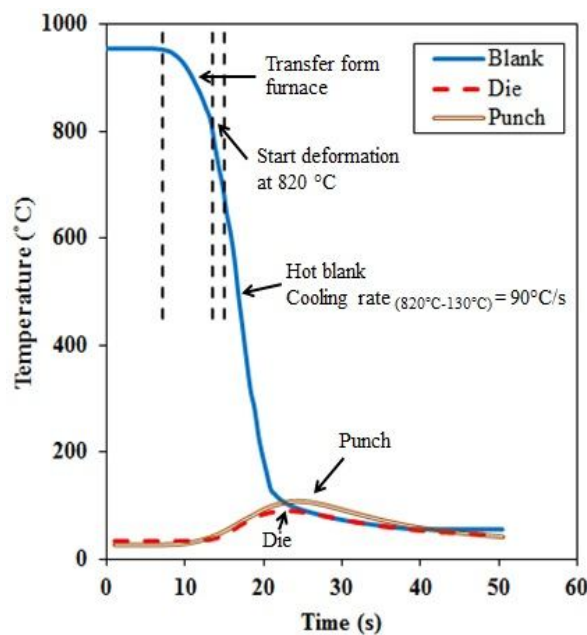


บทที่ 4 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองรวมทั้งการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยผลการทดลองการขึ้นรูปร้อน (Hot Stamping) เหล็กกล้าโบรอนสามารถแบ่งได้เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการทดสอบสมบัติทางกล

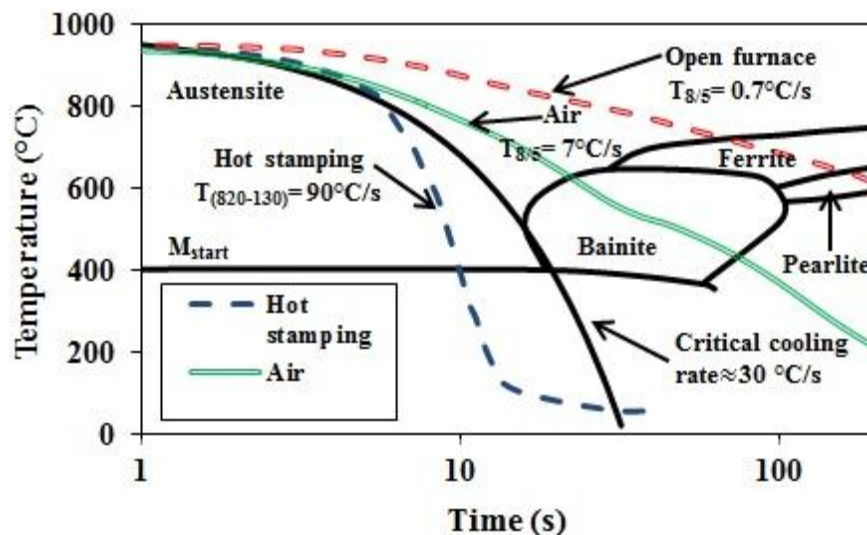
4.1 อัตราการเย็นตัวในระหว่างการขึ้นรูปร้อน

ในระหว่างการทดลองการขึ้นรูปร้อนของเหล็กกล้าโบรอนความหนา 1.4 mm ได้ทำการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานบนบริเวณชิ้นงานตามหัวข้อ 3.2.7 รูปที่ 4.1 แสดงอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูปร้อนที่วัดได้ด้วยเทอร์โมคัปเปิล จะเห็นได้ว่าชิ้นงานถูกให้ความร้อนภายในเตาจนมีอุณหภูมิประมาณ 950°C หลังจากนั้นชิ้นงานถูกจับไปวางบนแม่พิมพ์ ใช้เวลาประมาณ 6 วินาที อุณหภูมิของชิ้นงานจึงลดลงเหลือประมาณ 820°C แล้วทำการขึ้นรูป เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปที่ได้ประมาณ 1 วินาที หลังจากนั้นเครื่องไฮดรอลิก เพรสจะยังคงกดอยู่กับที่จนชิ้นงานถูกทำให้เย็นตัวลงโดยใช้เวลาประมาณ 20 วินาที อุณหภูมิของชิ้นงานลดลงหลังการขึ้นรูปจนเหลืออุณหภูมิประมาณ 130°C โดยมีอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 820°C ถึง 130°C ประมาณ 90°C/s หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปออกจากแม่พิมพ์และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศต่อไป



