

บทความวิชาการ: กระบวนการสเฟียรรอยไคซิงและการนำไปใช้กับ กระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง

วรรณ หอมจะบก^{1,2*} กนกอร น้อยเล็ก^{1,2} นัยนา โปะสูงเนิน¹ และ หทัยชนก หุ้มไธสง¹

¹สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

²สถาบันนวัตกรรมวัสดุและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

^{1,2}744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลบ้านเกาะ อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 21 มกราคม 2565 แก้ไขบทความ 21 พฤศจิกายน 2565 ตอรับบทความ 20 มกราคม 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อรวบรวมงานวิจัยที่มีเนื้อหา และปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการสเฟียรรอยไคซิง กระบวนการคาร์เบอร์ไรซิง และกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิงตามด้วยกระบวนการสเฟียรรอยไคซิง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ สำหรับในงานภาคอุตสาหกรรม และงานทางด้านวิชาการ จากผลการศึกษาพบว่ากระบวนการสเฟียรรอยไคซิงมีอยู่หลายรูปแบบ แต่รูปแบบที่นิยมใช้คือการให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย และเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย ทำสลับกันไปเรื่อย ๆ โดยจำนวนรอบของการให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พบซีเมนไทต์กลที่มีขนาดเล็กละเอียดมากขึ้น ค่าความแข็งแรงลดลง และส่งผลให้ค่าแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ค่าแรงดึงจุดคราก (yield strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%elongation) มีแนวโน้มสูงขึ้น ส่วนกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง มีปัจจัยที่สำคัญอยู่หลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นชนิดของถ่านไม้ โดยถ่านไม้ที่ช่วยเพิ่มคาร์บอนได้สูงสุด คือ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส รองลงมาคือ ถ่านไม้มะขาม ถ่านหังมันสำปะหลัง ถ่านกะลามะพร้าว และถ่านไม้ไผ่ ตามลำดับ ส่วนกรณีของการศึกษาสารเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยามากที่สุด รวมไปถึงสารเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มของแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติ รวมไปถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงจะช่วยให้คาร์บอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ดีขึ้น ทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น แต่ก็ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกลดลง นอกจากนี้ การทำสเฟียรรอยไคซิงยังถูกนำมาประยุกต์ใช้หลังจากกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิง โดยพบว่าซีเมนไทต์แบบตาข่ายโดยเฉพาะที่ผิวจะสลายตัวไปเป็นเม็ดกลม แต่เนื้อเหล็กยังคงความเหนียว และมีความยืดหยุ่นอยู่ ชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงจะมีค่าความแข็งแรงมากขึ้น และค่าความแข็งแรงจะลดลงเมื่อผ่านกระบวนการสเฟียรรอยไคซิง เมื่อพิจารณาตัวแปรของระยะเวลา พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทำสเฟียรรอยไคซิงที่นานขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง ส่วนผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : สเฟียรรอยไคซิง; คาร์เบอร์ไรซิง; ซีเมนไทต์แบบตาข่าย

Academic article: Spheroidizing Process and Applying to Pack Carburizing Process

Wanna Homjabok^{1,2*} Kanokon Nuilek^{1,2} Naiyana Posungnoen¹ and Hathaichanok Humthaisong¹

¹Department of Materials, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

²Materials and Manufacturing Innovation Institute, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

^{1,2}744 Suranarai Road, Nai Mueang, Mueang Nakhon Ratchasima, Nakhon Ratchasima 30000

Received 21 January 2022; Revised 21 November 2022; Accepted 20 January 2023

Abstract

The purpose of this article review was to compile contents and factors which affected the spheroidizing process, carburizing process, and carburizing process followed by the spheroidizing process for utilization in industrial, and academic matters. The findings of this study revealed that there were many methods for the spheroidizing process with the most used process being used with the cycle temperature at slightly lower and higher A_1 temperature. The number of sequences of increased temperature found lighter cementite which had higher ultimate tensile strength, yield strength, and percent elongation. The essential factors in the pack carburizing process were composed of types of charcoal, catalyst, temperature, and time. The best charcoals to extend carbon were from eucalyptus, tamarind, the rootstock of cassava, coconut shell, and bamboo respectively. The study showed that calcium carbonate (CaCO_3 , commercial-grade) was the best catalyst along with the catalyst in calcium carbonate from nature. The temperature and time in the process affected carbon diffused to sample well, increased hardness, and reduced the efficiency of impact. Moreover, spheroidizing was used after finishing carburizing process, discovering the cementite network where the surface changed to a sphere shape but with the properties of toughness and elasticity still high. After carburizing process, the sample had increased hardness but after the spheroidizing process the hardness decreased. Time studies showed that a longer period in the spheroidizing process, led to lower hardness and increased impact.

Keywords: Spheroidizing; Carburizing; Network Cementite

** Corresponding Author. Tel.: +668 7776 9920, E-mail Address: wanna.ho@rmuti.ac.th*

1. บทนำ

กระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อน มีความสำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก เพราะเป็นกระบวนการที่ทำให้เหล็กมีสมบัติตรงตามที่ต้องการจะนำไปใช้งาน กระบวนการอบอ่อนเพื่อความอ่อนตัวสูง (soft annealing) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง (spheroidizing) คือกระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะด้วยความร้อนประเภทหนึ่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออบอ่อนให้เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ในช่วง 0.7-1.2%C มีสมบัติทางด้านการตัด กลึง ไส เจาะ (machinability) ให้ดียิ่งขึ้น กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิงนี้จะถูกนำมาใช้กับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูง 0.7-1.2%C ซึ่งเหล็กที่มีคาร์บอนช่วงนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของเพิร์ลไลต์ (pearlite) และโปรยูเทคตอยด์คาร์ไบด์ (proeutectoid carbide) หรือโปรยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ (proeutectoid cementite) ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบตาข่าย (cementite network) ตามขอบเกรน ทำให้เมื่อนำไปทำการตัด กลึง หรือไส จะทำให้ได้ผิวที่ไม่เรียบ เพราะปลายมีดตัดจะตัดผ่านเนื้ออบริเวณอ่อนซึ่งคือเฟสเฟอร์ไรท์ (ferrite) สลับกับเนื้ออบริเวณที่แข็งคือซีเมนไทต์ (cementite) ในการแก้ปัญหาี้สามารถทำได้โดยทำให้โปรยูเทคตอยด์ซีเมนไทต์ขาดความต่อเนื่อง ไม่เป็นแบบตาข่าย โดยการใช้กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง

