

## ผลของอุณหภูมิการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าชุบเคลือบนิเกิล

### Effects of Austenitizing and Tempering Temperatures on the Mechanical Properties of Nickel Plated Steel

สุภกิจ ขาวเนตร

Subhakij Khaonetr

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โทร. 0-2649-5000 ต่อ 2071 โทรสาร. 0-3732-2608

E-mail: suphakij@swu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวต่อโครงสร้างจุลภาค ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปี (บากร่องวี) และความแข็งของเหล็กกล้าชุบเคลือบนิเกิล (เอ็นพีเอส) โดยนำไปอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 650°C 850°C และ 1050°C หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ และนำไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 200°C 250°C และ 300°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการอบชุบแข็ง ผลการวิจัยพบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบชุบแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด และความแข็งมีแนวโน้มลดลง แต่ความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C ทำให้ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มลดลง แต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการอบชุบแข็งเพิ่มขึ้นจาก 850°C ถึง 1050°C

**คำสำคัญ:** อุณหภูมิการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว คุณสมบัติเชิงกล เหล็กกล้าชุบเคลือบนิเกิล

#### Abstract

This research has an objective to study on effects of austenitizing and tempering temperatures on the microstructure, tensile strength, Charpy impact strength (V-notch) and hardness of nickel plated steel (NPS). The austenitizing temperatures were 650°C, 850°C and 1050°C for 6 hours. After the samples were quenched in water, they

were tempered at 200°C, 250°C and 300°C for 6 hours.

The results showed that the yield strength and ultimate tensile strength and hardness decreased as the austenitizing temperature increased, but the Charpy impact strength increased. The yield strength and ultimate tensile strength decreased as the tempering temperature increased, when austenitizing temperature was 650°C, but the yield strength and ultimate tensile strength increased as the austenitizing temperature increased from 850°C to 1050°C

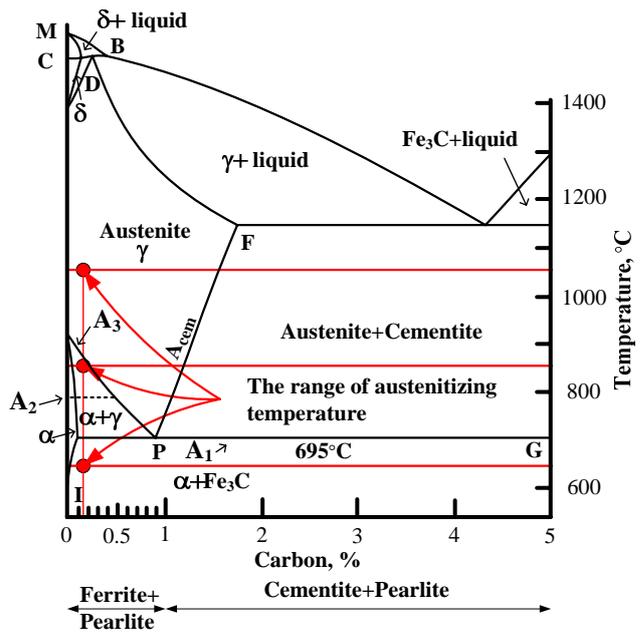
**Keywords:** Austenitizing and Tempering temperatures, Mechanical properties, Nickel plated steel

#### 1. บทนำ

เหล็กกล้าชุบเคลือบนิเกิล (เอ็นพีเอส) นิยมใช้เป็นวัสดุในงานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เนื่องจากมีความต้านทานต่อแรงอัดและการกัดกร่อนได้ดี [1] งานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกนั้น ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะเป็นแรงงานในการผลิต ค่าวัสดุจะเป็นส่วนน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับราคารวมทั้งหมด การเลือกวัสดุไม่เหมาะสมกับลักษณะงาน อาจนำไปสู่การเสียหาย (Failure) และเกิดปัญหาขึ้นขณะใช้งานได้ เมื่อนำเอ็นพีเอส มาผ่านกรรมวิธีทางความร้อน และกระบวนการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล จะเกิดการเปลี่ยนแปลง 2 แบบ คือ สภาพความเหนียว (Ductility) เป็นสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงมากก่อนการเสียหาย ในสถานะนี้จะสามารถดูดซับพลังงานได้สูงเช่นกัน และสภาพความเปราะ (Brittleness) เป็นสถานะที่ไม่เกิดการคราก (Yielding) หรือมีแต่น้อยมากก่อนการเสียหาย และมักจะเป็น

