



ผลของเวลาในการอบอสเตนไต์ไทยชิงต่อการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุของเหล็กหล่อเหลี่ยมอสเทมเปอร์

Effects of Austenitizing Time on Three – Body Type Abrasion Wear Behavior of Austempered Ductile Iron

วัฒนพร ชนิyo และ อุษณีย์ กิตกัมาร

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: k_usanee@sut.ac.th, f_ny@windowslive.com

บทคัดย่อ

ในการอบชุนอสเทมเปอร์ริงเหล็กหล่อเหลี่ยมไทยชิง กระบวนการอบอสเตนไต์ไทยชิงด้วยเวลาต่างกันทำให้ปริมาณคาร์บอนในอสเตรนได้ต่ำลง แกรไฟฟ์กลมต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการชุนแข็งและการเปลี่ยนเฟสของอสเตรนดีไปเป็นอสเพอร์ไรต์รวมทั้งสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหลี่ยมอสเทมเปอร์ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของเวลาในการอบอสเตนไต์ไทยชิงที่มีต่อความด้านทานการสึกหรอแบบขัดสีและความแข็งของเหล็กหล่อเหลี่ยมอสเทมเปอร์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอสเตนไต์ไทยชิง การทดลองเริ่มจากการนำเหล็กหล่อเหลี่ยมไทยชิงอบอสเตนไต์ไทยชิงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที และชุบอสเทมเปอร์ริงในเกลือหลอมเหล็กที่ 280 และ 360 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 90 และ 120 นาที จากนั้นจึงตรวจสอบโครงสร้าง จุลภาค ทดสอบความแข็ง ทดสอบความด้านทานการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบขัดสีส้อนยางตามมาตรฐาน ASTM G65 (ชนิดสามวัตถุ) และตรวจสอบพื้นผิวภายหลังการขัดสี ผลการศึกษาพบว่าปริมาตรการสึกหรอของเหล็กหล่อเหลี่ยมอสเทมเปอร์ลดลงเมื่อใช้เวลาอบอสเตนไต์ไทยชิงนานขึ้นจาก 30 ไปเป็น 60 และ 90 นาที การอบอสเตนไต์ไทยชิงด้วยเวลาเพียง 30 นาที ถือว่าสั้นเกินไป เนื่องจากยังพบเฟอร์ไรต์ประเทก allotriomorph อยู่ในโครงสร้างพื้นที่ทำให้ความแข็งต่ำสุดและเกิดการสึกหรอมากที่สุด พื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบแสดงให้เห็นว่ากลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะของการเกิดรอยแตก รอยไถ และรอยเนื้อง โดยพบว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นมากจากรอยต่อระหว่างแกรไฟต์และเนื้อพื้น

คำสำคัญ: อสเตนไต์ไทยชิง ความด้านทานการสึกหรอแบบขัดสี เหล็กหล่อเหลี่ยมอสเทมเปอร์

ABSTRACT

In ductile iron austempering treatment, carbon concentration in austenite during austenitizing at a constant temperature is controlled by austenitizing time. The carbon concentration in austenite also plays role in hardenability, phase transformation into ausferrite and thus the mechanical properties of austempered ductile iron (ADI). In order to determine the proper austenitizing time, the effects of austenitizing time on abrasion wear resistance and hardness of austempered ductile iron (ADI) were studied. The heat treatment was carried out by austenitizing at 900 °C for 30, 60 and 90 minutes and then austempering at 280 °C and 360 °C for 60, 90, and 120 minutes, respectively. The microstructure

of austempered specimens were investigated. Brinell hardness of all samples was tested. Abrasion wear test was conducted according to ASTM G65 three – body type dry sand/rubber wheel abrasion testing. Worn surfaces were also observed. The results showed that volume losses of ADI decreased with increasing of austenitizing time from 30, 60 to 90 minutes. Austenitizing for 30 minutes was not enough to suppress the formation of allotriomorph ferrite. Therefore, the lowest hardness and the highest volume loss were found in specimens austenitized for 30 minutes. Moreover, worn surface revealed the wear mechanisms involving cracking, plowing and shearing. Cracks were found to initiate in the matrix at the graphite/matrix interface.

Keyword: Austenitizing, Abrasive Wear, Austempered Ductile Iron

1. บทนำ

เหล็กหล่อแกร์ไฟต์กลมสามารถนำมาผ่านการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยกรรมวิธีการอบชุบօสเทมเปอร์ริง แล้วเรียกว่าเหล็กหล่อเหนียวของอสเทมเปอร์ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าเหล็กหล่อเหนียวที่ผ่านการชุบแข็งและอบคินไฟ (Quenching & Tempering) ซึ่งให้ความต้านทานแรงดึงที่ 600-1,000 MPa ในขณะที่เหล็กหล่อเหนียวของอสเทมเปอร์ให้ความต้านทานแรงดึง 750-1,600 MPa สามารถทนต่อแรงกระแทก แรงบิดและการขัดสีได้สูง [1] จึงเหมาะสมกับการนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์และจักรกลการเกษตร เช่น เพื่องเกียร์ ตัวขับดินในรถไถและล้อเพื่อรถเกียร์ข้าว เป็นต้น การอบชุบօสเทมเปอร์ริงประกอบด้วยการอบอสเตรนไทชิงที่ 850-950°C เป็นเวลา 30-90 นาที และการชุบօสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิคงที่ในช่วง 260-400°C เป็นเวลา 60-120 นาที ขั้นตอนการอบอสเตรนไทชิงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อเหนียวจากเฟอร์ไรต์ผสมเพิร์ลิตให้กลายเป็นօสเตรนต์ทั้งหมดและเพิ่มปริมาณคาร์บอนในօสเตรนเพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง คาร์บอนจากแกร์ไฟต์จะแพร่เข้าไปในօสเตรนต์ระหว่างการอบอสเตรนไทชิงซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยเวลา ดังนั้นเวลาในการอบอสเตรนไทชิงจึงมีผลต่อปริมาณคาร์บอนในօสเตรนต์ ก่อนที่จะชุบลงมาที่อุณหภูมิօสเทมเปอร์ริง โครงสร้างพื้นเริ่มต้นเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อเวลาในการ