นอกจากการใช้กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิงให้แก่เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงในช่วงดังกล่าวแล้ว กระบวนการนี้ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ โดยหลังจากที่ทำการเติมคาร์บอนเข้าไปที่ผิวจนมีปริมาณสูงแล้วจึงนำมาให้ความร้อนอีกครั้งด้วยกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง เพื่อให้ที่ผิวมีความแข็งสูงขึ้นจากซีเมนไทต์เม็ดกลมที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิว และยังคงความเหนียวภายในเนื้อเหล็กไว้ได้จากปริมาณคาร์บอนที่ต่ำ ซึ่งกระบวนการเติมคาร์บอน

เข้าไปที่ผิวของเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำก็คือกระบวนการคาร์เบอร์ไรซิง (carburizing) นั่นเอง

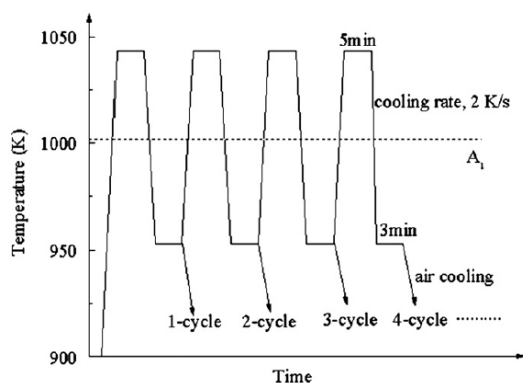
จากความสำคัญดังกล่าว จึงทำให้มีนักวิจัยหลาย ๆ กลุ่มที่ได้ทำการศึกษากระบวนการเหล่านี้อย่างกว้างขวาง ซึ่งบทความนี้ได้ทำการรวบรวมบทความที่สำคัญเหล่านั้น เพื่อนำไปใช้สำหรับงานภาคอุตสาหกรรมและงานทางด้านวิชาการ

2. กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง

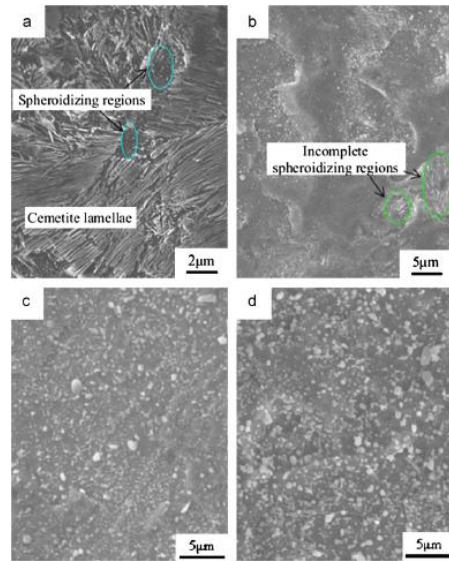
กระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง คือ กระบวนการการอบอ่อนเพื่อให้ได้ซีเมนไทต์กลม เป็นการปรับโครงสร้างจุลภาคให้เหมาะสมต่อการนำไปตัด กลึง ไส เจาะ โดยจะใช้กับเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนปานกลางและสูง รูปแบบของกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิงอาจทำได้หลายวิธี เช่น 1) ให้ความร้อนแก่เหล็กให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย (ไม่เกิน 50°C) โดยใช้เวลานานประมาณ 12-24 ชั่วโมง 2) ให้ความร้อนให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเตาลงมาที่อุณหภูมิต่ำกว่า A_1 เพียงเล็กน้อยแล้วคงไว้เป็นเวลานาน ๆ แล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และ 3) ทำการให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย และเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิ A_1 เล็กน้อย ทำสลับกันไปเรื่อย ๆ เป็นรอบ ๆ แล้วจึงปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ การที่ต้องใช้อุณหภูมิสลับระหว่างต่ำและสูงกว่าอุณหภูมิ A_1 ส่งผลให้ซีเมนไทต์แบบตาข่ายขาดออกจากกันจนมีลักษณะเป็นเม็ดกลม โดยในขณะที่เหล็กอยู่เหนือเส้น A_1 เล็กน้อย ซีเมนไทต์ที่อยู่ในเพิร์ลไลต์จะขาดเสถียรภาพและจะขาดออกเป็นช่วง ๆ และเมื่อลดอุณหภูมิลงต่ำกว่าเส้น A_1 เล็กน้อย ซีเมนไทต์ที่เกิดจากการแตกตัวของออสเทนไนต์จะไปรวมตัวกับซีเมนไทต์ที่เหลืออยู่ ทำให้ไม่เกิดเป็นแถบ (lamellar) และจะฟอร์มตัวเป็นซีเมนไทต์เม็ดกลมที่มีเสถียรภาพสูง ทำให้เหล็กอ่อนตัวและเหนียว เมื่อนำไปตัด กลึง หรือไส มีดตัดจะ

ซีเมนต์ไธต์เม็ดกลม โดยซีเมนต์ไธต์อาจจะโดนเปิดและเบนหลบเข้าไปในเนื้อพื้น หรืออาจจะหลุดออกไป