สภาวะที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ต่ำมาก [2] เมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานแรงอัดสูงสุด (Ultimate compressive strength) เพราะเกิดขึ้นจากรอยแตกขนาดเล็กมาก (Micro cracks) บนผิวชิ้นทดสอบ รอยแตกนี้ จะมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วจนถึงช่วงวิกฤติ เมื่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบลดลง จนกระทั่งความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากำลังของวัสดุ ชิ้นทดสอบก็จะเกิดการเสียหายทันทีในทางกลับกัน รอยแตกดังกล่าวจะถูกปิดลงภายใต้แรงอัด (Compressive load) และชิ้นทดสอบดังกล่าว จะมีพฤติกรรมคล้ายกับวัสดุเหนียว (Ductile material) โดยชิ้นทดสอบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะโป่งออกทางด้านข้างก่อนเกิดการเสียหาย [3] การเปลี่ยนสภาพความเหนียวไปเป็นสภาพความเปราะของโลหะ เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเกิดขึ้นกับโลหะที่มีโครงสร้างแบบ Body Center Cubic, BCC และ Hexagonal Closed Pack, HCP แต่จะไม่เกิดขึ้นกับโลหะที่มีโครงสร้างแบบ Face Center Cubic, FCC [4] ถ้าอุณหภูมิการอบชุบแข็งสูงกว่าอุณหภูมิความเป็นของแข็ง จะทำให้ธาตุผสมโลหะบางส่วนหลอมเหลวและรวมตัวกันที่ขอบเขตเกรน (Grain boundary) ทำให้เกิดการแยกตัวของเกรนในขณะอบชุบแข็ง เมื่อเย็นตัวลงจึงเป็นสาเหตุของการแตกหัก (Fracture) ตามขอบเขตเกรนได้ [5]

การเปลี่ยนสภาพความเหนียวไปเป็นสภาพความเปราะของเอ็นพีเอสโดยกรรมวิธีทางความร้อน ด้วยการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวนั้น อุณหภูมิมีความสำคัญต่อพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงสภาพเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ได้เส้นอุณหภูมิวิกฤตล่าง ( $A_1$ ) อุณหภูมิวิกฤต ( $A_2$ ) และเหนือเส้นอุณหภูมิวิกฤตบน ( $A_3$ ) (ดังรูปที่ 1 [6]) ดังนั้น การศึกษาผลของอุณหภูมิการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว จึงมีความจำเป็นต้องทราบสภาวะที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ และคุณสมบัติเชิงกล เพื่อนำไปพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานในประเภทต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 1 ช่วงอุณหภูมิที่ทำการอบชุบแข็งโดยอ้างอิงจากแผนภูมิสมดุล (Equilibrium diagram)

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

เอ็นพีเอสมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 1 [7] นำมาตัดเพื่อเตรียมสำหรับการอบชุบแข็ง การอบคืนตัว และเป็นชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดึง การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก การทดสอบความแข็ง และการทดสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึงจะขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E 8M-97 [8] (ดังรูปที่ 2 (a)) ชิ้นทดสอบความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปี (บากร่องวี) จะขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E23-81 [9] (ดังรูปที่ 2(b)) ส่วนชิ้นทดสอบความแข็ง และชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค จะใช้ชิ้นทดสอบร่วมกัน (ดังรูปที่ 2(c))

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเอ็นพีเอสวิเคราะห์โดย Dongbu Steel Company Limited.

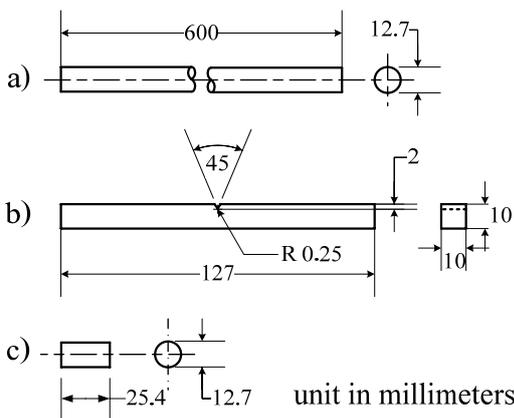
Chemical composition (% by weight)					
Fe	C	Si	Mn	P	S
98.68	0.13	0.03	0.60	0.02	0.03
Al	N	Cu	Ni	Cr	Mo
0.07	0.02	0.12	0.10	0.10	0.10

**2.2 การอบชุบแข็งและการอบคืนตัว**

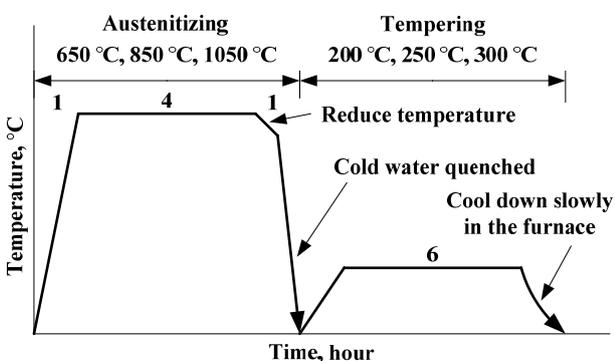
การอบชุบแข็งและการอบคืนตัวเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลด้วยความร้อน มีขั้นตอนดังนี้

(1) นำชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึง การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก และการทดสอบความแข็ง ไปอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 650°C 850°C และ 1050°C ตามลำดับเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 3) แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการชุบน้ำที่มีอุณหภูมิ 5°C ถึง 10°C