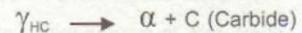
อบอสเตรนไทชิงที่เหมาะสม ถ้ามีเฟอร์ไรต์ในเนื้อพื้นเดิมมากก็ต้องใช้เวลาอบอสเตรนไทชิงนาน สำหรับการชุบօสเทมเปอร์ริงนั้น โครงสร้างจุลภาคเนื้อพื้นที่ต้องการคือ "օสเพอร์ไรต์ (ausferrite)" ซึ่งประกอบด้วยเฟอร์ไรต์รูปเข็มสลับกับօสเตรนต์เหลือค้างที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ระหว่างการชุบօสเทมเปอร์ริงเหล็กหล่อเหนียว ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้น 2 ขั้น ดังนี้

ขั้นที่ 1 օสเตรนต์เริ่มต้น (γ_c) เปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์รูปเข็มแหลม (α) กับօสเตรนที่มีคาร์บอนสูง (γ_{HC})



หากปริมาณคาร์บอนในօสเตรนต์ที่ได้จากปฏิกิริยาขั้นที่ 1 นั้นสูงพอ เมื่อปล่อยให้ชั้นงานเย็นด้วยคงเป็นօสเตรนต์เหลือค้าง แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนไม่สูงพอ เนื่องจากใช้เวลาอบอสเทมเปอร์ริงสั้นเกินไป เมื่อชั้นงานเย็นจะเกิดมาร์เกนไซต์อยู่ภายในօสเตรนต์

ขั้นที่ 2 օสเตรนต์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (γ_{HC}) เปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์



โดยปฏิกิริยาขั้นที่ 2 จะเกิดขึ้นในกรณีที่ชุบօสเทมเปอร์ริงนานเกินไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเหนียวและอุณหภูมิօสเทมเปอร์ริง

การขัดสีเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการที่วัสดุที่มีความแข็งสูงกว่าเคลื่อนที่ไปบนวัสดุที่มีความแข็งต่ำกว่าด้วยแรงเสียดทานจนเป็นผลให้เกิดการสึกหรอบนพื้นผิววัสดุ [2] โดยโครงสร้างของเฟอร์ไรต์ที่ประกอบด้วยเย็นเฟอร์ไรต์ลับกับอสเตนไธต์เหลือค้างคาร์บอนสูงช่วยให้เหล็กหล่อเนินเยาวอสเทมเปอร์ทนต่อการขัดสีได้ดีกว่าเหล็กหล่อเนินเยาว์หัวไป เนื่องจากความเครียดสะสมที่เกิดจากการขัดสีระหว่างการใช้งานทำให้ออสเตรนไธต์เหลือค้างคาร์บอนสูงเปลี่ยนเฟสไปเป็นมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งสูง (strain-induced martensite) ซึ่งมีความต้านทานการสึกหรอดีขึ้นระหว่างการใช้งาน [3] ปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเนินเยาวอสเทมเปอร์ก็คือปริมาณคาร์บอนในออสเตรนเร้มดัน (γ_c) ซึ่งได้จากการอบอสเตรนไธต์ [4] ถ้ามีค่าน้อยเกินไปก็อาจชุมนูญอสเมเปอร์วิ้งแล้วได้เฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ปนมาด้วย เนื่องจากความสามารถในการขูดแข็งต่า

ในด้านสมบัติความต้านทานการขัดสีของเหล็กหล่อเนินเยาวอสเทมเปอร์ Francucci และคณะ [5] ได้ศึกษาความต้านทานการขัดสีแบบล้อยางของเหล็กหล่อเนินเยาว์ที่ชุมนูญอสเทมเปอร์วิ้งแบบขั้นเดียวและสองขั้นโดยพบว่าเหล็กหล่อเนินเยาวอสเทมเปอร์ที่มีความแข็งสูงสามารถต้านทานต้านทานการเสียดสีภายใต้สภาวะความเค้นต่ำได้ดีกว่า แต่เมื่อไม่ไปทดสอบกับการใช้งานเล็บชุดเดินซึ่งใช้งานในสภาวะที่มีความเค้นสูงกลับพบว่าเหล็กหล่อเนินเยาวอสเทมเปอร์ที่มีความเหนียวมากจะสามารถทนต่อการขัดสีได้ดีกว่า

Sahin และคณะ [6] ศึกษาการสึกหรอของเหล็กหล่อเนินเยาว์ที่อบอสเตรนไธต์ในช่วงระหว่างอุณหภูมิวิกฤตซึ่งมีโครงสร้าง 2 เฟส ($\alpha+\gamma$) จากนั้นชุมนูญอสเทมเปอร์วิ้งที่ 365°C ด้วยระยะเวลาต่างๆ เพื่อให้ได้เหล็กหล่อเนินเยาว์ที่มีปริมาณอสไฟอร์ไรต์แตกต่างกัน และเทียบกับชิ้นงานที่ชุมนูญอสเทมเปอร์วิ้งแบบปกติ ผลงานวิจัยพบว่าชิ้นงานที่มีโครงสร้างพื้นเป็นเฟอร์ไรต์และอสไฟอร์ไรต์มีการสึกหรอมากกว่าชิ้นงานที่มีโครงสร้างพื้นเป็นอสไฟอร์ไรต์ทั้งหมดที่ได้

จากการชุมนูญอสเทมเปอร์วิ้งปกติและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอสไฟอร์ไรต์มากขึ้น

เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบอสเตรนไธต์ การศึกษานี้จึงให้ความสนใจไปที่ผลของเวลาในการอบอสเตรนไธต์ต่อความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี และความแข็งของเหล็กหล่อเนินเยาวอสเทมเปอร์ เนื่องจากเวลาอบอสเตรนไธต์ส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนในอสเตรนได้เริ่มดัน (γ_c) ซึ่งทำให้โครงสร้างพื้นและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเนินเยาว์หลังชุมนูญอสเทมเปอร์วิ้งแตกต่างกันได้