รูปที่ 4.1 อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูปร้อนที่วัดได้ด้วยเทอร์โมคัปเปิล

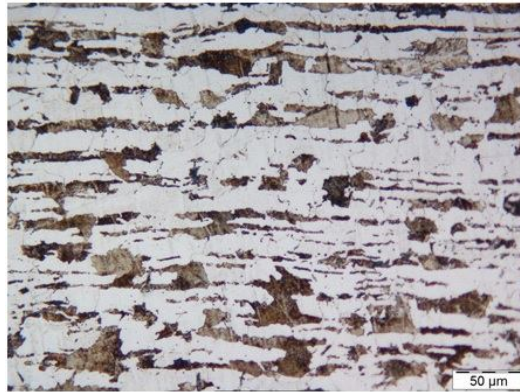
เมื่อนำอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานมาเปรียบเทียบกับ CCT diagram ของเหล็กกล้าโบรอนเกรด 22MnB5 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนควรมีโครงสร้างเป็นแบบมาร์เทนไซต์อย่างสมบูรณ์ทั้งชิ้นงาน เนื่องจากอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตหรือประมาณ 30°C/s ค่อนข้างมาก ดังนั้นชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนควรมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.2 อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในการขึ้นรูปร้อน, เย็นตัวในอากาศและเย็นตัวในเตา
เทียบกับ CCT diagram ของเหล็กกล้าโบรอนเกรด 22MnB5 [17]

สำหรับการทดลองอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในอากาศ ชิ้นงานถูกให้ความร้อนภายในเตาจนมีอุณหภูมิประมาณ 950°C ใช้เวลาประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากเตาแล้วให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ พบว่าอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในอากาศในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 800°C ถึง 500°C มีอัตราการเย็นตัวประมาณ 7°C/s จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นควรจะเป็นเบนไนต์ทั้งหมด

สำหรับการทดลองอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในเตา ชิ้นงานถูกให้ความร้อนภายในเตาจนมีอุณหภูมิประมาณ 950°C ใช้เวลาประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นปิดเตาและเปิดเตาเล็กน้อย พบว่าขณะที่การอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานภายในเตาในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 800°C ถึง 500°C มีอัตราการเย็นตัวประมาณ 0.7°C/s จะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นควรประกอบด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคเหมือนกับเหล็กดัดตัน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จะใช้เหล็กกล้าดัดตันเป็นตัวแทนเหล็กกล้าที่เย็นตัวของชิ้นงานภายในเตา เนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายคลึงกัน [53]

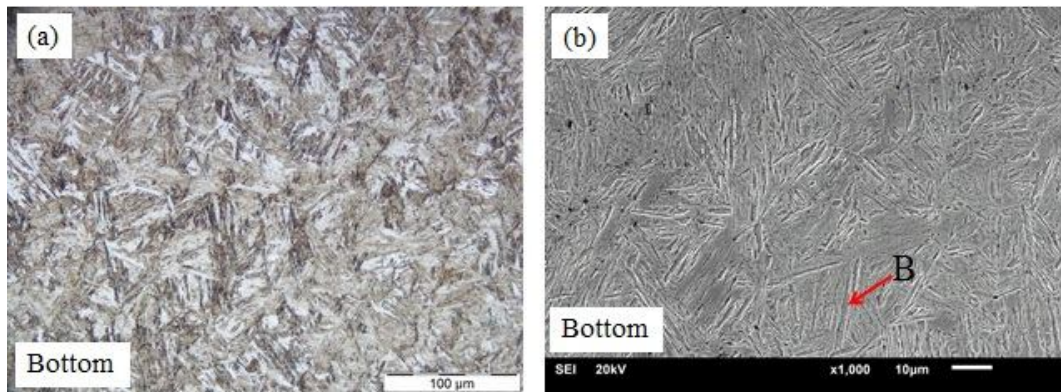


รูปที่ 4.3 โครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ของเหล็กกล้าโบรอนที่ถูกให้ความร้อนภายในเตาจนมีอุณหภูมิประมาณ 950°C ใช้เวลาประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นปิดเตาและเปิดเตาเล็กน้อย