(2) นำชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปี (บากร่องวี) และการทดสอบความแข็ง ที่ผ่านการอบชุบแข็งมาแล้ว นำไปอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 200°C 250°C และ 300°C ตามลำดับ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เช่นกัน (ดังรูปที่ 3) แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงในเตาอบ



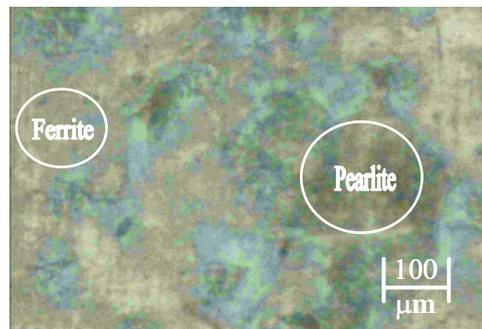
**รูปที่ 2** ขนาดของชิ้นทดสอบ a) ความต้านทานแรงดึง b) ความต้านทานแรงกระแทก c) ความแข็งและโครงสร้างจุลภาค



**รูปที่ 3** แผนภาพการอบชุบแข็งและการอบคืนตัว

**2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางโลหะวิทยา**

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอส (ดังรูปที่ 4) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ Nikon Epiphot 200 เชื่อมต่อกับชุด CCD-Iris เป็นการดำเนินการภายหลังจากการขัดผิวชิ้นทดสอบด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์ตั้งแต่เบอร์ 220 320 400 600 800 1000 1200 และ 1500 ตามลำดับ การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) เป็นการขัดผิวมันของชิ้นทดสอบด้วยผงขัดอะลูมินา (Alumina oxide) บนผ้าสักหลาด การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นทดสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้น จะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะนำไปกัดด้วยกรดไนตริก 5% และนำมาล้างด้วยแอลกอฮอล์อีกครั้งหนึ่ง เป่าด้วยลมร้อนจนผิวชิ้นทดสอบแห้งสนิท [10]



**รูปที่ 4** โครงสร้างพื้นฐานของเอ็นพีเอส ได้แก่ เฟอไรต์ (Ferrite) และเพอร์ไลต์ (Pearlite)

**2.4 การทดสอบความแข็ง**

การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (HB 30) ด้วยเครื่อง Affri Brevetti (187.5 kgf. Pre-load 10 kgf.) ใช้หัวกดทรงกลมทำด้วยเหล็กกล้ามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 mm. ภาระหัวกดชิ้นทดสอบภายใต้ภาระเริ่มต้น 10 กิโลกรัมแรง เมื่อถึงภาวะคงที่ โดยเข็มชี้จะเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของหัวกดและยังตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความลึกของรอยกดจากหัวกด ถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งศูนย์ ในขณะที่เพิ่มภาระเริ่มต้นภาระหลักก็เพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลต่อการเพิ่มขนาดของรอยกด เมื่อถึงสภาวะคงที่อีกครั้ง ปลดภาระหลักออก แต่ภาระเริ่มต้นยังคงไว้ การปลดภาระหลักออก ส่งผลให้มีการคืนตัวบางส่วนและความลึกของรอยกดลดลง การเพิ่มความลึกของรอยกดอย่างถาวร เนื่องจากการเพิ่มและปลดภาระหลักออก

**2.5 การทดสอบความต้านทานแรงดึง**

การทดสอบความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่อง Instron Satec Systems รุ่น Mark III 300 HVL-3207 จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยบันทึกความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ เพื่อนำไปคำนวณหาความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก ( $\sigma_y$ ) และความต้านทานแรงดึงสูงสุด ( $\sigma_u$ ) จากภาระที่กระทำ (P) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ( $A_0$ ) ดังสมการ (1) ดังนี้

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \tag{1}$$

ความเหนียว (Ductile) ของวัสดุจะคำนวณจากเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation,  $\epsilon$ ) ของชิ้นทดสอบ [11] โดยการกำหนดพิสัยความยาว (Gauge length) เริ่มต้นให้ชิ้นทดสอบมีค่า  $L_0$  และกำหนดพิสัยความยาวตำแหน่งที่ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหักมีค่า  $L_f$  ดังสมการ (2) ดังนี้

$$\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} 100\% \tag{2}$$

กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ( $A_0$ ) พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบในตำแหน่งที่ชิ้นทดสอบเกิดการแตกหัก ( $A_f$ ) ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Percent reduction of area,  $\psi$ ) จะได้ดังสมการ (3)

$$\psi = \frac{A_0 - A_f}{A_0} 100\% \tag{3}$$

**2.6 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก**

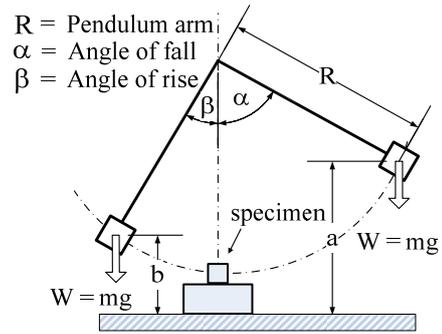
การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปี (บากร่องวี) ด้วยเครื่อง The pendulum impact testing machine รุ่น JB 30 B เป็นการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกระหว่างแฮมเมอร์กับชิ้นทดสอบ ทำให้เกิดอัตราความเครียดสูง [12] ส่งผลให้เกิดความเค้นสูงมากขึ้นในตำแหน่งรอยบากร่องวี สาเหตุนี้ทำให้เกิดการแตกหักในทันที ในทางกลับกันการยืดตัวมักจะเกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบภายใต้อัตราความเครียดและความเค้นต่ำ ความต้านทานการแตกหักของวัสดุ (Fracture resistance) คือ