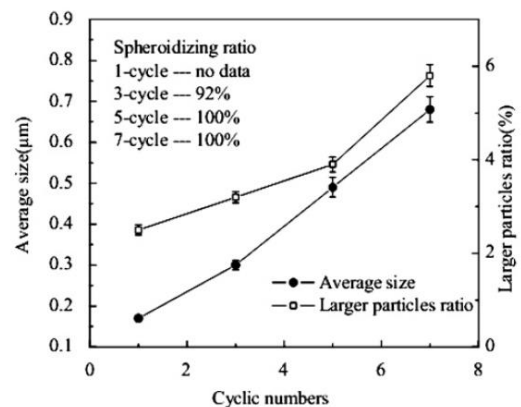
งานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาหมักจะทำการศึกษากจากจำนวนรอบ (n) ที่ใช้ในการให้ความร้อนสลับขึ้นลงระหว่างเส้น A_1 ดังแสดงตัวอย่างกระบวนการรอบซูปในรูปที่ 1 [1] และรูปที่ 2 [1] ได้แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก Fe-0.8C ที่ผ่านกระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงที่จำนวนรอบ 1, 3, 5 และ 7 รอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการให้ความร้อน 1 รอบ จะยังพบแถบซีเมนต์ไธต์อยู่จำนวนมาก และเมื่อทำการเพิ่มรอบให้สูงขึ้นแถบซีเมนต์ไธต์ก็จะมีปริมาณลดลงเรื่อย ๆ โดยที่จำนวนรอบ 7 รอบจะพบซีเมนต์ไธต์กลมจำนวนมาก โดยรูปที่ 3 ได้แสดงขนาดและปริมาณสัดส่วนของการฟอร์มตัวเป็นซีเมนต์ไธต์กลม [1] โดยพบว่าที่จำนวนรอบ 1 รอบ จะเริ่มพบซีเมนต์ไธต์กลม และจะเกิดเป็นจำนวนมากที่จำนวนรอบ 3 รอบแต่ก็ยังพบโครงสร้างเฟิร์ลโลทหลงเหลืออยู่บางส่วน เมื่อเพิ่มจำนวนรอบเป็น 5 และ 7 รอบ ซีเมนต์ไธต์จะเปลี่ยนเป็นซีเมนต์ไธต์กลมทั้งหมด และไม่พบโครงสร้างเฟิร์ลโลทหลงเหลืออยู่ โดยจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซีเมนต์ไธต์กลมมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังมีกลุ่มวิจัยของ F. Jarrahi และคณะ [2] ที่ศึกษาขนาดและปริมาณของซีเมนต์ไธต์กลมดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับกลุ่มวิจัยของ Z.Q. Lv [1]



รูปที่ 1 ตัวอย่างการรอบซูปด้วยกระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงโดยใช้ความร้อนสลับขึ้นลงระหว่างเส้น A_1



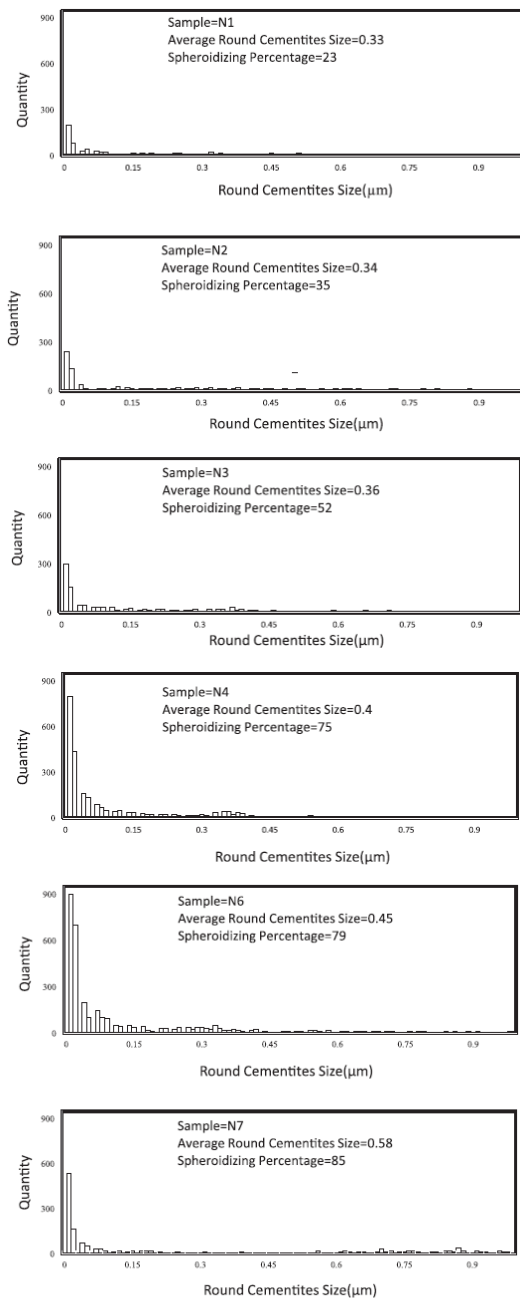
รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของ Fe-0.8C ที่ผ่านกระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงที่จำนวนรอบ a) 1 รอบ b) 3 รอบ c) 5 รอบ และ d) 7 รอบ



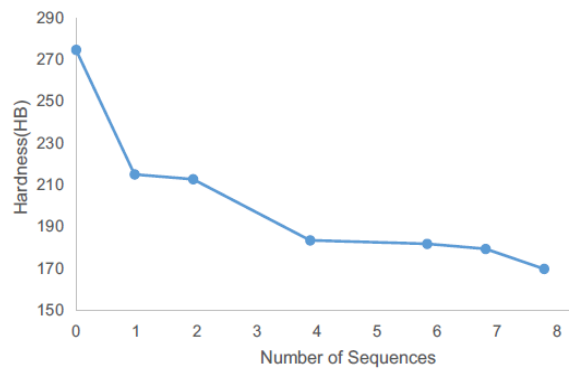
รูปที่ 3 ขนาดและปริมาณสัดส่วนของการฟอร์มตัวเป็นซีเมนต์ไธต์กลมที่ผ่านกระบวนการสเฟียร์รอยโดซิง

