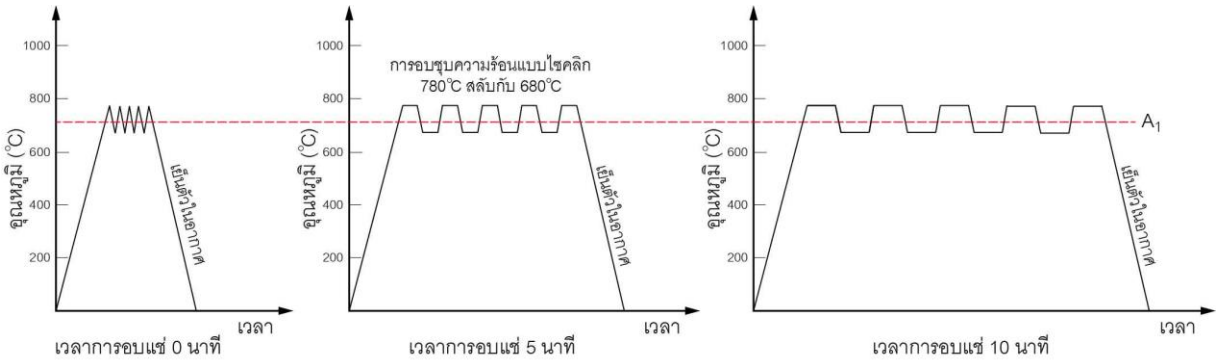
กระบวนการอบชุบความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการแพ็คคาร์เบอไรซิง ขั้นตอนที่สองเป็นการอบชุบความร้อนแบบไซคลิก และขั้นตอนที่สามเป็นการชุบแข็ง โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนแรกของการแพ็คคาร์เบอไรซิงเป็นการเพิ่มธาตุคาร์บอนเข้าไปในผิวเหล็ก โดยการนำถ่านไม้ยูคาลิปตัสมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาดรู 1 มิลลิเมตร (16 Mesh) จากนั้นนำมาผสมกับผงสารเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก เมื่อผสมเสร็จจึงนำมาบรรจุลงในกล่องเหล็กพร้อมชิ้นทดสอบแล้วทำการปิดฝากล่อง นำเข้าเตาอบ โดยใช้อุณหภูมิ 950 °C เวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำออกจากเตาให้เย็นตัวในอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2



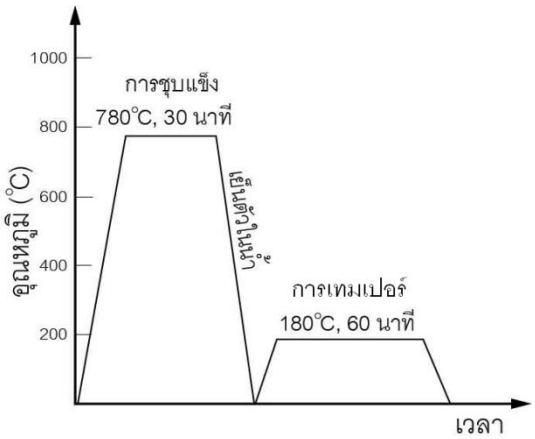
ภาพที่ 2 การแพ็คคาร์เบอไรซิงเพื่อเพิ่มธาตุคาร์บอนที่ผิวเหล็ก

ขั้นตอนที่สอง หลังจากชิ้นทดสอบถูกเพิ่มธาตุคาร์บอนด้วยกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรซิงแล้ว จะถูกนำมาอบชุบความร้อนแบบไซคลิก เพื่อเปลี่ยนคาร์ไบด์แบบตาข่ายให้เป็นคาร์ไบด์ก้อนกลม โดยทำการให้ความร้อนชิ้นทดสอบสลับขึ้นลงระหว่างอุณหภูมิวิกฤต A_1 (727 °C) โดยอุณหภูมิเหนือเส้น A_1 อยู่ที่อุณหภูมิ 780 °C และอุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_1 อยู่ที่ 680 °C สำหรับเวลาอบแช่ที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_1 และต่ำกว่าเส้น A_1 นั้นแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มชิ้นทดสอบ โดยชิ้นทดสอบกลุ่มแรกให้เวลาในการอบแช่ 0 นาที ส่วนชิ้นทดสอบกลุ่มที่สองให้เวลาในการอบแช่ 5 นาที และชิ้นทดสอบกลุ่มที่สามให้เวลาในการอบแช่ 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 3 การให้อุณหภูมิสลับขึ้นลงจะกำหนดไว้ที่จำนวน 5 รอบ แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