การดูดซับพลังงานทั้งหมด (Absorbed energy) จาก การกระแทกของแฮมเมอร์ [13] [14] ดังสมการ (4) (5) และ (6)

$$E_i = mgR (1 - \cos a) = WR (1 - \cos a) \tag{4}$$

$$E_r = mgR (1 - \cos b) = WR (1 - \cos b) \tag{5}$$

$$E_{abs} = WR (\cos b - \cos a) \tag{6}$$

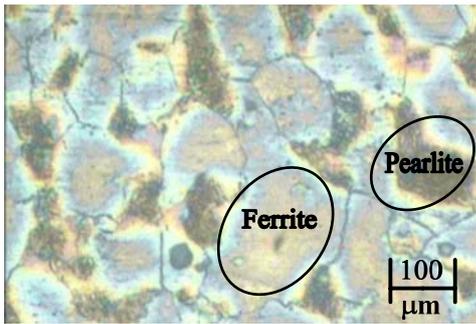


**รูปที่ 5** หลักการทำงานของ การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

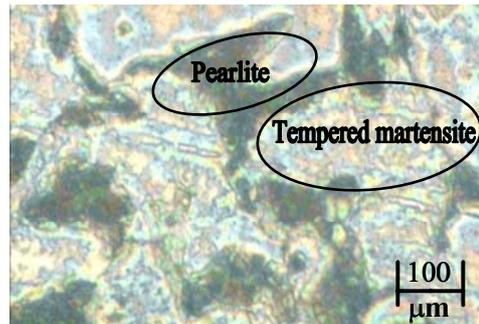
**3. ผลและการวิเคราะห์ผล**

**3.1 การวิเคราะห์ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค**

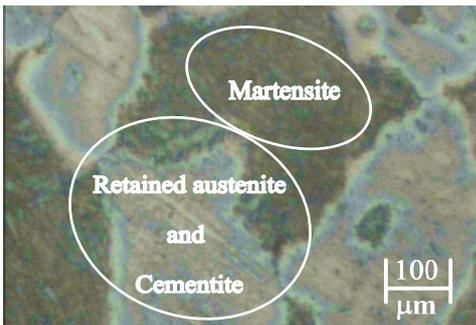
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอส ในกรรมวิธีทางความร้อนด้วยการอบชุบแข็ง (Austenitizing) ที่อุณหภูมิ 650°C 850°C และ 1050°C โดยทำให้เย็นตัวลงด้วยน้ำอย่างรวดเร็ว อัตรา 19.36°C/s 38.09°C/s และ 45.59°C/s ตามลำดับ พบว่า อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C ได้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (พื้นสีขาว) และเพอร์ไลต์ (กลุ่มสีเข้ม) (ดังรูปที่ 6a) เนื่องจากการอบชุบแข็งที่อุณหภูมินี้อยู่ได้เส้นอุณหภูมิวิกฤติล่าง ( $A_1$ ) (ดังรูปที่ 1) อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 850°C ได้โครงสร้างมาร์เตนไซต์ (Martensite) (กลุ่มสีเข้ม) ออสเตไนต์ตกค้าง (Retained austenite) (พื้นสีจาง) และซีเมนไตต์ (Cementite) (ดังรูปที่ 6b) เนื่องจากการอบชุบแข็งที่อุณหภูมินี้อยู่ในช่วงอุณหภูมิวิกฤติ ( $A_2$ ) การทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างเหล็กจะเปลี่ยนเป็นมาร์เตนไซต์ แต่ยังมีส่วนที่เป็นออสเตไนต์อยู่ และอุณหภูมิการชุบที่ 1050°C ได้โครงสร้างออสเตไนต์ (Austenite) ทั้งหมด แต่อัตราการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วทำให้ได้โครงสร้างมาร์เตนไซต์ (กลุ่มสีดำ) และออสเตไนต์ตกค้าง (พื้นสีจาง) (ดังรูปที่ 6c) การอบชุบแข็งที่อุณหภูมินี้อยู่เหนือเส้นอุณหภูมิวิกฤติบน ( $A_3$ )



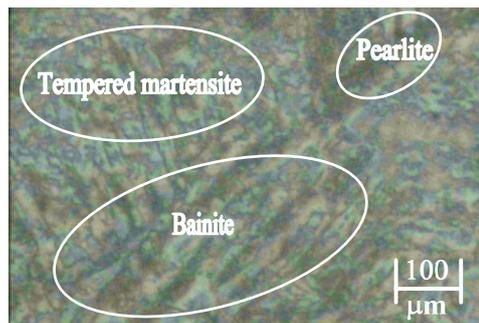
6a)