สมบัติทางกลก็เป็นสิ่งสำคัญที่ทำการศึกษาควคู่ไปกับการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ การทดสอบค่าความแข็ง และการทดสอบแรงดึง ซึ่งพบว่าจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง (รูปที่ 5) [2] นอกจากนี้ยังพบว่าที่จำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นพอจะทำให้เห็นแนวโน้มได้ว่าส่งผลให้ค่าแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) ค่าแรงดึงจุดคราก (yield strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%elongation)

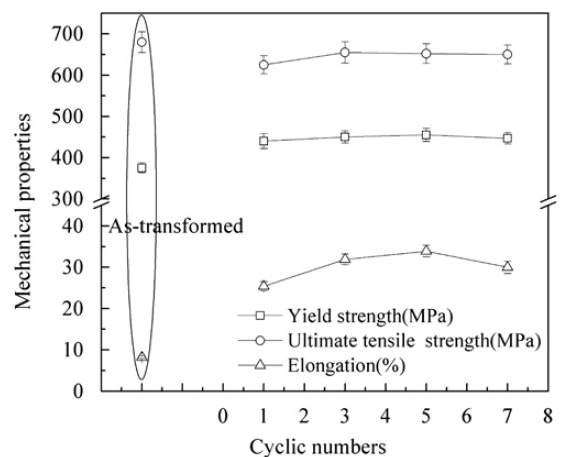
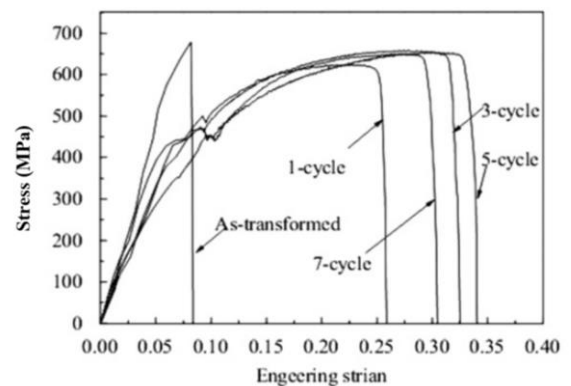
มีแนวโน้มสูงขึ้น และจะสังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จำนวนรอบ 7 รอบจะมีค่าลดลง (รูปที่ 6) [1] แต่แนวโน้มดังกล่าวก็ไม่ได้แตกต่างอย่างชัดเจนนัก



รูปที่ 4 ขนาดและปริมาณสัดส่วนของการฟอร์มตัวเป็นซีเมนต์ไธต์กลของเหล็ก AISI 1060 ที่ผ่านกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง



รูปที่ 5 ค่าความแข็งของเหล็ก AISI 1060 ที่ผ่านกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง



รูปที่ 6 ค่าการทดสอบแรงดึงของเหล็ก Fe-0.8C ที่ผ่านกระบวนการสเฟียร์รอยไดซิง

3. กระบวนการคาร์โบไรซิง

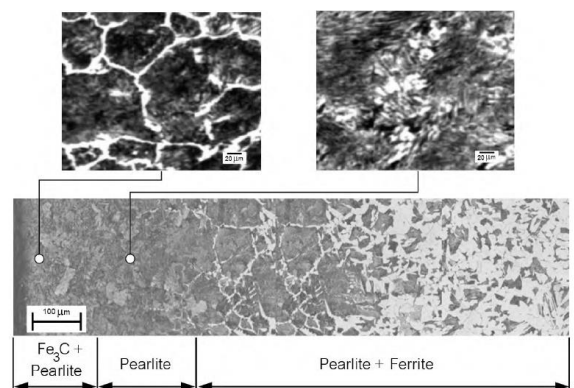
กระบวนการสเฟียไรไรซิง นอกจากจะใช้กับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงแล้ว ก็ยังถูกนำมาใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ต้องการชุบแข็งที่ผิว ซึ่งจะต้องทำการเพิ่มคาร์บอนไปที่ผิวของชิ้นงานด้วยกระบวนการคาร์โบไรซิง จากนั้นจึงทำสเฟียไรไรซิงเพื่อให้ได้ซีเมนต์ไต์เม็ดกลมที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิว ก่อนนำไปชุบแข็งและอบคืนตัว ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ เหล็กก็จะมี ความแข็งที่ผิวสูงขึ้นจากซีเมนต์ไต์เม็ดกลมที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิว และยังคงความเหนียวภายในเนื้อเหล็กไว้ได้จากปริมาณคาร์บอนที่ต่ำ

กระบวนการคาร์โบไรซิงสามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทตามสภาพชนิดของแหล่งคาร์บอน ได้แก่ สารเพิ่มคาร์บอนสภาพของแข็ง (solid carburizing) สารเพิ่มคาร์บอนสภาพของเหลว (liquid carburizing) และสารเพิ่มคาร์บอนสภาพก๊าซ (gas carburizing)