4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

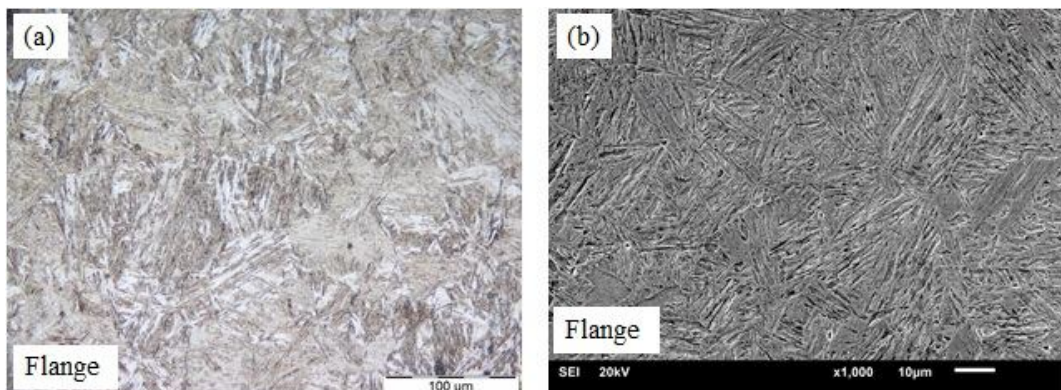
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน โดยการนำชิ้นทดสอบไปกัดผิวหน้าด้วยสารละลายกรดไนตริก (2% Nitral) เป็นเวลา 10 วินาที สำหรับการตรวจสอบ โครงสร้างจะแบ่งการตรวจสอบออกเป็น 2 บริเวณคือ ตรงกลาง (Bottom) และตรงปีก (Flange) ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน ทั้งนี้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนได้ใช้การวิเคราะห์ด้วยกล้อง 2 ชนิดด้วยกันคือกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อให้สามารถแยกชนิดและความแตกต่างของเฟสได้อย่างชัดเจน

รูปที่ 4.4 (a) แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคบริเวณตรงกลางของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างเกือบจะเป็นเฟสมาร์เทนไซต์อย่างสมบูรณ์ซึ่งเห็นได้จากว่ามีสีน้ำตาลสลับไปมาแบบไม่มีทิศทางซึ่งมีบางส่วนเป็นสีขาว แต่ทั้งนี้เมื่อถ่ายด้วยภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรูปที่ 4.4 (b) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างจะประกอบด้วยมาร์เทนไซต์เกือบทั้งหมดซึ่งมีลักษณะนูนขึ้นมาอย่างชัดเจนและมีโครงสร้างแบบเบนไนต์ปะปนอยู่เล็กน้อยตามบริเวณช่องว่างระหว่างของมาร์เทนไซต์แต่ละก้อน โดยที่เฟสเบนไนต์มีลักษณะพื้นด้านในเป็นเฟอร์ไรต์และมีซิเมนไตต์ขนาดเล็กมากกระจายอยู่ในพื้นของเฟอร์ไรต์แล้วล้อมรอบด้วยมาร์เทนไซต์ [54-57]