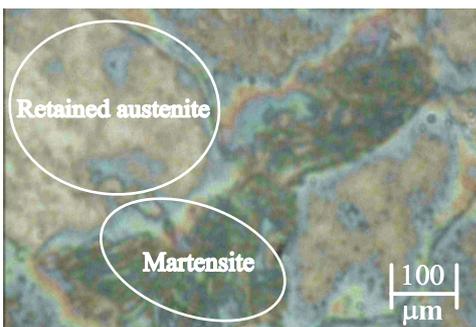
7b)



6b)

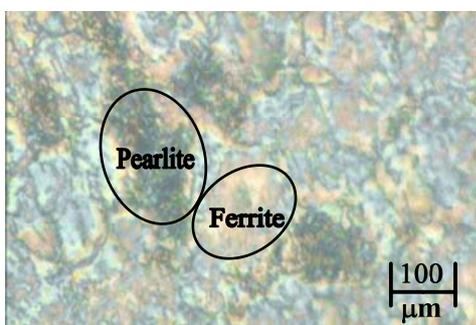


7c)



6c)

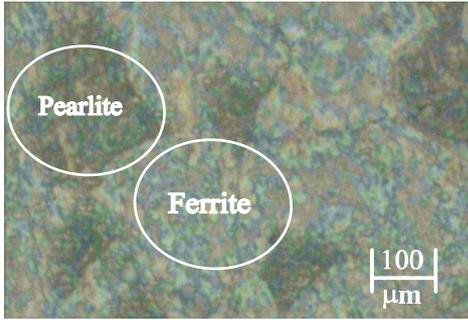
**รูปที่ 6** โครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอสในการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 6a) 650°C 6b) 850°C และ 6c) 1050°C



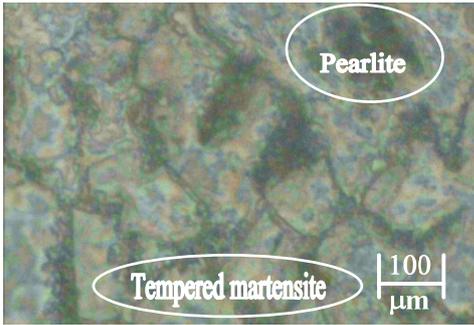
7a)

**รูปที่ 7** โครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอสในการอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 7a) 650°C 7b) 850°C 7c) 1050°C การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 200°C

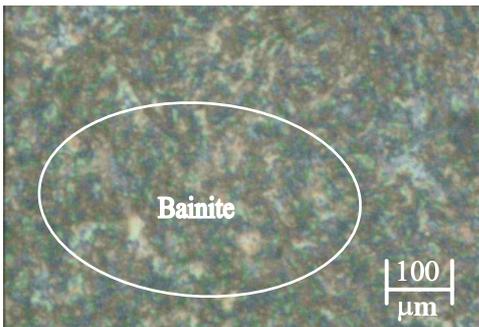
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอส ในกรรมวิธีทางความร้อนด้วยการอบชุบแข็ง (Austenitizing) ที่อุณหภูมิ 650°C 850°C และ 1050°C และการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 200°C พบว่าอุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C ได้โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์ หลังจากการอบคืนตัวส่งผลให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (พื้นสีขาว) และเพอร์ไลต์ (กลุ่มสีเข้ม) มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น (ดังรูปที่ 7a) อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 850°C ได้โครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ออสเตไนต์ตกค้าง และซีเมนไต์ หลังจากการอบคืนตัว ส่งผลให้กลายเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (Tempered martensite) (พื้นสีจาง) และเพอร์ไลต์ (กลุ่มสีเข้ม) (ดังรูปที่ 7b) และอุณหภูมิการอบชุบที่ 1050°C มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเตไนต์ตกค้าง หลังจากการอบคืนตัวส่งผลให้โครงสร้างออสเตไนต์ตกค้างเปลี่ยนไปเป็นเพอร์ไลต์ (กลุ่มสีเข้ม) เบไนต์ (ลักษณะคล้ายเข็ม) และเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (ดังรูปที่ 7c)



8a)



8b)

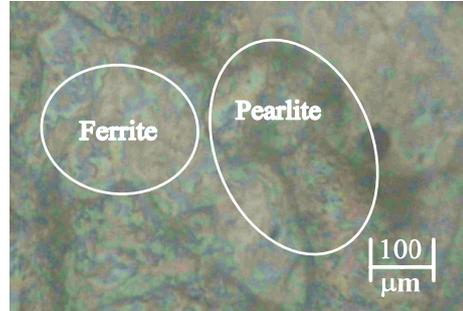


8c)

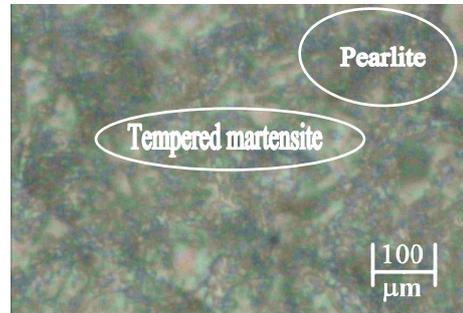
**รูปที่ 8** โครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอสในการอบชุบแข็งที่ อุณหภูมิ 8a) 650°C 8b) 850°C 8c) 1050°C การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 250°C