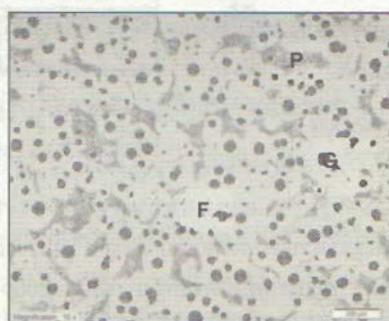
2. วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองแสดงเป็นผังดังในรูปที่ 1 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุที่ใช้

การทดลองนี้ใช้เหล็กหล่อเนินเยาว์ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 และมีโครงสร้างพื้นเป็นเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ดังรูปที่ 1 โดยหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานแท่ง Y-block ขนาด 1 นิ้ว [7] เหล็กหล่อที่ได้มีจำนวนแกรไฟต์กลมเฉลี่ย 102 เม็ดกลมต่อตารางมิลลิเมตร ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ

ส่วนผสมทางเคมี (wt%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg	
3.44	2.66	0.03	0.03	0.009	0.026	0.06	



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเนินเยาว์แกรไฟต์กลม (G-แกรไฟต์ P-เพิร์ลไลต์ F-เฟอร์ไรต์)

2.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ตัดชิ้นงานหล่อจากส่วนล่างของ Y-block เพื่อเตรียมชิ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบการขัดสี โดยตัดให้มีขนาดเริ่มต้น $25 \times 75 \times 14$ มม. เพื่อนำไปอบชุบ ออสเทเมเปอร์ริงก่อนที่จะกลึงไส้จนได้ขนาดสุดท้าย เป็น $25 \times 65 \times 12$ มม. ดังในรูปที่ 2 จากนั้นขัดผิวชิ้นงานมีความเรียบผิวประมาณ 0.8 ไมโครเมตร

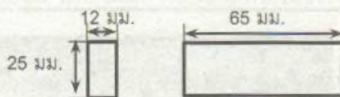
2.3 กรรมวิธีทางความร้อน

การอบชุบออสเทเมเปอร์ริงประกอบด้วยการอบอสเตนไทชิงที่ 900°C เป็นเวลา 30 60 และ 90 นาที จากนั้นทำให้เย็นด้วยการซับลงในอ่างเกลือ หลอมเหลวที่ 280°C และ 360°C แซทิ้งไว้ 60 90 และ 120 นาที แล้วขึ้นเย็นในอากาศดังแสดงด้วย แผนภาพในรูปที่ 3 กำหนดครั้งที่ 1 สำหรับชิ้นงานตาม คุณสมบัติอสเตรนไทชิง-คุณสมบัติอสเตนไทชิง (คุณสมบัติอสเทเมเปอร์ริง-เวลาอสเทเมเปอร์ริง) เช่น $900\text{-}30(280\text{-}60)$

2.4 การทดสอบ

2.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

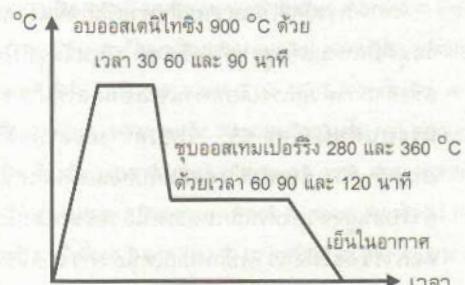
ภายหลังการอบชุบออสเทเมเปอร์ริงได้เตรียมผิวชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยเริ่มจากการขัดหยาบและขัดละเอียดตามลำดับ แล้วกัดกรดด้วยในตั้ง 2 % เป็นเวลา 5 วินาที ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสีหัวอนและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องร้าด



รูปที่ 2 ขนาดของชิ้นงานทดสอบการขัดสี

2.4.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งใช้วิธีการบริเนลส์ที่เครื่องทดสอบ Wilson รุ่น Dead Weight MJ ใช้แรงกดที่เกิดจากหุ้มน้ำหนัก 3,000 กิโลกรัม และถูกบล็อกกล้าชุบแข็งที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. ระยะเวลาในการกด 10 วินาที ทดสอบครั้ง 3 ครั้งต่อชิ้นงาน แล้วหาค่าเฉลี่ย



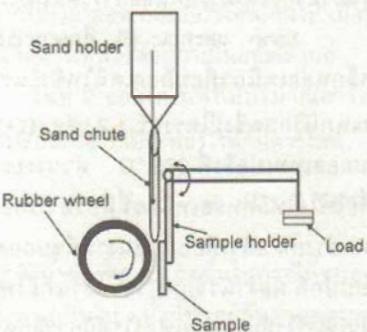
รูปที่ 3 แผนภาพกระบวนการอบอสเทเมเปอร์ริง

2.4.3 การทดสอบการขัดสีชนิดสามวัสดุ

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการขัดสีด้วยเครื่องทดสอบการขัดสีทรายแห้ง/ล้อยางชนิดสามวัสดุ (dry sand rubber wheel abrasion test) ดังรูปที่ 4 โดยใช้ทรายแก้วขนาด 50 mesh เป็นตัวขัดสีระหว่างชิ้นงานทดสอบกับล้อยางที่หมุนอยู่ ใช้แรงกดชิ้นงานขนาด 130 นิวตัน ล้อยางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 226.8 มม. หมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีในทิศทางเดียวกัน การไหลของทราย อัตราการไหลของทรายถูกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 300-400 กรัมต่อนาที จำนวนรอบในการทดสอบ 2,000 รอบต่อครั้ง ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีถูกแสดงเป็นบิริมาตรที่หายไปจากการทดสอบ ซึ่งคำนวนจากสมการ

$$\text{ปริมาตรการสึกหรอ} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานที่สูญเสียไป}}{\text{ความหนาแน่นของชิ้นงาน}}$$

การทดสอบทำขั้น 2 ตัวอย่าง แต่ละขั้นให้ผลการทดสอบแตกต่างกันน้อยกว่าร้อยละ 5 แล้วรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย



รูปที่ 4 เครื่องทดสอบการขัดสีล้อยางชนิดสามวัสดุ

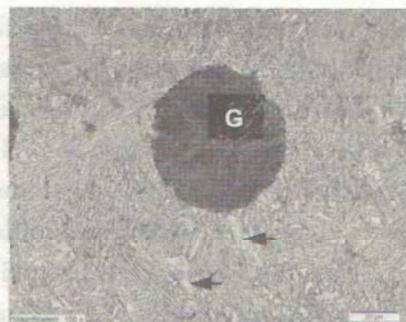
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 โครงสร้างจุลภาค

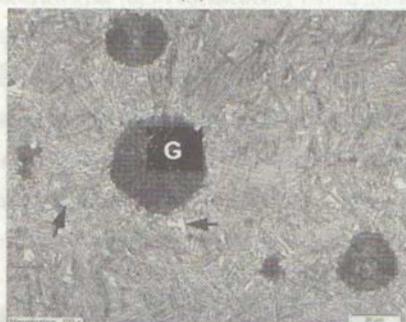
โครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังการซุบอสเทมเปอร์ริงประกอบด้วย แกรไฟฟ์กอล์ฟและโครงสร้างพื้นอสเพอร์ไร์ต ซึ่งในอสเพอร์ไร์ตประกอบไปด้วย เพอร์ไทร์รูปเข็มแหลมสลับอสเตรดในต์เหลือดังที่มีปริมาณcarbอนสูง ในชุดการทดลองที่อบอสเตนิไทชิงเหมือนกันแต่ใช้เวลาในการซุบอสเทมเปอร์ริงต่างกัน เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงสะท้อนพบว่ามีลักษณะคล้ายกัน เนื่องจากข้อจำกัดของเทคนิคที่ไม่สามารถแยกแยะ มาร์เกนไซต์ที่อยู่ในอสเตรดในต์เหลือดังได้ (resolution limit) แต่มีพิจารณาเบรียบเทียนชั้นงานที่ชุบอสเทมเปอร์ริงเหมือนกัน แต่อบอสเตนิไทชิงต่างกัน โครงสร้างจุลภาคของชั้นงานที่อบอสเตนิไทชิงเป็นเวลาสั้นๆ คือ 30 นาทีมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5(g) เมื่อจากยังมีกลุ่มก้อนสีขาวอยู่มาก ซึ่งเป็นอสเตรดในต์ที่ยังไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส (Untransformed Austenite) ผสมกับเพอร์ไร์ตประภาค allotriomorph ออสเตรดในต์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสบางส่วนนี้กลับเป็นมาร์เกนไซต์ เมื่อยังตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง ส่วนโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานที่อบอสเตนิไทชิงด้วยเวลา 60 และ 90 นาทีนั้น มีความสม่ำเสมอมากขึ้น ปริมาณกลุ่มก้อนสีขาวลดลง และเมื่อพิจารณาเบรียบเทียนชั้นงานที่อบอสเตนิไทชิงด้วยเวลาเท่าๆ กัน แต่อุณหภูมิการซุบอสเทมเปอร์ริงต่างกันคือ 280 และ 360 °C เพอร์ไร์ต รูปเข็มแหลมมีลักษณะหยาบขึ้นเมื่ออุณหภูมิอสเทมเปอร์ริงสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 ทั้งนี้เนื่องจากการซุบอสเทมเปอร์ริงที่อุณหภูมิสูงกว่าจะย่อมมีอันเดอร์คูลลิ่งน้อยกว่า จำนวนนิวเคลียสของเข็มเพอร์ไร์ตจึงน้อยทำให้ได้อสเพอร์ไร์ตหยาบ

3.2 ความแข็ง

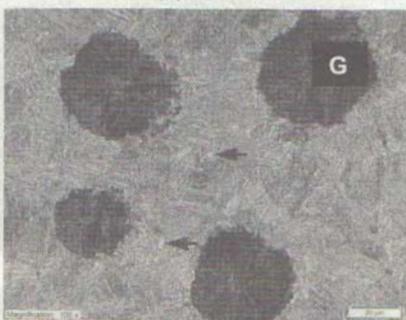
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งพบว่า เหล็กหล่อเนหี่ยวยที่ได้จากการซุบอสเทมเปอร์ริงที่ 280 °C เป็นเวลา 60 และ 90 นาทีนั้น การเปลี่ยนเฟส



(ก) 30 นาที



(ข) 60 นาที

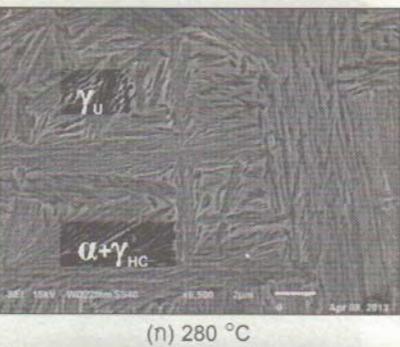


(ค) 90 นาที

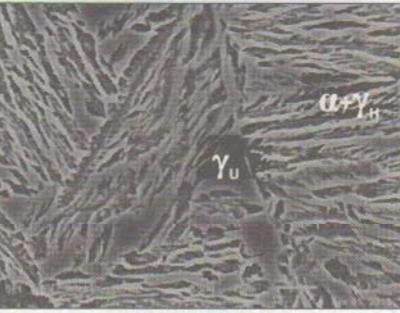
รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคเหล็กหล่อเนหี่ยวยอสเทมเปอร์ที่อบอสเตนิไทชิงด้วยเวลาต่างกันคือ 30 60 และ 90 นาที และชุบอสเทมเปอร์ริงที่ 360 °C ด้วยเวลา 60 นาที (ลูกศรชี้ด้าวอย่างของกลุ่มก้อนสีขาว)

จากอสเตรดในต์เริ่มต้นไปเป็นอสเพอร์ไร์ตยังไม่ถึงสุดดังสังเกตได้จากค่าความแข็งที่ลดลงเมื่อเวลาซุบอสเทมเปอร์ริงนานขึ้น ซึ่งขณะที่ชุบอสเทมเปอร์ริงนั้น ออสเตรดในต์จะเปลี่ยนไปเป็นอสเพอร์ไร์ต โดยในช่วงเริ่มต้นนิวเคลียสเพอร์ไร์ตจะเกิดรอบๆ แกรไฟฟ์กอล์ฟ

เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีคาร์บอนน้อยและมีชิลล์คอนสูงทำให้เกิดเฟอร์ไรต์ได้ง่าย โครงสร้างօอสเทนต์จะถูกดัดแปลงเป็นเฟลลิเอ่ยนเฟลส์เป็นอย่างมาก (เวลาชุบท่อสหหก) ทำให้ทั้งค่าความแข็งและความคงทนลดลง แต่เมื่อเวลาชุบท่อสหหกเพิ่มขึ้นเป็น 90 และ 120 นาที ปริมาณเฟลลิเอ่ยนเฟลส์ลดลง นอกจากนี้օอสเทนต์ที่อยู่ในชั้นนอกของชุบท่อสหหกจะถูกดัดแปลงเป็นมาร์เกนไชต์เมื่อยืนตัวลงมาที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากปริมาณคาร์บอนในชั้นนอกของชุบท่อสหหกที่ห้องได้ [8] เมื่อเพิ่มเวลาชุบท่อสหหกเปอร์ริงให้ตัวอย่างที่ห้องได้ ไม่เปลี่ยนไปเรื่อยๆ ในชั้นนอกของชุบท่อสหหกที่ห้องไม่เปลี่ยนไปเรื่อยๆ ในชั้นนอกของชุบท่อสหหกที่ห้องได้ ดังนั้นในโครงสร้างจุลภาคจึงมีปริมาณมาร์เกนไชต์ลดลง ค่าความแข็งจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

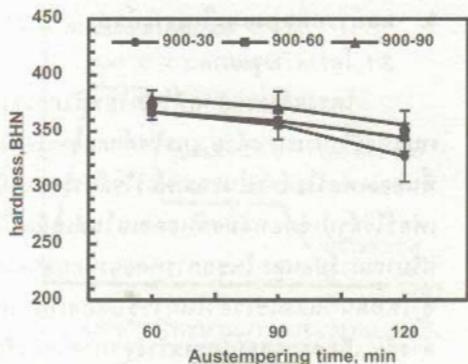


(n) 280 °C



(x) 360 °C

รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวชุบท่อสหหกเปอร์ริงที่ห้อง 60 นาที (ก) ชั้นนอกของชุบท่อสหหกที่ห้อง 30 นาที (ข) ชั้นนอกของชุบท่อสหหกที่ห้อง 30 นาที ไม่เกิดการเปลี่ยนเฟลส์ ส่วน $\alpha + \gamma_{hc}$ ก็อยู่ในชุบท่อสหหก



รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความแข็งเทียบกับเวลาการชุบ ออสเทนต์เปอร์ริงที่ 280 °C

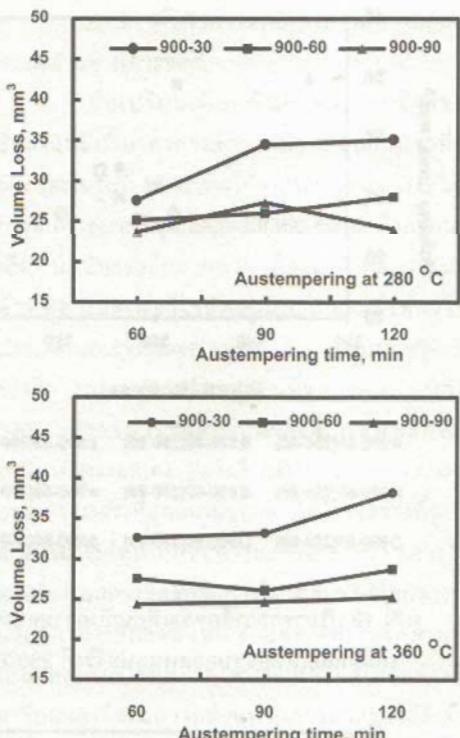
3.3 ความต้านทานการขัดสี

3.3.1 ปริมาตรการสึกหรอของเหล็กหล่อเหนียวชุบท่อสหหกเปอร์ริงที่ห้อง 60 นาที จากการอบออสเทนต์ให้ชิงด้วยเวลาต่างกัน

ผลการทดสอบการขัดสีของเหล็กหล่อเหนียวในชุดการทดลองที่ชุบท่อสหหกเปอร์ริงที่อุณหภูมิต่างกันคือ 280 °C และ 360 °C แสดงตั้งในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าปริมาตรการสึกหรอไม่แตกต่างกันมากนัก โดยอยู่ในช่วง 23 – 38 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และเมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่อบออสเทนต์ให้ชิงเป็นเวลาสั้นคือ 30 นาที (วงกลม ●) พบว่าเกิดการสึกหรอมากที่สุด ซึ่งเป็นไปได้ว่า เวลาการอบออสเทนต์ให้ชิงสั้นทำให้ออสเทนต์เริ่มต้นบางส่วนมีปริมาณคาร์บอนน้อย ความสามารถในการชุบแข็งจึงต่ำ ระหว่างที่ชุบลงในอ่างเกลือหลอมเหลวจึงมีบางส่วนเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรต์ allotriomorph ดังในรูปที่ 9 เฟอร์ไรต์ประเภท dengite ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นที่ชัดเจน ยาวและเรียบเรียงตัวเป็นชั้นๆ จึงทำให้เกิดการสึกหรอย่างรุนแรง

ดังกล่าวมีความแข็งต่ำ จึงเกิดการสึกหรอย่างรุนแรง พบว่าในชุดการทดลองที่อบออสเทนต์ให้ชิงเป็นเวลาสั้นเพียง 30 นาทีนี้ เมื่อชุบท่อสหหกเปอร์ริงด้วยเวลาเพียง 60 นาที ปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุด

ซึ่งน่าจะเป็นไปได้ว่า ภายในชุบท่อสหหกมีมาร์เกนไชต์เกิดขึ้นมาก เนื่องจากคาร์บอนแพร่กระจายเข้าสู่เฟอร์ไรต์เข้าไปในอสเทนต์อย่างมาก ทำให้มีความแข็งต่ำ ไม่สามารถต้านทานการสึกหรอได้ ทำให้ออสเทนต์มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอยังคงอยู่