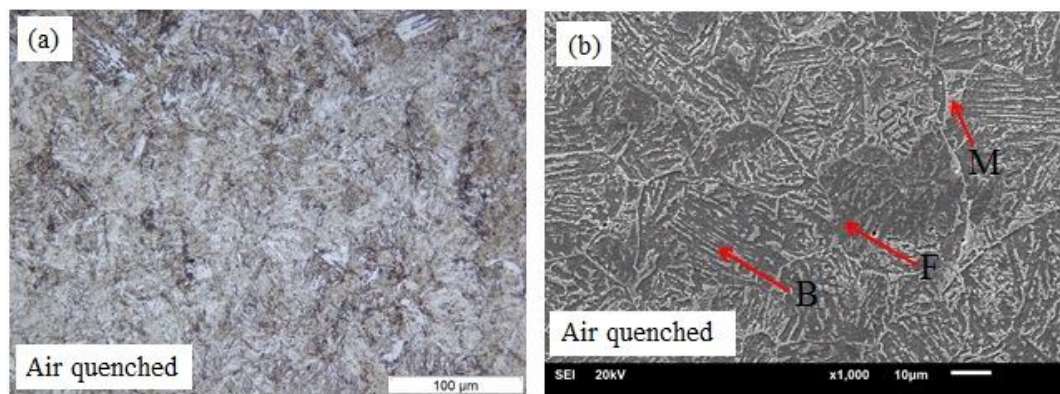
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณตรงกลาง (bottom) ของชิ้นงาน (a) ภาพถ่ายจากกล้อง OM กำลังขยาย 500 เท่า (b) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า

สำหรับโครงสร้างจุลภาคบริเวณตรงปีก (Flange) ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง แสดงดังรูปที่ 4.5 (a) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างเกือบทั้งหมดเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่ากลุ่มมาเทนไซต์มีขนาดที่แตกต่างกัน (Packets of parallel lath crystals) โดยที่บริเวณตรงกลางของชิ้นงานมีกลุ่มก้อนของมาเทนไซต์ที่มีขนาดที่ละเอียดกว่าบริเวณปีกของชิ้นงานส่งผลให้สมบัติทางกลมีความแตกต่างกัน [58-60] สำหรับรูปที่ 4.5 (b) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างประกอบไปด้วยเฟสมาร์เทนไซต์เกือบทั้งหมด และมีโครงสร้างเบนไนต์ปะปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างจุลภาคบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณตรงปีก (Flange) ของชิ้นงาน (a) ภาพถ่ายจากกล้อง OM กำลังขยาย 500 เท่า (b) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า

ในส่วนของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการเย็นตัวด้วยอากาศนั้น ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแสดงดังรูปที่ 4.6 (a) จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างจะแตกต่างกับเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้นอย่างชัดเจน (รูปที่ 3.8) โดยจะคล้ายคลึงกับโครงสร้างของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน (รูปที่ 4.3 (a) และ รูปที่ 4.4 (a)) มากกว่าแต่ในเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศจะสังเกตเห็นขอบเกรนชัดเจนมากกว่า ดังนั้นเพื่อให้สามารถแยกชนิดและความแตกต่างของเฟสได้อย่างชัดเจนมากขึ้น จึงใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ผล ดังแสดงดังรูปที่ 4.6 (b) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของเหล็กที่เย็นตัวในอากาศมีโครงสร้างที่แตกต่างกับเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน (รูปที่ 4.3 (b) และ รูปที่ 4.4 (b)) อย่างชัดเจน โครงสร้างของเหล็กกล้าผสมโบรอนที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศนั้นจะประกอบด้วยเบนไนต์เกือบทั้งหมด และมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรต์ปะปนอยู่เพียงเล็กน้อย โดยที่เฟสเฟอร์ไรต์มีลักษณะเป็นพื้นเรียบสีดำและมีเฟสเบนไนต์เป็นเข็มเล็กๆกระจายอยู่บนเฟสเฟอร์ไรต์ สำหรับกลุ่มก้อนมาร์เทนไซต์มีลักษณะนูนขึ้นปะปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับแผนภาพ CCT diagram และอัตราการเย็นตัวในอากาศของเหล็กกล้าโบรอนดังแสดงในรูปที่ 4.2



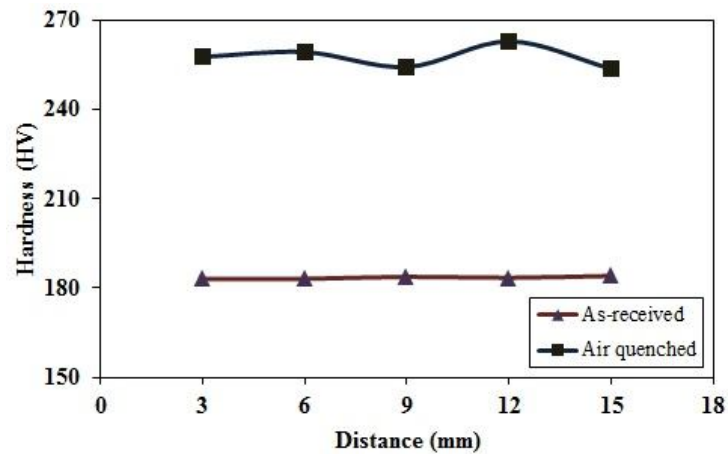
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ (a) ภาพถ่ายจากกล้อง OM กำลังขยาย 500 เท่า (b) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM กำลังขยาย 1000 เท่า