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอส ในกรรมวิธี ทางความร้อนด้วยการอบชุบแข็ง (Austenitizing) ที่อุณหภูมิ 650°C 850°C และ 1050°C และการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 250°C พบว่าอุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C ได้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพอร์ไลต์ หลังจากการอบคืนตัวส่งผลให้โครงสร้าง เฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น (ดังรูปที่ 8a) อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 850°C ได้โครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ออสเตไนต์ตกค้าง และซีเมนไตต์ หลังจากการอบคืนตัว ส่งผล ให้กลายเป็นโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ และเพอร์ไลต์ (ดังรูปที่ 8b) และอุณหภูมิการอบชุบที่ 1050°C ได้โครงสร้าง

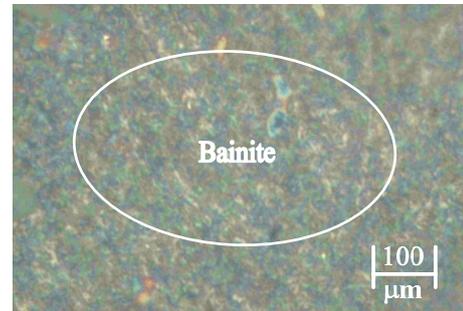
มาร์เทนไซต์และออสเตไนต์ตกค้าง หลังจากการอบคืนตัว ส่งผลให้โครงสร้างออสเตไนต์ตกค้างเปลี่ยนไปเป็นเบไนต์ และเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (ดังรูปที่ 8c)



9a)



9b)



9c)

**รูปที่ 9** โครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอสในการอบชุบแข็งที่ อุณหภูมิ 9a) 650°C 9b) 850°C 9c) 1050°C การอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300°C

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอส ในกรรมวิธี ทางความร้อนด้วยการอบชุบแข็ง (Austenitizing) ที่อุณหภูมิ 650°C 850°C และ 1050°C และการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 300°C พบว่าอุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C ได้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพอร์ไลต์ หลังจากการอบคืนตัวส่งผลให้โครงสร้าง เฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น (ดังรูปที่ 9a) อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 850°C ได้โครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์

ออสเตไนต์ตกค้าง และซีเมนไต์ หลังจากการอบคืนตัว ส่งผลให้กลายเป็นเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ และเพอร์ไลต์ (ดังรูปที่ 9b) และอุณหภูมิการชุบที่ 1050°C ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ และออสเตไนต์ตกค้าง หลังจากการอบคืนตัว ส่งผลให้โครงสร้างออสเตไนต์ตกค้างเปลี่ยนไปเป็นเบไนต์ และเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (ดังรูปที่ 9c)

### 3.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความแข็ง (BHN)

NPS	อุณหภูมิ (°C)	ความแข็ง (BHN)	
ก่อนชุบ	อุณหภูมิห้อง	193.0	
การอบชุบ แข็ง	650	200.0	
	850	191.7	
	1050	155.0	
การอบชุบ แข็งที่ อุณหภูมิ 650°C	การอบคืนตัว	200	166.0
		250	155.0
		300	147.7
การอบชุบ แข็งที่ อุณหภูมิ 850°C	การอบคืนตัว	200	174.3
		250	124.3
		300	233.3
การอบชุบ แข็งที่ อุณหภูมิ 1050°C	การอบคืนตัว	200	130.0
		250	130.0
		300	130.0

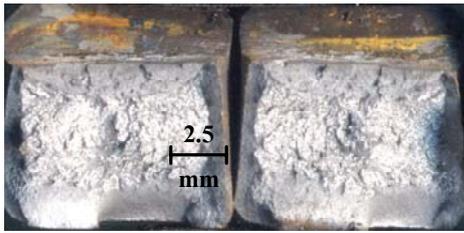
ผลการวิเคราะห์การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (BHN) ดังตารางที่ 2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบชุบแข็งเพิ่มขึ้น ความแข็งมีแนวโน้มลดลง เพราะอุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C มีโครงสร้างเพอร์ไลต์กระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นฐานโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (200.0 BHN) อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 850°C มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ออสเตไนต์ตกค้าง และซีเมนไต์ (191.7 BHN) และอุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 1050°C มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ และออสเตไนต์ตกค้าง

(155.0 BHN) อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์ อุณหภูมิการอบคืนตัวที่ 200°C ทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น (166.0 BHN) อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 850°C มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์และออสเตไนต์ อุณหภูมิการอบคืนตัวที่ 200°C ทำให้กลายเป็นโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ และเพอร์ไลต์ (174.3 BHN) และอุณหภูมิการชุบที่ 1050°C มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์และออสเตไนต์ อุณหภูมิการอบคืนตัวที่ 200°C ทำให้โครงสร้างออสเตไนต์ตกค้างเปลี่ยนไปเป็นเพอร์ไลต์ และเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ (130.0 BHN)