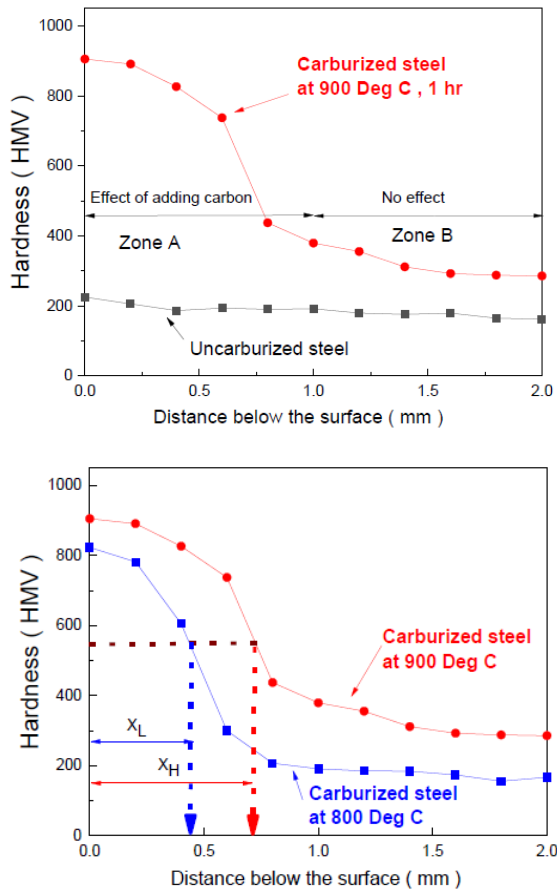
โดยวิธีการเพิ่มคาร์บอนโดยสารเพิ่มคาร์บอนสภาพของแข็ง อาจเรียกว่ากระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง (pack carburizing) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้เนื่องจาก ราคาประหยัด ใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนที่ปกติแล้วมีคาร์บอนไม่เกิน 0.2% หลักการของวิธีการนี้คือ การนำเหล็กไปไว้ในที่มีปริมาณคาร์บอนสูง และให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต โดยทั่วไปใช้อุณหภูมิประมาณ 925°C ที่อุณหภูมินี้คาร์บอนจะถูกดูดซึมเข้าไปในเนื้อเหล็กโดยการแพร่ ทำให้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสำหรับการชุบแข็งให้เกิดโครงสร้างมาเทนไซต์ ส่วนแกนกลางยังคงมีปริมาณคาร์บอนน้อยจึงยังคงสมบัติอ่อน และเหนียว [3] การทำแพ็กคาร์โบไรซิงสามารถสร้างเฟสที่แข็งในระดับโครงสร้างจุลภาคได้ ซึ่งทำให้ชิ้นงานเหล็กกล้ามีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยโครงสร้างจุลภาคที่เหมาะสมที่เกิดขึ้นงานมีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน [4] ดังนั้นในบทความนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิงเท่านั้น

กระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิงเป็นวิธีการเพิ่มคาร์บอนไปที่ผิวของเหล็กโดยอาศัยการแพร่ของคาร์บอนจากสารแพ็กคาร์โบไรซิงที่ประกอบไปด้วยถ่านผสมกับสารเร่งปฏิกิริยา [5] จึงมีนักวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาค้นคว้าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการแพ็กคาร์โบไรซิง เช่น 1) ประสิทธิภาพของสารเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด [6]-[8] ซึ่งมีสารเร่งปฏิกิริยาทางเคมีจะเป็นกลุ่มคาร์บอนเนต 2) ประสิทธิภาพของถ่านไม้ [11] 3) สัดส่วนขององค์ประกอบสารแพ็กคาร์โบไรซิง [7] 4) สภาพที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง ซึ่งอาจเป็นอุณหภูมิ [9], [10] หรือเวลา [9]-[11] ในการเพิ่มคาร์บอน

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง จากรูปที่ 7 [11] จะเห็นว่าที่ผิวจะพบโครงสร้างซีเมนต์ไต์แบบตาข่ายและเฟิร์ลไลต์ เนื่องจากบริเวณนี้เป็นบริเวณที่คาร์บอนแพร่เข้ามาได้มากที่สุดจึงมีปริมาณคาร์บอนสูง ซึ่งอยู่ในกลุ่มไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ (hyper-eutectoid) บริเวณถัดไปคือบริเวณที่พบโครงสร้างเฟิร์ลไลต์ ซึ่งก็คือช่วงที่มีปริมาณคาร์บอน 0.8% C ซึ่งก็คือเหล็กยูเทกตอยด์ (eutectoid) ส่วนภายในของชิ้นงานจะพบเฟอร์ไรต์และเฟิร์ลไลต์ เป็นบริเวณที่มีคาร์บอนต่ำ ซึ่งอยู่ในกลุ่มไฮโปยูเทกตอยด์ (hypo-eutectoid)



รูปที่ 7 โครงสร้างเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์โบไรซิง



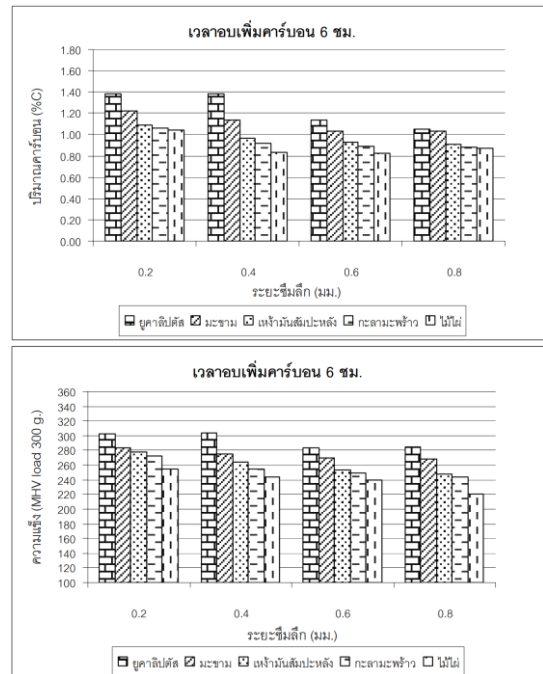
รูปที่ 8 ค่าความลึกผิวแข็งของเหล็กที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งจากรูปที่ 8 [12] ก็จะพบว่าที่ผิวซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการแพร่ของคาร์บอน (effect of adding carbon) จะมีค่าความแข็งสูง (zone A) นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิที่สูงจะทำให้ได้ค่าความลึกผิวแข็ง (case depth)