ภาพที่ 3 การอบชุบความร้อนแบบไซคลิกเพื่อเปลี่ยนคาร์ไบด์แบบตาข่ายให้เป็นคาร์ไบด์ก้อนกลม

ขั้นตอนที่ 3 การชุบแข็ง โดยนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบความร้อนแบบไซคลิกมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 780 °C เวลา 30 นาที จากนั้นจุ่มชุบในน้ำแล้วเทมเปอร์ที่อุณหภูมิ 180 °C เวลา 60 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การชุบแข็งและการเทมเปอร์

3. การทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

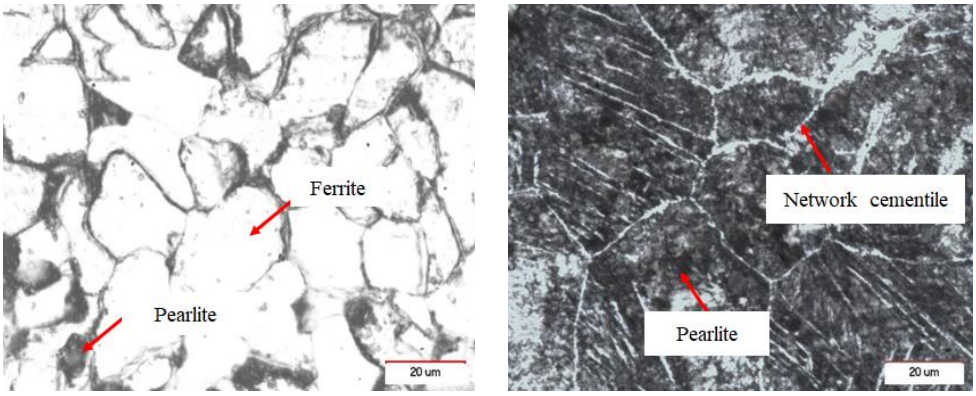
ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนทางความร้อนมาแล้ว จะถูกนำมาทดสอบสมบัติทางกล โดยการทดสอบความต้านทานแรงดึง ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 100 kN ยี่ห้อ LLOYDK รุ่น LS 100 plus ความเร็วทดสอบคือ 5 มิลลิเมตร/นาที การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกทำการทดสอบแบบชาร์ปีด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกยี่ห้อ AVERY DENISON รุ่น LS102DE สำหรับการทดสอบความแข็งใช้เครื่องไมโครวิกเกอร์สแบบดิจิตอลยี่ห้อ MATSUZAWA รุ่น MMT-X34 แรงกดในการทดสอบคือ 300 gf เวลา 10 นาที และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคใช้การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX60M

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. โครงสร้างจุลภาค

ชิ้นทดสอบที่นำมาใช้ในการทดสอบ คือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1020 ประกอบด้วยโครงสร้างของเพอร์ไลต์ (Pearlite) และเฟอร์ไรต์

(Ferrite) ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) เมื่อผ่านการเพิ่มธาตุคาร์บอนที่ผิวด้วยกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรซิงเพื่อเพิ่มธาตุคาร์บอนที่ผิว และเมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Optical Emission Spectrometer พบว่ามีปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผิวเพิ่มขึ้น จาก 0.163 % เป็น 0.908 % ซึ่งคือเหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเต็กตอยด์ (hypereutectoid steel) ทำให้เกิดโครงสร้างโปรยูเทกตอยด์ซีเมนไทต์ (Pro-eutectiod cementite) ที่ล้อมรอบโครงสร้างเพอร์ไลต์ซึ่งเป็นเมทริกซ์ (Matrix) ดังแสดงในภาพที่ 5 (ข) ลักษณะของซีเมนไทต์ที่เกิดขึ้นตามขอบเกรนมีการเชื่อมต่อเป็นคาร์ไบด์แบบตาข่าย (Network carbide) หรือซีเมนไทต์แบบตาข่าย (Network cementite)



(ก) (ข)