4.3 ผลการทดสอบความแข็งจุลภาค

สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าโบรอนได้ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Micro-Hardness Testing ด้วยหัวกดแบบวิกเกอร์ (Vickers) ในการทดสอบความแข็งได้ทำการกดให้รอยกดห่างกัน 3 มิลลิเมตรตลอดทั้งชิ้นงานด้วยแรงกด 1,000 กรัม

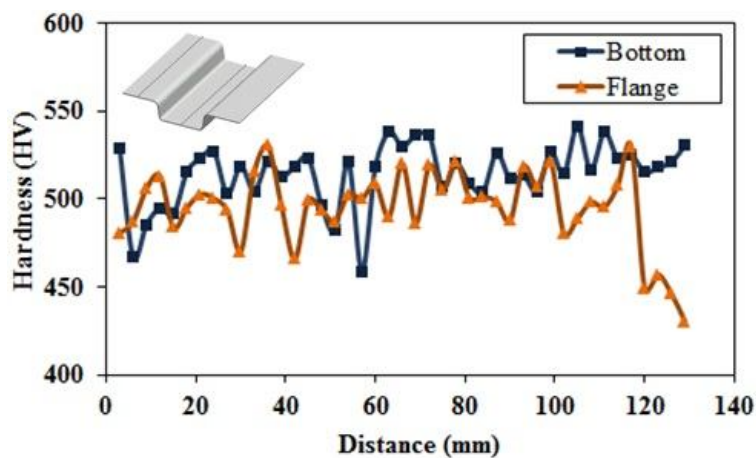
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งจุลภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าตั้งต้นเปรียบเทียบกับชิ้นงานเหล็กกล้าที่เย็นตัวในอากาศ พบว่าเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้นซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์มีความแข็งอยู่ประมาณ 183 HV เมื่อเหล็กกล้าโบรอนผ่านการให้ความร้อนและเย็นตัวในอากาศ พบว่ามี

ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเป็นประมาณ 257 HV เนื่องจากโครงสร้างของเหล็กกล้าที่เย็นตัวในอากาศมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นเบนไนต์เกือบทั้งหมด



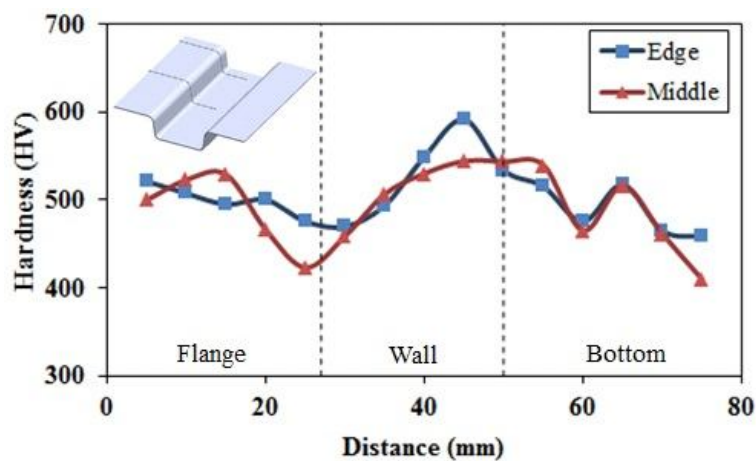
รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งจุดภาคของเหล็กกล้าโปรอนตั้งต้นและเหล็กกล้าที่เย็นตัวในอากาศ