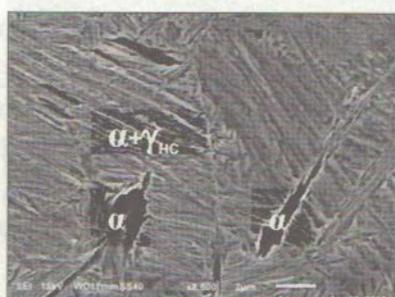


รูปที่ 8 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างบวมตัวการสักหรือกับเวลาชุมนอสเทเมเปอร์ริง โดยอุณหภูมิอสเทเมเปอร์ริงเป็น 280°C (บน) และ 360°C (ล่าง)

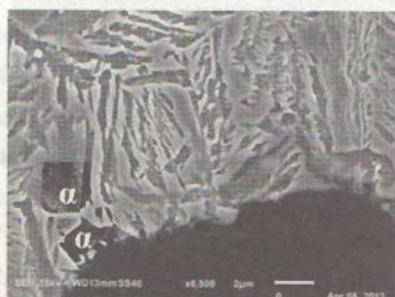
ขั้นงานเป็นตัวลงหลังชุมนอสเทเมเปอร์ริงจึงเกิดมาร์เกนไชต์อยู่ภายในอสเพอร์ไรต์ และเมื่อใช้เวลาชุมนอสเทเมเปอร์ริงนานขึ้น ปริมาตรการสักหรือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากคาร์บอนแพร์เจมเฟอร์ไรต์เข้าไปในอสเตรในต์รอบๆ ได้มากขึ้น อสเตรในต์จึงมีเสถียรภาพมากขึ้นและปริมาณมาร์เกนไชต์ลดลง สอดคล้องกับค่าความแข็งที่ลดลง ต่อมามีอิฐจารณาชุดการทดลองที่อบอสเตรนไชต์นานขึ้นเป็น 60 (■) และ 90 นาที (▲) พบว่าปริมาตรการสักหรือลดลงเนื่องจากเวลาอบอสเตรนไชต์นานขึ้น อสเตรในต์เริ่มต้นก็มีปริมาณคาร์บอนมากขึ้น จึงไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์ประเภท allotriomorph

หากเปรียบเทียบผลของเวลาในการชุมนอสเทเมเปอร์ริง พบว่า ในชุดการทดลองที่อบอสเตรนไชต์ 30 และ 60 นาที ปริมาตรการสักหรือก็มีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นเมื่อชุมนอสเทเมเปอร์ริงนานขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการมีมาร์เกนไชต์ในชั้นงานที่ชุมนอสเทเมเปอร์ริงสั้น ส่วนชุดการทดลองที่อบอสเตรนไชต์นาน 90 นาทีนั้น ถ้าอุณหภูมิชุมนอสเทเมเปอร์ริงเป็น 360°C พบว่า เวลาการชุมนอสเทเมเปอร์ริงที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลให้ปริมาตรการสักหรือเพิ่มขึ้นแต่ชัดเจนมากนัก แต่ถ้าอุณหภูมิชุมนอสเทเมเปอร์ริงเป็น 280°C พบว่า ปริมาตรการสักหรือเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาชุมนอสเทเมเปอร์ริงนานขึ้นจาก 60 เป็น 90 นาที แล้วลดลงเมื่อเวลานานขึ้นเป็น 120 นาที โดยการลดลงในช่วงหลังอาจเป็นผลมาจากการเข้าสู่ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเฟสขั้นที่ 2 ซึ่งอสเตรในต์ carbонสูงเริ่มแตกตัวให้การใบด์กับเฟอร์ไรต์ ทำให้ความแข็งลดลงและความต้านทานการขัดสึกลดลงด้วย



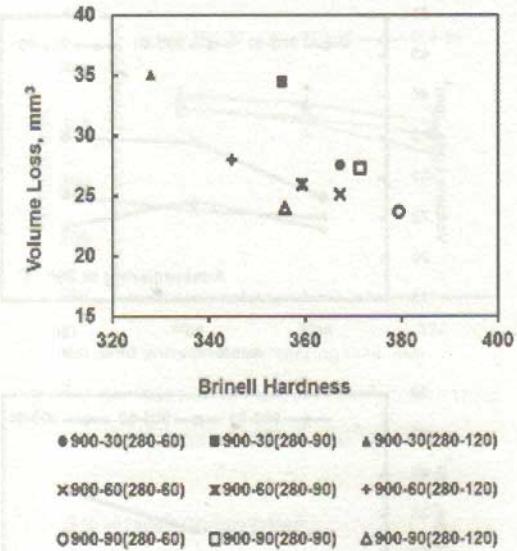
(g) 280 °C



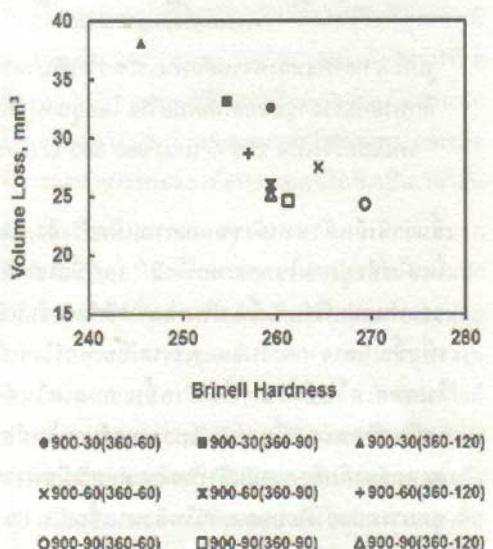
(h) 360 °C

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่อบอสเตรนไชต์นาน 30 นาทีแล้วชุมนอสเทเมเปอร์ริงด้วยเวลา 60 นาที ($\alpha+\gamma_{\text{HC}}$ คืออสเพอร์ไรต์ และ α คือ เฟอร์ไรต์ประเภท Allotriomorph)