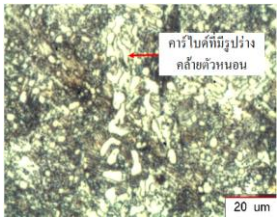
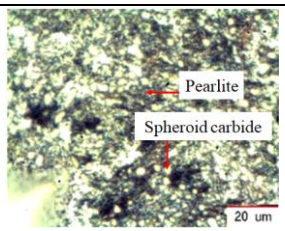
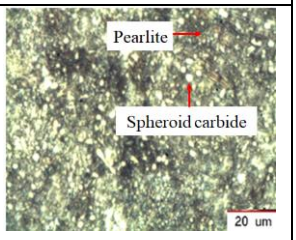
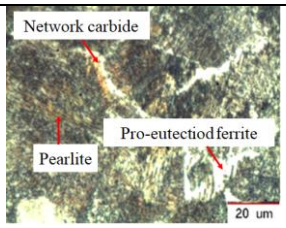
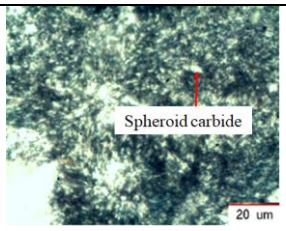
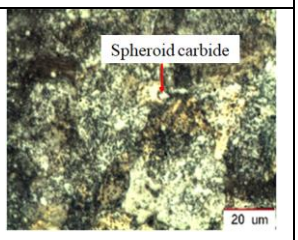
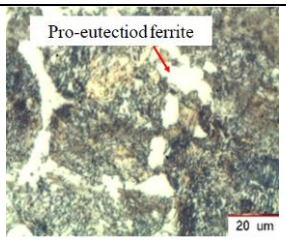
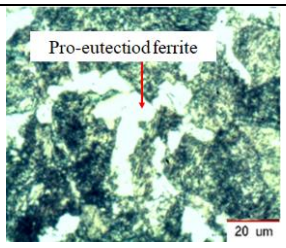
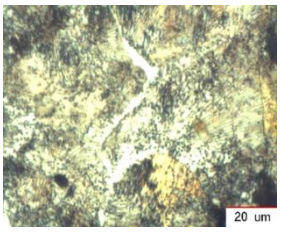
ภาพที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของ (ก) AISI 1020 และ (ข) หลังการผ่านกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรซิง

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงไปทำการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิก ที่เวลาอบแช่ 0, 5 และ 10 นาที จำนวน 5 รอบ แล้วนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าที่ระยะลึกเข้าไปจากขอบชิ้นงาน 0.2 มิลลิเมตร ที่เวลาอบแช่ 0 นาที คาร์ไบด์ก้อนกลมขนาดเล็กเกิดขึ้นบนเมทริกซ์เพอร์ไลต์ แต่คาร์ไบด์แบบตาข่ายที่มีขนาดใหญ่กว่าจะขาดออกจากกันแล้วเริ่มฟอร์มรูปร่างเป็นก้อนกลม แต่ยังไม่สมบูรณ์จึงมีลักษณะคล้ายตัวหนอน ซึ่งแตกต่างจากเวลาอบแช่ที่ 5 และ 10 นาที ที่คาร์ไบด์จะฟอร์มรูปร่างเป็นคาร์ไบด์ก้อนกลม (Spheroid carbide) กระจายตัวอยู่บนเมทริกซ์เพอร์ไลต์ทั่วไป ผลในส่วนนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alok *et al.* (2016) งานวิจัยของ Lv *et al.* (2013) และงานวิจัยของ Atanu *et al.* (2010) ที่พบว่ากระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกว่าซีเมนไทต์จะเกิดการแตกออกจากกัน

ในขณะเดียวกันที่ระยะลึกเข้าไปที่ 0.8 มิลลิเมตร ปริมาณธาตุคาร์บอนแพร่เข้ามาที่ระยะนี้ได้น้อย ทำให้มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่าจุดยูเทกตอยด์ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์ เมื่อผ่านการให้ความร้อนแบบไซคลิก จึงปรากฏคาร์ไบด์ก้อนกลมเพียงเล็กน้อยของเวลาการอบแช่ที่ 5 และ 10 นาที เท่านั้น ส่วนที่เวลาอบแช่ 0 นาที จะพบโปรยูเทกตอยด์เฟอร์ไรต์ (Pro-eutectiod ferrite) อยู่ในเมทริกซ์เพอร์ไลต์ด้วย