3.1 อิทธิพลของสารแพ็กคาร์เบอร์โรซิง

สารแพ็กคาร์เบอร์โรซิง ซึ่งประกอบไปด้วยถ่านและสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผ่านมามีผู้วิจัยที่ได้นำเอาถ่านและสารเร่งปฏิกิริยาหลายชนิดมาทำการศึกษา โดยชนิดถ่านที่พบคือ ถ่านไม้อยูคาลิปตัส [9]-[11], [13], [14] ถ่านกะลามะพร้าว [11] ถ่านไม้มะขาม [11] ถ่านไม้ยางพารา [15] ถ่านไม้ไผ่ [7], [11] ถ่านเห้งหม้นสำปะหลัง [11]

ถ่านไม้โกงกาง [8] โดยในกลุ่มวิจัยของ ณรงค์ศักดิ์ธรรมโชติ [11] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถ่านไม้หลายชนิดและพบว่าถ่านไม้ที่ให้ความสามารถในการเพิ่มคาร์บอนได้สูงสุด คือ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส รองลงมาคือ ถ่านไม้มะขาม ถ่านเห้งหม้น สำปะหลัง ถ่านกะลามะพร้าว และถ่านไม้ไผ่ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9

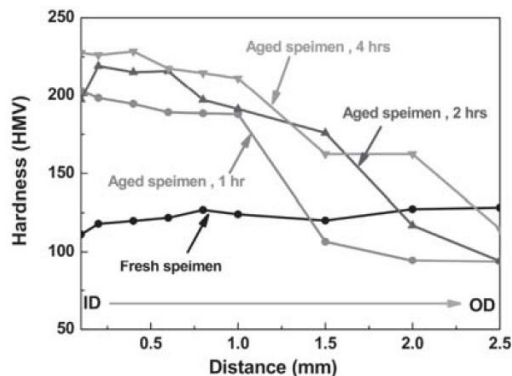


รูปที่ 9 ปริมาณคาร์บอนและค่าความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงด้วยถ่านไม้ชนิดต่าง ๆ

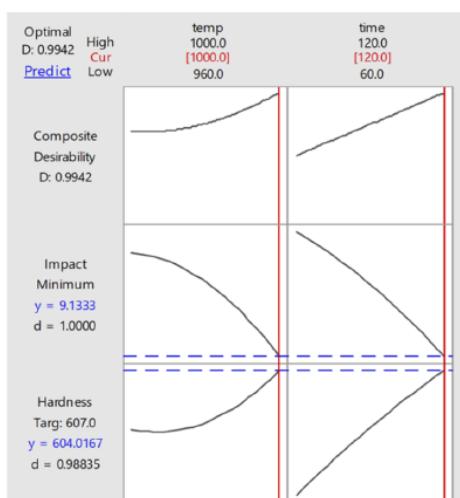
ส่วนกรณีของสารเร่งปฏิกิริยาก็มีนักวิจัยที่นำสารเร่งปฏิกิริยาหลากหลายมาใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) [6], [13], [14]-[16] แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) [7], [17] โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) [16], [18] รวมไปถึงงานวิจัยในธรรมชาติ เช่น หินปูน [11] เปลือกไข่ไก่ ถ่านยางพารา [15] และผงกระดูกวัว [9] เป็นต้น นอกจากนี้สัดส่วนของส่วนผสมระหว่างถ่านกับสารเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงก็ถูกนำศึกษาถึงสัดส่วนที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน [7]

3.2 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง

อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการแพร่ของคาร์บอนตามกฎของฟิกค์ (Fick's law) โดยกลุ่มที่ทำวิจัยเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการแพ็กคาร์เบอร์โรซิง (800-1,000°C) [10], [12], [15], [17] ต่างพบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้คาร์บอนสามารถแพร่เข้าไปที่ผิวได้ดีขึ้น ทำให้ได้ค่าความแข็งสูงขึ้น (รูปที่ 8) และในส่วนของการศึกษาเวลา [10], [11], [16], [18] ที่ใช้ในการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงก็ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับอุณหภูมิ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 10 [16]



รูปที่ 10 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ



รูปที่ 11 Optimization ของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงหลังจากชุบแข็งและอบคืนตัวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

จากผลข้างต้นจะเห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงจะช่วยให้คาร์บอนแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ดีขึ้น ทำให้ความแข็งสูงขึ้น แต่ก็ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกลดลง ด้วยเหตุนี้จึงมีกลุ่มผู้วิจัยที่ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาที่เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุด (optimum) เพื่อให้ได้มาซึ่งสภาวะที่ดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม Minitab 17 [9], [10] ดังแสดงตัวอย่างของผลการทดลองในรูปที่ 11 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิ 1,000°C เวลา 120 นาที โดยจะได้ค่าความแข็ง 604.0 HV และสามารถรับแรงกระแทกได้ 9.13 Jules

4. กระบวนการคาร์เบอร์โรซิงและตามด้วยกระบวนการสเฟียร์รอยโดซิง

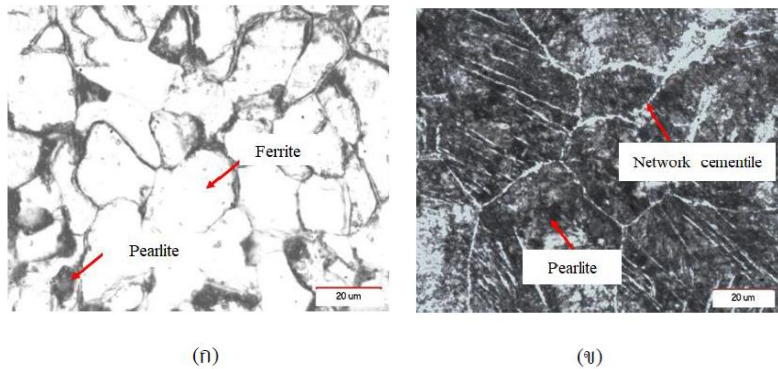
ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่ากระบวนการสเฟียร์รอยโดซิง นอกจากจะใช้กับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงแล้ว ก็ยังถูกนำมาใช้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ต้องการชุบแข็งที่ผิว เพื่อให้เหล็กมีความแข็งที่ผิวสูงขึ้นจากซีเมนต์ไต์เม็ดกลมที่กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิว และยังคงความเหนียวไว้ภายในเนื้อเหล็กได้