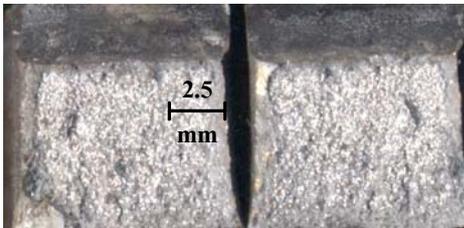
### 3.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปี

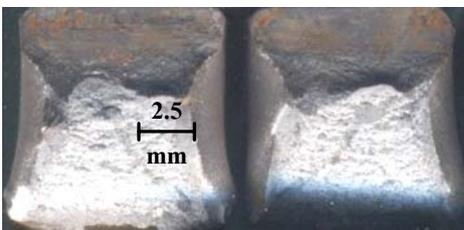
NPS	อุณหภูมิ (°C)	ความต้านทานแรง กระแทกชาร์ปี (MJ/m <sup>2</sup> )	
ก่อนชุบ	อุณหภูมิห้อง	0.535	
การอบชุบ แข็ง	650	0.585	
	850	0.655	
	1050	1.770	
การอบชุบ แข็งที่ อุณหภูมิ 650°C	การอบคืนตัว	200	0.550
		250	1.080
		300	0.920
การอบชุบ แข็งที่ อุณหภูมิ 850°C	การอบคืนตัว	200	0.635
		250	1.020
		300	0.700
การอบชุบ แข็งที่ อุณหภูมิ 1050°C	การอบคืนตัว	200	1.560
		250	1.995
		300	1.625



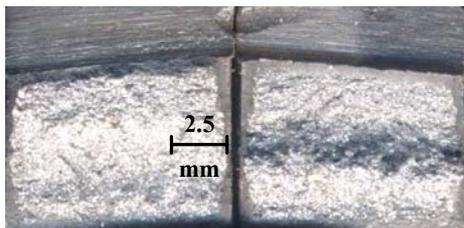
10a)



10b)



10c)



10d)

**รูปที่ 10** ตัวอย่างการแตกหักของชิ้นทดสอบความต้านทานแรงกระแทกในการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 10a) 650°C 300°C 10b) 850°C 200°C 10c) 850°C 300°C 10d) 1050°C 200°C

ผลการวิเคราะห์การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปี (บากร่องวี) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบชุบแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะอุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์ (0.585 MJ/m<sup>2</sup>) อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 850°C มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ ออสเตนไนต์ตกค้าง และซีเมนไต์ (0.655 MJ/m<sup>2</sup>) และอุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 1050°C มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ และออสเตนไนต์ตกค้าง (1.770 MJ/m<sup>2</sup>) เมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้นจาก 200°C ถึง

250°C ในขณะที่อุณหภูมิการอบชุบแข็งคงที่ ค่าความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีเกรนกลมละเอียดมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 300°C ค่าความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปีมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เพราะมีความเปราะ เนื่องจากยังมีโครงสร้างเดิมตกค้างอยู่

**3.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง**



11a)



11b)



11c)



11d)

**รูปที่ 11** ตัวอย่างการแตกหักของชิ้นทดสอบความต้านทานแรงดึงในการอบชุบแข็งและการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 11a) 650°C 300°C 11b) 850°C 200°C 11c) 850°C 300°C 11d) 1050°C 200°C

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณจากการทดสอบความต้านทานแรงดึง

NPS	อุณหภูมิ (°C)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\psi$ (%)	
ก่อนชุบ	อุณหภูมิห้อง	532.73	584.56	15.15	36.6	
การอบชุบแข็ง	650	752.57	782.39	17.17	28.0	
	850	684.16	733.36	7.56	12.9	
	1050	512.83	618.94	20.28	31.9	
การอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 650°C	การอบคืนตัว	200	698.63	771.65	15.48	27.2
		250	698.63	771.65	16.76	27.7
		300	521.01	588.11	21.73	36.0
การอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 850°C	การอบคืนตัว	200	698.63	752.57	10.24	18.6
		250	698.63	759.81	11.81	20.3
		300	782.39	845.80	14.49	26.1
การอบชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1050°C	การอบคืนตัว	200	358.10	532.73	8.67	6.5
		250	371.36	539.36	11.25	10.7
		300	1007.98	1071.14	37.83	49.5

ผลการวิเคราะห์การทดสอบความต้านทานแรงดึง (ดังตารางที่ 4) พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบชุบแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มลดลง เพราะอุณหภูมิของการอบชุบเพิ่มขึ้น เอ็นพีเอสที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพอร์ไลต์จะเปลี่ยนเป็น ออสเตไนต์ และซีเมนไต์ เมื่อถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว จะมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และซีเมนไต์ ซึ่งจะมีความเปราะ อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C เมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัว เพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีแนวโน้มลดลง เพราะเอ็นพีเอสมีธาตุแมงกานีส (0.6%) จะส่งผลให้ปรากฏอาการเปราะเนื่องจากการอบคืนตัว (Tempered brittleness) [15] อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 850°C และ 1050°C เมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก ความต้านทานแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะโครงสร้างออสเตไนต์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็น มาร์เทนไซต์ได้ในขณะชุบแข็ง (ออสเตไนต์ตกค้าง) จะแตกตัว