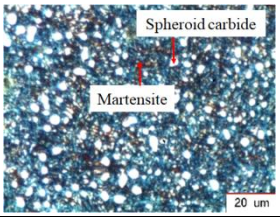
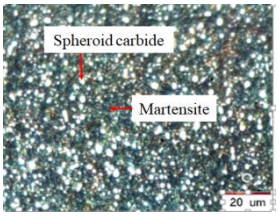
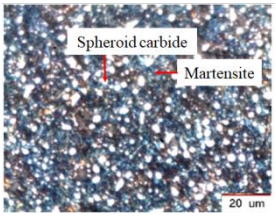
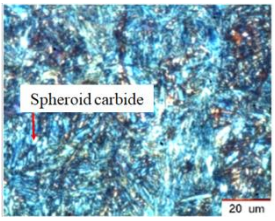
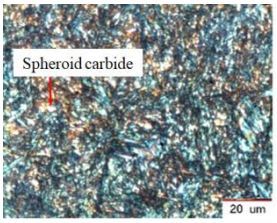
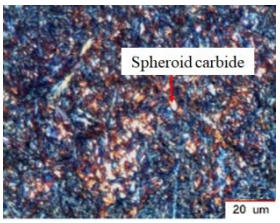
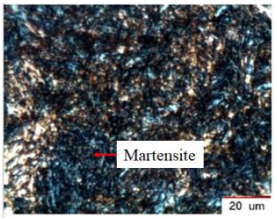
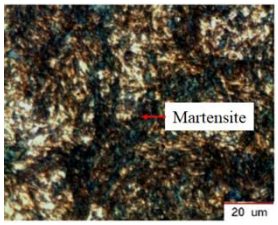
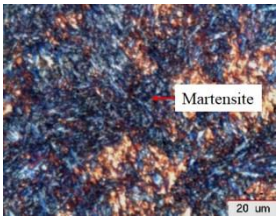
สุดท้ายที่ระยะลึก 1.0 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่ลึกมากขึ้นทำให้ปริมาณธาตุคาร์บอนแพร่เข้า

มาได้น้อยกว่า จะพบโปรยูเทกตอยด์เฟอร์ไรต์ที่มีขนาดใหญ่กว่าที่พบในระยะลึก 0.8 มิลลิเมตร

ระยะลึกจากขอบชิ้นทดสอบ (มม.)	เวลาอบแช่ 0 นาที	เวลาอบแช่ 5 นาที	เวลาอบแช่ 10 นาที
0.2			
0.8			
1.0			

ภาพที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงแล้วทำการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิก ที่เวลาอบแช่ 0, 5 และ 10 นาที จำนวน 5 รอบ

ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกแล้ว ถูกนำมาทำการชุบแข็งและการเทมเปอร์ เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่า ที่ระยะลึกจากขอบของชิ้นทดสอบเข้ามา 0.2 มิลลิเมตร จะปรากฏคาร์ไบด์ก้อนกลมอย่างชัดเจนกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์มาร์เทนไซต์ โดยคาร์ไบด์ที่เป็นเม็ดขนาดใหญ่เกิดจากโปรยูเทกตอยด์ซีเมนไทต์ (Pro-eutectiod cementite) หรือซีเมนไทต์แบบตาข่าย (Network cementite) สำหรับคาร์ไบด์ก้อนกลมขนาดเล็กเกิดจากยูเทกตอยด์ซีเมนไทต์ (Eutectiod cementite) สำหรับที่ระยะลึก 0.8 มิลลิเมตร จะมีคาร์ไบด์ก้อนกลมเม็ดเล็กๆ กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์มาร์เทนไซต์ ในขณะที่ระยะลึก 1.0 มิลลิเมตร เป็นเมทริกซ์มาร์เทนไซต์

ระยะลึกจากขอบชิ้นทดสอบ (มม.)	เวลาอบแช่ 0 นาที	เวลาอบแช่ 5 นาที	เวลาอบแช่ 10 นาที
0.2			
0.8			
1.0			

ภาพที่ 7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงแล้วทำการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิก ที่เวลาอบแช่ 0, 5 และ 10 นาที จำนวน 5 รอบ และผ่านการชุบแข็งและการเทมเปอร์