3.3.2 ปริมาตรการสึกหรอเทียบกับความแข็ง เมื่อนำมาค่าปริมาตรการสึกหรอของทุกชิ้นงานมาพล็อตตามค่าความแข็งของแต่ละชิ้น พบว่า ปริมาตรการสึกหรอมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความแข็งเพิ่มขึ้นและยังพบว่าเหล็กหล่อเหนียวอุณหภูมิอสเทเนที่ 280°C ที่อบอุ่นไหซิง 30 นาที เกิดการสึกหรอสูงที่สุด โดยที่ปริมาตรการสึกหรอสูงขึ้นเมื่อเวลาชุบอุสเทเน เปอร์ริงนานขึ้นตั้งในรูปที่ 10-11 ในกรณีของเหล็กหล่อเหนียวที่อบอุ่นไหซิงด้วยเวลา 30 นาที พบว่ายังมีอสเตรนไดน์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เกนไซด์ที่อุณหภูมิห้องเล็กน้อยและเกิดเฟอร์ไรต์ประยุกต์ allotriomorph จำนวนมาก เมื่อเวลาชุบอุสเทเนที่ 280°C นานขึ้น พบว่าปริมาตรการสึกหรอลดลงเนื่องจากอสเตรนไดน์เริ่มต้นมีปริมาณкар์บอนมากขึ้น จึงมีความสามารถในการชุบแข็งสูงและไม่เกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นเฟอร์ไรต์ประยุกต์ allotriomorph หักนิ่งลึกลงที่สังเกตได้อีกด้วย บางชิ้นงานที่แม้ว่าจะมีความแข็งใกล้เคียงกันแต่ก็พบว่าปริมาตรการสึกหรอต่างกันมาก เช่น ชิ้นงานที่อบอุ่นไหซิง 30 นาที และชุบอุสเทเนเปอร์ริงที่ 280°C ด้วยเวลา 90 นาที (■ ในรูปที่ 10) กับชิ้นงานที่อบอุ่นไหซิง 90 นาที และชุบอุสเทเนเปอร์ริงที่ 280°C ด้วยเวลา 120 นาที (△ ในรูปที่ 10) มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันแต่ชิ้นที่อบอุ่นไหซิงนาน 90 นาที ให้ปริมาตรการสึกหรอต่ำกว่ามาก ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน ชิ้นงานที่อบอุ่นไหซิงสั้น (30 นาที) มีปริมาณมาร์เกนไซด์มากแต่ก็มีเฟอร์ไรต์ประยุกต์ allotriomorph อยู่ด้วย ความด้านทานการสึกหรอจึงต่ำ ส่วนชิ้นงานที่อบอุ่นไหซิงนาน (90 นาที) ไม่มีเฟอร์ไรต์ประยุกต์ allotriomorph และมาร์เกนไซด์แล้ว แต่โครงสร้างพื้นทั่งหมดเป็นอุสเทเนฟอเรร์ไรต์ ทำให้มีความแข็งใกล้เคียงกับชิ้นดังกล่าว โครงสร้างจุลภาค อุสเทเนฟอเรร์ที่ภายในมีเฟสอสเตรนไดน์คงคาร์บอนสูงนั้น มีความด้านทานการสึกหรอแบบขัดสีต่ำกว่าโครงสร้างจุลภาคสมรรถะห่วงเฟอร์ไรต์ allotriomorph กับอุสเทเนฟอเรร์ที่ภายในมีมาร์เกนไซด์อยู่ด้วย



รูปที่ 10 ปริมาตรการสึกหรอเทียบกับความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวชุบอุสเทเนเปอร์ริงที่ 280°C



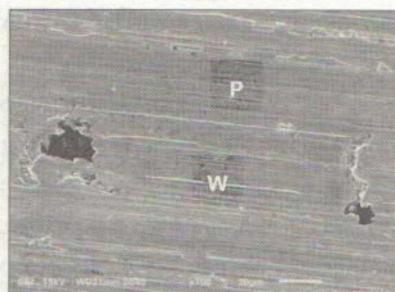
รูปที่ 11 ปริมาตรการสึกหรอเทียบกับความแข็งของเหล็กหล่อเหนียวชุบอุสเทเนเปอร์ริงที่ 360°C

3.3.3 พื้นผิวความเสียหายจากการทดสอบความด้านการขัดสี

เมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวหลังการขัดสีของชิ้นงานที่มีปริมาตรการสึกหรอน้อยที่สุดกับมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าเหล็กหล่อเนียนยานที่เกิดการสึกหรอย่างมากที่สุด ($900-30(360-120)$) มีรอยความเสียหายเป็นร่องลึกมากกว่า เนื่องมาจากมีความแข็งต่ำที่สุด ออสเพอร์ริโอต์หยานกกว่า และมีเพอโร่ริต์ประเภท allotriomorph อยู่ด้วย จึงถูกเม็ดกรายชุดเป็นร่องลึก เหล็กหล่อเนียนยานที่ชุบออสเทมเปอริงที่ 360°C มีรอยการขัดสีที่เป็นร่องลึกกว่าเหล็กหล่อเนียนยานที่ชุบออสเทมเปอริงที่ 280°C เนื่องจากการชุบออสเทมเปอริงที่อุณหภูมิสูงกว่า ได้โครงสร้างพื้นเป็นออสเพอร์ริโอต์หยานกกว่า ความแข็งจึงต่ำกว่า อย่างไรก็ตามร่องรอยการขัดสีที่ลึกกว่าไม่ได้สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรการสึกหรอ เช่น ถ้าออสเพอร์ริโอต์หยานนั้นเป็นออสเพอร์ริโอต์ที่ภายใต้มืออสเดนท์เหลือค้างที่มีควรบอนสูงก็จะมีความด้านท่านการสึกหรอได้ต่ำ ดังที่เห็นได้ว่าชิ้นงานที่อบออสเดนไทรชิ้น 90 นาที แล้วชุบออสเทมเปอริงที่ 280°C และ 360°C ด้วยเวลา 120 นาที (Δ ในรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ) ต่างก็มีปริมาตรการสึกหรอใกล้เคียงกัน รูปแบบความเสียหายที่พื้นผิวนั้นเป็นลักษณะรอยໄไท (ploughing) และรอยเฉือน (wedge forming) บริเวณเนื้อพื้นเกิดการเสียรูปแบบถาวรหือการแตกหักจากการขัดสีกันระหว่างเหล็กหล่อเนียนยานล้อยางโดยมีเม็ดกรายเป็นตัวขัดสี เมื่อสังเกตจากรูปที่ 13 ซึ่งใช้กล้องขยายสูงขึ้น พบว่ารอยแตกมีจุดเริ่มต้นมาจากเนื้อพื้นรอบแกรไฟฟ์ Quanshun และคาน [9] กับบริเวณรอยแตกที่เริ่มเกิดขึ้นที่เนื้อพื้นรอบแกรไฟฟ์จากการสึกหรอแบบขัดสีชนิดสามวัตถุเช่นกัน แกรไฟฟ์เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำและความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อพื้นกับแกรไฟฟ์ตันต่ำ ทำให้ความเข้มของเดินสูงมากที่เนื้อพื้นรอบๆ แกรไฟฟ์ ดังนั้นจึงเกิดการเสียรูปแบบการรุนแรงและเกิดการแตกร้าวที่บริเวณดังกล่าว