ให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์และซีเมนไต์ที่มีความละเอียดและ กระจุกกระจาย โครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับเบไนต์และ มีความเหนียวเพิ่มขึ้น

#### 4. สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ การอบชุบแข็งและการอบคืนตัวต่อโครงสร้างจุลภาค ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปี (บากร่องวี) และความแข็งของเหล็กกล้าชุบเคลือบนิเกิล (เอ็นพีเอส) จากผลการทดสอบสรุปได้ดังนี้

(1) จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเอ็นพีเอส พบว่า อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C ได้โครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพอร์ไลต์ อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 850°C ได้โครงสร้าง มาร์เทนไซต์ ออสเตไนต์ตกค้าง และซีเมนไต์ อุณหภูมิ การอบชุบแข็งที่ 1050°C ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ และ ออสเตไนต์ตกค้าง และเมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่ 650°C ทำให้โครงสร้าง

เฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์มีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่  $850^{\circ}\text{C}$  ได้โครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์และเพอร์ไลต์ อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่  $1050^{\circ}\text{C}$  ทำให้โครงสร้างออสเตไนต์ตกค้างหายไป เพราะเปลี่ยนไปเป็นเพอร์ไลต์ เบนไนต์ และเทมเปอร์มาร์เทนไซต์

(2) จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงพบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบชุบแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงที่จุดครากและความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่  $650^{\circ}\text{C}$  ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เพราะเอ็นพีเอสที่มีโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพอร์ไลต์จะเปลี่ยนเป็นออสเตไนต์ และซีเมนไตต์ เมื่อถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ และซีเมนไตต์ ซึ่งจะมีความเปราะ และเมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการอบชุบแข็งที่  $850^{\circ}\text{C}$  และ  $1050^{\circ}\text{C}$  ความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก และความต้านทานแรงดึงสูงสุด เฟอร์เซนต์การยืดตัว และเปอร์เซนต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อโครงสร้างทั้งหมดเปลี่ยนไปเป็นออสเตไนต์ ที่อุณหภูมิดังกล่าว เมื่อถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว จะมีโครงสร้างที่มีความเปราะสูง เมื่อทำการอบคืนตัวทำให้มีคุณสมบัติด้านความเหนียวเพิ่มขึ้น

(3) จากผลการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปี (บากร่องวี) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบชุบแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเอ็นพีเอสอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีคุณสมบัติด้านความแกร่ง (Toughness) และพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบคืนตัวเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการอบชุบแข็งมาแล้วที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  และ  $250^{\circ}\text{C}$  ค่าความต้านทานแรงกระแทกชาร์ปีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีเกรนกลมละเอียดมากขึ้น

(4) จากผลการทดสอบความแข็งแบบบริเนล (BHN) พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบชุบแข็งเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง เพราะเอ็นพีเอสอยู่ในกลุ่มของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ค่าความแข็งภายหลังจากการอบชุบแข็งจึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มศว องค์กรฯ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการสำหรับงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Tom Drozda, Charles Wick and Ramon Bakerjian, "Tool and Manufacturing Engineers Handbook Knowledge base" Society of Manufacturing Engineers, Vol. 4, 1987, pp. 4-19.
- [2] Davis H.E, Troxell G, and Hauck G.F.W, "Testing of Engineering Materials" McGraw-Hill, 1982.
- [3] Hibberler R.C, "Mechanics of materials" Prentice-Hall, New Jersey, NY, 1997.
- [4] Dowling N.E, "Mechanical Behavior of Materials" Prentice-Hall, New Jersey, NY, 1999.
- [5] Popov E.P, "Engineering Mechanics of Solids" Prentice-Hall, New Jersey, NY, 1999.
- [6] George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy" McGraw Hill, 1986.
- [7] Dongbu Steel. Material safety datasheet, 2004.
- [8] ASTM E 8M-97, "Standard test methods for tension testing of metallic materials" 1997, pp. 77.
- [9] ASTM E 23-81, "Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials" 1996, pp. 137.
- [10] Mechanical Testing, "Metals Handbook" Vol. 8, ASM, Metals Park, Ohio, 1985, pp. 259-297.
- [11] Sailors R. H. and Corten, H. T, "Fracture Toughness" ASTM STP 514, 1971, pp. 164-181.
- [12] "Standard methods for notched bar impact testing of metallic materials" ASTM E 23, 1984, pp. 210-233.
- [13] Shank M. E, "Symposium on Metallic Materials at Low Temperatures" ASTM STP 158, 1953, pp. 45-110.
- [14] Pellini W. S, "Symposium on Metallic Materials at Low Temperatures" ASTM STP 158, 1954, pp. 216-258.
- [15] มนัส สติธิจินดา, "วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก" วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ, 2537