จะเห็นได้ว่ากระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกสามารถเปลี่ยนโครงสร้างของคาร์ไบด์แบบตาข่ายเป็นโครงสร้างแบบก้อนกลมอยู่ในเมทริกซ์เพอร์ไลต์ (ก่อนการชุบแข็ง) ซึ่งเกิดจากการให้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตหรือเส้น A_1 แต่ไม่เกินเส้น A_{cm} เพื่อไม่ให้ซีเมนไทต์หรือคาร์ไบด์สลายตัวไปเป็นออสเทนไนต์ และสลับกับการให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเส้น A_1 เพียงเล็กน้อย ทำให้คาร์ไบด์แบบตาข่ายเกิดความไม่เสถียรขึ้น เพื่อรักษาเสถียรภาพดังกล่าวไว้ คาร์ไบด์จึงพยายามลดพื้นที่ผิวให้เหลือน้อยที่สุดเพื่อให้มีพลังงานต่ำสุด ซึ่งรูปทรงที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเมื่อมีปริมาตรเท่ากันคือรูปทรงกลม และเมื่อนำชิ้นงานไปทำการชุบแข็งและการเทมเปอร์ เมทริกซ์เพอร์ไลต์จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการชุบแข็ง

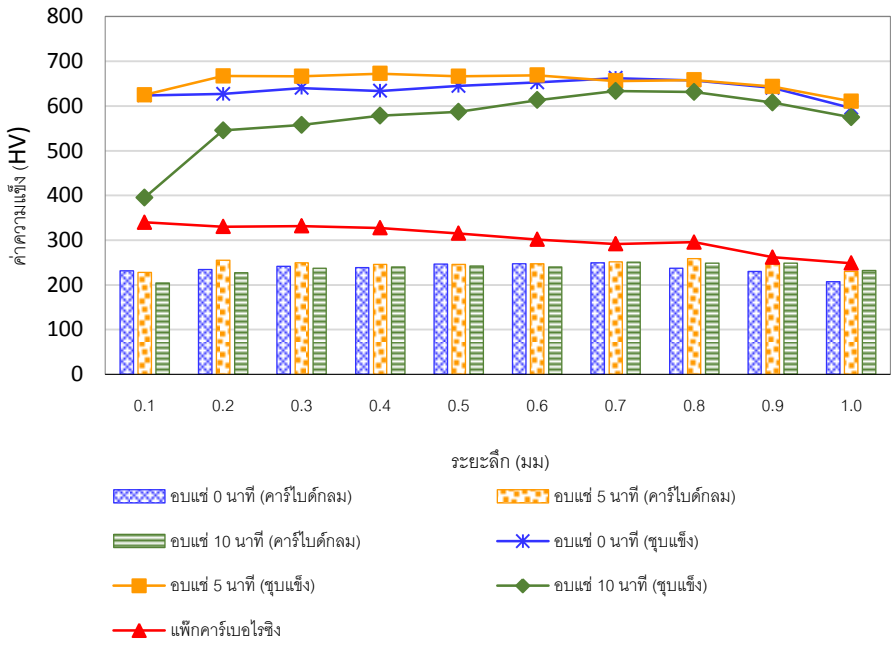
2. สมบัติทางกล

ผลการทดสอบสมบัติทางกล งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก และความต้านทานแรงดึง โดยภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นทดสอบ เนื่องด้วยกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรซิงเป็นการเพิ่มความแข็งที่ผิว ดังนั้น การทดสอบค่าความแข็งจึงเริ่มตั้งแต่ที่ผิวชิ้นทดสอบเข้าไปจนถึงระยะลึก 1.0 มิลลิเมตร จากกราฟการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรซิงมานั้น ค่าความแข็งที่ผิวนอกจะสูงกว่าที่ระยะความลึกเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะปริมาณธาตุคาร์บอนจากถ่านไม้ ได้แพร่เข้าไปในเนื้อเหล็กทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ผิวเหล็กเพิ่มขึ้น โดยจากโครงสร้างจุลภาคที่ผิวนอกจะพบโครงสร้างโปรยูเทกตอยด์ซีเมนไทต์หรือคาร์ไบด์แบบตาข่าย

จึงทำให้ความแข็งที่ผิวนอกมีค่าสูง ในขณะที่เมื่อความลึกเพิ่มขึ้นปริมาณธาตุคาร์บอนแพร่เข้าไปได้น้อย จึงพบโครงสร้างโปรยูเทกตอยด์เฟอร์ไรต์ส่งผลให้ที่ระยะลึกที่เพิ่มขึ้นค่าความแข็งจึงลดลง