(g)



(h)

รูปที่ 12 พื้นผิวการสึกหรอหลังทดสอบการขัดสีของ

(ก) เหล็กหล่อเนียนยาน 900-90(280-60) และ

(ข) เหล็กหล่อเนียนยาน 900-30(360-120) โดย P คือ รอยไฮ W คือรอยเฉือน



รูปที่ 13 รอยแตกภายหลังทดสอบการขัดสีของเหล็กหล่อเนียนยาน 900-90(280-60)

4. สรุปผลการทดลอง

- เวลาในการอบออสเดนไทรชิ้นมีผลต่อความด้านท่านการสึกหรอแบบขัดสีของเหล็กหล่อเนียนยาน ออสเทมเปอร์ โดยความด้านท่านการสึกหรอสูงขึ้น ตามเวลาการอบออสเดนไทรชิ้นที่นานขึ้น เหล็กหล่อ

เห็นได้ออสเทเนมเบอร์ที่อบออสเตนไนท์ชิงเป็นเวลา 90 นาที มีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีที่สุด

2. เหล็กหล่อเหลี่ยมออสเทเนมเบอร์ที่มีค่าความแข็งไกส์เคียงกันแต่มีความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีต่างกัน เนื่องมาจากโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกันจากการอบซุบทางความร้อนด้วยสภาวะแตกต่างกัน โครงสร้างจุลภาคออสเพอร์ไรต์ทั้งหมดให้ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีสูงกว่าโครงสร้างจุลภาคผสมระหว่างออสเพอร์ไรต์ มาร์เกนไซต์และเพอร์ไรต์ประเภท allotiomorph

3. เหล็กหล่อเหลี่ยมที่มีจำนวนแกรไฟต์เม็ดกลมประมาณ 100 เม็ดต่อตารางมิลลิเมตร และโครงสร้างพื้นหลังการหล่อเป็นเพอร์ไรต์ผสมเพิร์ลิต ควรใช้วิธีการอบออสเตนไนท์ชิงอย่างน้อย 60 นาที เพื่อให้ออสเตนไนท์เริ่มต้นมีความสามารถในการซุบแข็งสูงพอที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดเพอร์ไรต์ประเภท allotiomorph ได้ ปัจจัยอื่นๆ ที่สำคัญต่อปริมาณคาร์บอนในออสเตนไนท์เริ่มต้น เช่น อุณหภูมิการอบ ออสเตนไนท์ชิง ส่วนผสมทางเคมีเริ่มต้นของเหล็กหล่อ และจำนวนแกรไฟต์ต่อตารางมิลลิเมตร ควรได้รับการศึกษาวิจัยต่อไป เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

4. รูปแบบความเสียหายบนพื้นผิวที่ถูกขัดสี เป็นลักษณะรอบไปและรอบเดือน เหล็กหล่อเหลี่ยมที่ซุบออสเทเนมเบอร์ที่ 360°C มีรอยขัดสีที่เป็นร่องลึกกว่าเหล็กหล่อเหลี่ยมที่ซุบออสเทเนมเบอร์ที่ 280°C เนื่องจากการซุบออสเทเนมเบอร์ที่อุณหภูมิสูงกว่าได้โครงสร้างพื้นเป็นอ่อนอ้อสเพอร์ไรต์ที่หยาบกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มนัส สกิรจินดา, เหล็กหล่อ, สมาคมวิชากรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, (2543).

- [2] P. J. Blau, "ASM Metals Handbook; Vol. 18- Friction, Lubrication, and Wear Technology," ASM International, pp. 337-351, 1992.
- [3] M. H. Sohi, M. N. Ahmadabadi, and A. B. Vahdat, "The role of austempering parameters on the structure and mechanical properties of heavy section ADI," *J. of Mater. Proc. Tech.*, vol. 153 - 154, pp. 203 - 208, 2004.
- [4] A. Vasko, "Chosen factors influencing microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron," *Mater. Eng.*, vol. 16, issue 4, pp. 11 - 14, 2009.
- [5] G. Francucci, J. Sikora, and R. Dommarco, "Abrasion resistance of ductile iron austempered by the two-step process," *Mater Sci Eng*, vol. A485, pp. 46 - 54, 2008.
- [6] Y. Sahin, M. Erdogan, and V. Kilicli, "Wear behaviour of austempered ductile irons with dual matrix structures," *Mater. Sci. Eng.*, vol. A444, pp. 31-38, 2007.
- [7] *Specification for Ferritic Ductile Iron Pressure-Retaining Castings for Use at Elevated Temperatures*, ASTM Standard A395/A395M - 99(2009), 2009.
- [8] J. Aranzabal, I. Gutierrez, J. M. Rodriguez - ibabe, and J. J. Urcola, "Influence of the amount and morphology of retained austenite on the mechanical properties of an austempered ductile iron," *Metall. and Mater. Trans.*, vol. 28A, pp. 1143 - 1156, 1997.
- [9] L. Quanshun, X. Jingpei, and S. Yanpei, "Effects of microstructures on the abrasive wear behaviour of spheroidal cast iron," *Wear*, vol. 184, pp. 1-10, 1999.