รูปที่ 12 [14] แสดงโครงสร้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำซึ่งจะประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลท์ และเมื่อทำการเพิ่มคาร์บอนด้วยกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงก็จะพบโปรยูต์ไต์คอตอยด์ซีเมนต์ไต์ที่มีลักษณะเป็นแบบตาข่ายและเพิร์ลไลท์ และเมื่อนำไปทำสเฟียร์รอยโดซิงก็จะพบว่าซีเมนต์ไต์แบบตาข่ายโดยเฉพาะที่ผิวจะสลายตัวไปเป็นเม็ดกลม ซึ่งเวลาที่ใช้ในการแช่อุณหภูมิไว้ในแต่ละรอบที่มากขึ้นก็จะยังพบซีเมนต์ไต์เม็ดกลมเพิ่มขึ้น อยู่บนเนื้อพื้น (matrix) ของเพิร์ลไลท์ ดังแสดงในรูปที่ 13 [14]

นอกจากนี้ ทางด้านสมบัติทางกลจะเห็นได้ว่าชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์โรซิงจะมีค่าความแข็งมากขึ้นและจะลดลงเมื่อผ่านกระบวนการ

สเฟียร์รอยไคซิง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการทำสเฟียร์รอยไคซิงที่นานขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง เพราะเวลาที่นานขึ้นจะทำให้ได้ซีเมนไทต์เม็ดกลมที่เล็กละเอียดมากขึ้น ส่วนผลการทดสอบความต้านทานแรง

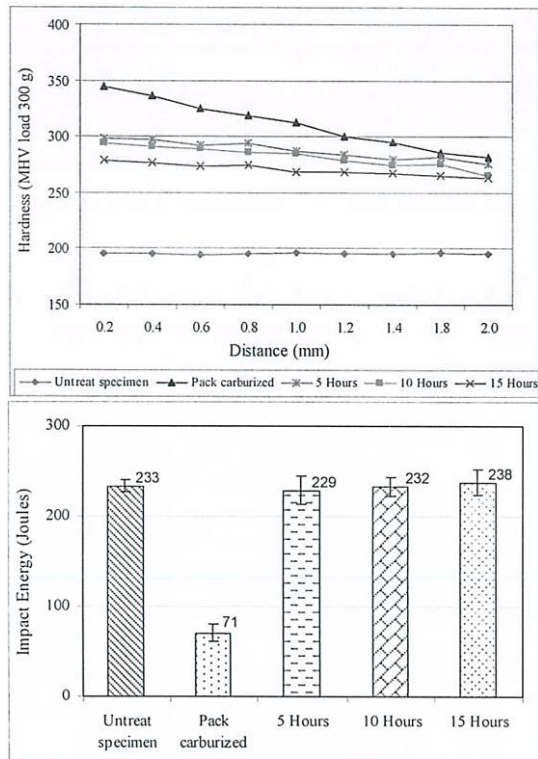
กระแทกจะให้ผลที่ตรงกันข้ามกับค่าความแข็ง ทั้งนี้ เพราะเหล็กที่แข็งจะรับแรงกระแทกได้ลดลงดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิง

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

รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงแล้วทำการสเฟียร์รอยไคซิงแบบไซคลิก 5 รอบ



รูปที่ 14 ค่าความแข็งและความต้านทานแรงกระแทกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ผ่านกระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงแล้วทำการสเฟียร์รอยโดซิง

การที่ผลของหัวข้อนี้ อาจจะเห็นว่ามีผลแตกต่างจากกลุ่มงานวิจัย [1]-[2] ในหัวข้อที่ 2 ซึ่งมีผลว่าจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น (ทำให้เวลารวมในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย) จะส่งผลให้ซีเมนต์ไทด็กกลมมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับกลุ่มงานวิจัย [14] ในรูปที่ 13 ทั้งนี้หากพิจารณาถึงลงไปโครงสร้างจุลภาคก็อาจจะพออธิบายได้ว่าการที่เวลาอบแช่ 0, 5 และ 10 นาที ที่จำนวน 5 รอบ ยังคงพบซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายให้เห็นอย่างชัดเจน ดังนั้นเวลาที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นเวลาที่ช่วยให้ซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายขาดและแยกออกจากกัน ทำให้พบว่าซีเมนต์ไทด็กมีขนาดเล็กลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนกลุ่มงานวิจัยในหัวข้อที่ 2 ซึ่งได้ศึกษาจำนวนรอบ จะเห็นได้ว่าที่จำนวนรอบ 3 รอบ (รูปที่ 2) ก็แทบจะไม่หลงเหลือ

ซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายแล้ว จำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ซีเมนต์ไทด็กมีลักษณะกลมมากขึ้นและอาจเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ โดยอาจสังเกตได้จากรูปที่ 3 ว่าจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นช่วงแรกส่งผลต่อขนาดการใหญ่ขึ้นของซีเมนต์ไทด็กไม่มาก แต่จะเห็นแนวโน้มการโตขึ้นอย่างรวดเร็วที่จำนวนรอบสูง ๆ

5. สรุป

การศึกษากระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงจากการรวบรวมบทความต่าง ๆ สามารถสรุปเป็นประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

กระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงจะช่วยให้ซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายสลายตัวไปเป็นซีเมนต์ไทด็กเม็ดกลม โดยผลของเวลาที่นานขึ้นหรือจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ซีเมนต์ไทด็กมีขนาดเล็กและละเอียดมากขึ้นบนเนื้อพื้นที่เป็นเฟิร์สโลท ทำให้ค่าความแข็งลดลง ความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ส่วนผลการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความต้านทานแรงดึง ณ จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น