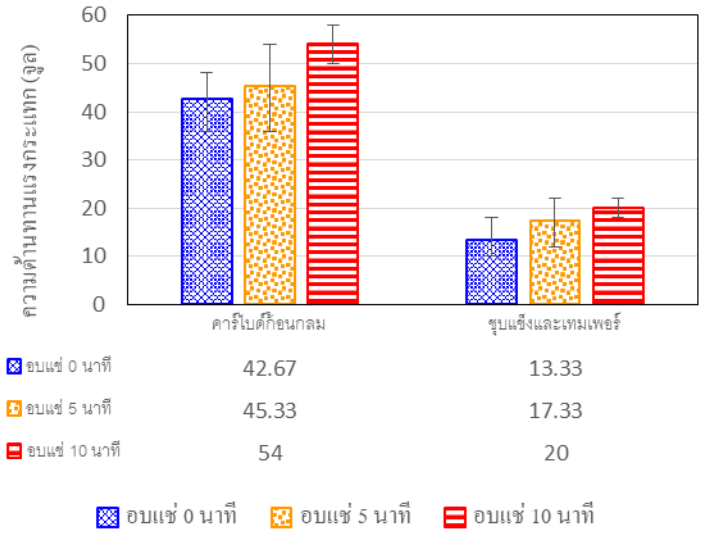
ภายหลังจากการอบชุบความร้อนแบบไซคลิกทุกๆ ระยะลึก ค่าความแข็งจะต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการทำแพ็คคาร์เบอไรซิง เนื่องจากโปรยูเทกตอยด์ซีเมนไทต์ที่มีรูปร่างเป็นตาข่ายล้อมรอบเพอร์ไลต์และยูเทกตอยด์ซีเมนไทต์ที่มีรูปร่างเป็นแผ่นสลับกับเฟอร์ไรต์หรือลาเมลลาเพอร์ไลต์ (Lamella pearlite) (ณรงค์ศักดิ์, 2556) ได้เปลี่ยนไปเป็นก้อนกลม เมื่อถูกแรงกระทำคาร์ไบด์ก้อนกลมจะกระจายแรงได้ดีกว่ารูปทรงแบบแผ่น จึงทำให้ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบความร้อนแบบไซคลิกเพื่อเปลี่ยนให้คาร์ไบด์ก้อนกลมมีค่าความแข็งน้อยกว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงมาแล้วมีคาร์ไบด์แบบตาข่าย

สำหรับค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบความร้อนแบบไซคลิกเวลาอบแช่ 0, 5 และ 10 นาทีนั้น มีค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อผ่านการชุบแข็งแล้วจะเห็นได้ว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบแช่ 10 นาที มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าเวลาอบแช่ที่ 0 และ 5 นาที ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าเป็นผลมาจากการอบแช่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติด้วยเวลาที่นานกว่า ทำให้การฟอร์มตัวของคาร์ไบด์ก้อนกลมมีเวลาที่มากกว่า จึงสามารถเกิดคาร์ไบด์ที่มีก้อนกลมได้มากกว่า เมื่อถูกแรงกระทำจึงกระจายแรงได้ดีกว่า ทำให้มีแรงต้านต่อแรงกดจากการวัดความแข็งน้อย ค่าความแข็งที่ได้จึงต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ข้อสันนิษฐานดังกล่าวต้องทำการศึกษาความกลมของคาร์ไบด์ที่สัมพันธ์กับเวลาการอบแช่ต่อไป

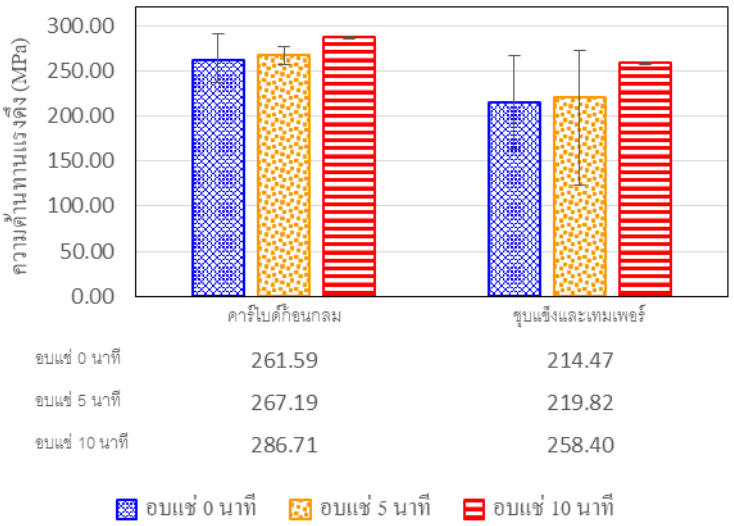


ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบความแข็งของแต่ละขั้นตอนของกระบวนการอบชุบความร้อน

ผลของการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก ชิ้นทดสอบที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงมีค่าความต้านทานแรงกระแทก 3 จูล แล้วทำการเปรียบเทียบชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบด้วยกระบวนการต่างๆ แสดงในภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงมีค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ต่ำ สาเหตุเนื่องมาจากโครงสร้างของคาร์ไบด์แบบตาข่ายที่มีความแข็งแต่เปราะ ทำให้มีความต้านทานแรงกระแทกน้อย เมื่อทำการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกแล้วพบว่า ค่าความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบสูงขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากคาร์ไบด์แบบตาข่ายและลาเมลาคาร์ไบด์เปลี่ยนไปเป็นคาร์ไบด์ก้อนกลมส่งผลให้เหล็กมีความเหนียวเพิ่มขึ้นจึงมีความต้านทานแรงกระแทกได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อชิ้นทดสอบผ่านการชุบแข็งและการเทมเปอร์จะทำให้ความต้านทานแรงกระแทกนั้นลดลง เนื่องจากภายหลังการชุบแข็งโครงสร้างที่ได้คือมาร์เทนไซต์ซึ่งมีความแข็งสูงแต่มีความเหนียวต่ำ ความต้านทานแรงกระแทกจึงลดลงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาเวลาการอบแช่ในขั้นตอนการอบชุบความร้อนแบบไซคลิก จะเห็นได้ว่า ที่เวลาการอบแช่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าเป็นผลมาจากการอบแช่ด้วยเวลาที่นานขึ้น ทำให้คาร์ไบด์มีความกลมมากขึ้นทำให้ความแข็งลดลง เหล็กจึงมีความเหนียวมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

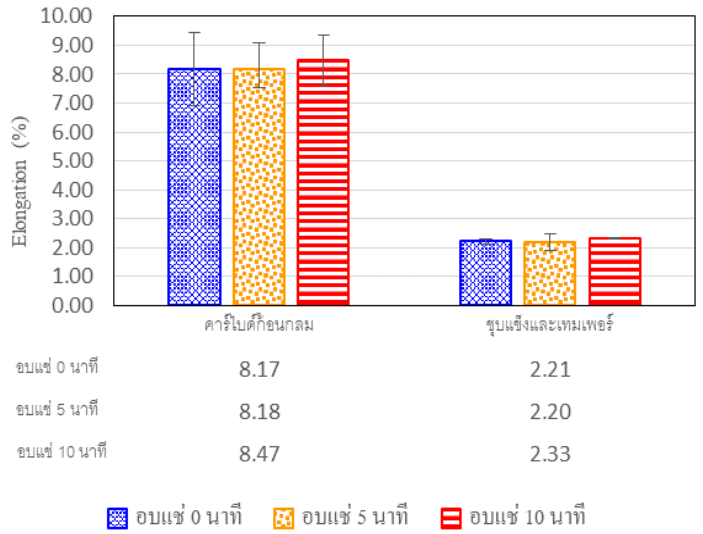


ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบความต้านทานแรงกระแทกของแต่ละขั้นตอนของกระบวนการอบชุบความร้อน



ภาพที่ 10 การเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงของแต่ละขั้นตอนของกระบวนการอบชุบความร้อน

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง ชิ้นทดสอบที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงมีค่าความต้านทานแรงดึง 188.83 MPa แล้วทำการเปรียบเทียบชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบด้วยกระบวนการต่างๆ แสดงดังภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่า ชิ้นทดสอบเมื่อทำการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกก่อนการชุบแข็งจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น เนื่องจากคาร์ไบด์แบบตาข่ายได้เปลี่ยนไปเป็นคาร์ไบด์ก้อนกลม ทำให้เหล็กมีความเหนียวและความต้านทางแรงดึงสูงขึ้น โดยชิ้นงานที่ใช้เวลาในการอบแช่ 10 นาที ซึ่งปรากฏการเกิดคาร์ไบด์ก้อนกลมมากที่สุดจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lv *et al*. (2013) และงานวิจัยของ Atanu *et al*. (2010)



ภาพที่ 11 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแต่ละขั้นตอนของกระบวนการอบชุบความร้อน

ผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%elongation) ชิ้นทดสอบที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 2.28 ภาพที่ 11 แสดงผลของเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบด้วยกระบวนการต่างๆ ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบแรงกระแทก กล่าวคือ หลังจากผ่านกระบวนการอบชุบเพื่อให้ได้คาร์ไบด์ก้อนกลม ชิ้นงานจะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูง และจะลดลงเมื่อนำไปทำการชุบแข็งและเทมเปอร์ โดยเวลาที่ใช้ในการอบแช่ที่นานขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ภายหลังการชุบแข็งและการเทมเปอร์ความต้านทานแรงดึงจะลดลง เพราะโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่เกิดขึ้นภายหลังการชุบแข็งจะทำให้เหล็กมีความแข็งที่เพิ่มขึ้นแต่ความเหนียวจะลดลง

สรุป

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการทดสอบสมบัติทางกล จะเห็นได้ว่า ทั้งโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลให้ผลที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่อชิ้นทดสอบผ่านการเพิ่มธาตุคาร์บอนด้วยกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรซิง ปริมาณธาตุคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดโครงสร้างคาร์ไบด์แบบตาข่าย ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีค่าความแข็งสูงและมีความต้านทานแรงกระแทกที่ต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิก เนื่องจากคาร์ไบด์แบบตาข่ายถูกเปลี่ยนสภาพไปเป็นคาร์ไบด์ก้อนกลม เมื่อนำชิ้นทดสอบไปทำการชุบแข็งและการเทมเปอร์ ทำให้เมทริกซ์ที่เป็นเพอร์ไลต์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ ในขณะที่คาร์ไบด์ก้อนกลมยังคงสภาพอยู่จึงทำให้ชิ้นทดสอบมีความแข็งสูงขึ้นแต่ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลง เมื่อเปรียบเทียบผลของชิ้นทดสอบที่ผ่านการแพ็คคาร์เบอไรซิงกับชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกที่ตามด้วยการชุบแข็งและการเทมเปอร์ จะเห็นว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของเหล็กให้ดีขึ้นได้ กล่าวคือ เหล็กจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และสามารถต้านทานแรงกระแทกและความเหนียว (เปอร์เซ็นต์การยืดตัว) ให้ผลที่ดีขึ้นอีกด้วย ในขณะที่ความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเช่นกัน

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า กระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์ไบด์แบบตาข่ายให้เป็นคาร์ไบด์ก้อนกลมกระจายตัวอยู่บนเมทริกซ์เพอร์ไลต์ โดยแนวโน้มของคาร์ไบด์ก้อนกลมจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาอบแช่มากขึ้น และเมื่อทำการชุบแข็งและการเทมเปอร์ เมทริกซ์เพอร์ไลต์จะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ในขณะที่คาร์ไบด์ก้อนกลมยังคงสภาพอยู่ กระบวนการอบชุบทางความร้อนแบบไซคลิกที่ตามด้วยการชุบแข็งและการเทมเปอร์ส่งผลให้สมบัติทางกลทั้งค่าความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก ความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ในการสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมวัสดุ ในความเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทดลอง และขอขอบคุณนายสิทธิศักดิ์ สุขสิน นายอาทิตย์ จันทะรัง และนายวุฒิไกร ประกอบกิ่ง ผู้เก็บข้อมูลในการทดลองงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. 2556. **โลหวิทยา.** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มนัส สถิรจินดา. 2537. **วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก.** พิมพ์ครั้งที่ 3. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพ.

วรรณา หอมจะบก, ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ และนฤดม ทาดี. 2558. ผลของอุณหภูมิออสเทนไนไทซิงในกระบวนการแพ็คคาร์เบอไรซิงเพื่อใช้ผลิตมีดโต้. **วารสาร มทร. อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** 8(3): 126-136.

Alok, M., Atanu, S. and Joydeep, M.J. 2016. Development of high strength ductile eutectoid steel through cyclic heat treatment involving incomplete austenitization followed by forced air cooling. **Journal of Materials Characterization** 114(1): 277-288.

ASTM. 2016. **ASTM A371-14.** Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. Available Source: http://infostore.saiglobal.com/store/details.aspx?ProductID=1748803, January 2, 2016.

Atanu, S., Dipak, K.M. and Joydeep, M.J. 2010. Effect of cyclic heat treatment on microstructure and mechanical properties of 0.6 wt% carbon steel. **Journal of Materials Science and Engineering** 527(1): 4001-4007.

Lv, Z.Q., Wang, B., Wang, Z.H., Sun, S.H. and Fu, W.T., J. 2013. Effect of cyclic heat treatment on spheroidizing behavior of cementile in high carbon steel. **Journal of Materials Science and Engineering** 574(1): 143-148.