การใช้กระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงไปประยุกต์ใช้หลังจากการทำแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงให้แก่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ พบว่า ซีเมนต์ไทด็กแบบตาข่ายที่เกิดขึ้นที่ผิวจะสลายตัวไปเป็นซีเมนต์ไทด็กเม็ดกลมซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าภายในเนื้อเหล็กที่ยังคงความเหนียวจากโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเฟิร์สโลท

การใช้กระบวนการสเฟียร์รอยโดซิงไปประยุกต์ใช้หลังจากการทำแพ็กคาร์เบอร์ไรซิงให้แก่เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่อาจจะต้องพิจารณาสมบัติทางด้านความแข็งแรงร่วมกับสมบัติทางกลอื่น ๆ เช่น ความต้านทานแรงกระแทก สามารถใช้โปรแกรม Minitab 17 มาช่วยในการหาสถานะที่เหมาะสมเพื่อให้คงความต้านทานแรงกระแทกได้ดีเมื่อความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Q. Lv, B. Wang, Z. H. Wang, S. H. Sun and W. T. Fu, "Effect of the cyclic heat treatments on spheroidizing behavior of the cementite in high carbon steel," *Materials Science & Engineering: A*, vol. 574, pp. 143-148, Jul. 2013.
- [2] F. Jarrahi, M. Kashefi and E. Ahmadzade-Beiraki, "An investigation into the applicability of Barkhausen noise technique in evaluation of machining properties of high carbon steel parts with different degrees of spheroidization," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 385, pp. 107-111, Jul. 2015.
- [3] N. Thammachot, *Metallurgy*, 3rd ed. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 2013.
- [4] T. Chowwanonthapunya and C. Peeratatsuwan, "Microstructure and hardness evolution of carburized mild steel," *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 31, no. 4, pp. 145-152, Oct-Dec. 2020.
- [5] M. Sathirajinda, *Iron & Steel Heat-Treatment Engineering*, 3rd ed. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House, 1994.
- [6] N. Thammachot, "The effect of energizer carburizing temperature and time on the mechanical properties of hardened big knives in a pack carburizing process," *KKU Engineering Journal*, pp. 172-177, Oct-Dec. 2016.
- [7] D. N. K. P. Negara, I. D. M. K. Muku, I. Sugita, I. Astika, I. W. Mustika and D. G. R. Prasetya, "Hardness distribution and effective case depth of low carbon steel after pack carburizing process under different carburizer," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 776, pp. 201-207, 2015.
- [8] P. Pitsuwan, P. Suwan, Y. Sengty and P. Kongsong, "Influence of catalyst on surface hardening of low carbon steel by method pack carburizing using mangrove charcoal powder," *Journal of Industrial Ubon Ratchathani Rajabhat University*, vol. 8, No. 2, pp. 1-12, Jul- Dec. 2018.
- [9] N. Thammachot, S. Noyming, S. Srisuk t, W. Homjabok, A. Mayai, and J. Banthao, "Optimization of carburizing temperature and time on mechanical properties of hardening the big knives in pack carburizing process by using cow bone as an energizer," *Journal Science Technology Mahasarakham University*, vol. 39, No. 3, pp.273-283, May-Jun. 2020.
- [10] S. Noyming, N. Thammachot, J. Nithikarnjanatham, R. Duekhunthod, S. Srinok, C. Peeratatsuwan and A. Mayai, "The analysis of factors effect to hardness by design of experiment of surface hardening of low carbon steel using egg shell as energizer in pack carburizing process," in *Engineering, Science, Technology and Architecture Conference*

- The 7th*, Dusit Princess Korat Hotel, Nakorn Ratchasima, 2016, pp. 353-359.
- [11] N. Thammachot, W. Homjabok and N. Thadee, "The efficiency of different of wood charcoal on increasing carbon content on surfaces of low carbon steel in the pack carburizing process," *KKU Engineering Journal*, vol. 41, No. 3, pp. 383-391, Jul-Sep. 2014.
- [12] T. Chowwanonthapunya, X. Mu and C. Peeratatsuwan, "Study on carburized steel used in maritime industry: the influences of carburizing temperature," *Maritime Technology and Research*, vol. 2, No. 1, pp. 33-39, Jan-Mar. 2020.
- [13] N. Thammachot, C. Wongnak, N. Thadee and T. Chaloemkitti, "The effect of spheroidized carbides by heating cycle on mechanical properties of surface carburized of low carbon steel knife shaped with pack carburizing process," in *Innovation and Technology Conference*, pp. 142-148, 2017.
- [14] N. Thammachot, H. Wanna, M. Amornsak and N. Sombut, "The effect of holding time in cyclic heat treatment process on network carbide structure of carburized carbon steel," *Journal of Rajamangala University of Technology Srivijaya*, vol. 12, No. 2, pp. 250-262, May-Aug. 2020.
- [15] P. Kongsong, N. Jansom and S. Faonongdu, "The comparison of energizer between the rubber wood ash and CaCO_3 in the pack carburizing process with rubber wood charcoal powder," *Journal of Rajamangala University of Technology Srivijaya*, vol. 11, No. 2, pp. 208-218, 2019.
- [16] T. Chowwanonthapunya, X. Mu and C. Peeratatsuwan, "The study on high temperature degradation of AISI 1020 low carbon steel in the carburization state," *Rajamangala University of Technology Phra Nakhon*, Vol. 10, No. 2, pp. 22-29, Sep. 2016.
- [17] A. Srivastava, H. Kumar, M. K. Yusufzai and M. Vashista, "Microstructure characterization of pack carburized IS-2062 low carbon steel using magnetic barkhausen noise," *Materials Today: Proceedings*, vol. 16, pp. 439-443, 2019.
- [18] S. Supriyono, "The effect of pack carburizing using charcoal on properties of mild steel," *Media Mesin: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 19, No. 1, pp. 38-42, Jan. 2018.