รูปที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งจุดภาคของชิ้นงานเหล็กกล้าโปรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนเปรียบเทียบกัน 2 บริเวณตามแนวยาวของชิ้นงานระหว่าง Bottom และ Flange เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ทั้งชิ้นงานทำให้ความแข็งของชิ้นงานมีความแข็งในแต่ละบริเวณส่วนใหญ่สูงกว่า 470 HV โดยความแข็งบริเวณ Bottom จะมีความแข็งเฉลี่ยประมาณ 514 HV ซึ่งสูงกว่าบริเวณ Flange ที่มีความแข็งเฉลี่ยประมาณ 495 HV เนื่องจากโครงสร้างมาร์เทนไซต์บริเวณ Bottom มีโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ละเอียดกว่าบริเวณ Flange [58-60] ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ถึงแม้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนจะมีเฟสมาร์เทนไซต์อย่างสมบูรณ์ แต่จะมีเฟสเบนไนต์ปะปนอยู่เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ส่งผลให้มีการแกว่งตัวของค่าความแข็งตลอดแนวของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน



รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งตามแนวยาวของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณ Bottom และ Flange

สำหรับการทดสอบความแข็งตามแนวขวางของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปร้อน ได้ทำการทดสอบวัดความแข็งโดยทำการกดให้รอยกดห่างกัน 5 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดที่สมมาตรดังนั้นจึงทดสอบความแข็งเพียงครึ่งเดียวของชิ้นงาน ผลการทดสอบความแข็งแสดงดังรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าความแข็งของชิ้นงานตามแนวขวางมีความแข็งมากกว่า 470 HV แต่เมื่อสังเกตบริเวณ Flange (ระยะตามแนวขวาง 0-30 mm) ของทั้งแนว Edge และ Middle พบว่าจะมีความแข็งบริเวณ Flange น้อยกว่าบริเวณ Bottom (ระยะตามแนวขวาง 50-75 mm) และเมื่อพิจารณาแนว Edge เทียบกับ Middle จะเห็นการแกว่งตัวของค่าความแข็ง เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณ Wall (ระยะตามแนวขวาง 30-50 mm) ชิ้นงานที่ขึ้นรูปร้อนอาจไม่สัมผัสกับแม่พิมพ์ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนไม่สม่ำเสมอทำให้ค่าความแข็งบริเวณ Middle ต่ำกว่าบริเวณ Edge



รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งตามแนวขวางของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณ Edge และ Middle

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอัตราการเย็นตัว

เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 อ้างอิงจากแผนภาพ Continuous Cooling Transformation (CCT) แสดงดังรูปที่ 4.10 (a) โดยใช้แนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียลชนิด 3 ตัวแปรเพื่อทำนายผลต่อเนื่องจะได้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับอัตราการเย็นตัว (cooling rate) แสดงสมการที่ 4.1

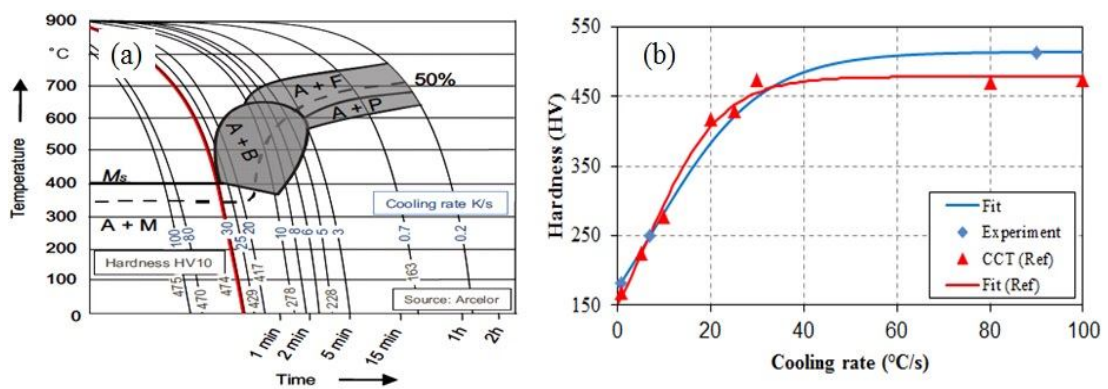
$$HV = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)}} \quad \text{Eq. 4.1}$$

เมื่อ

HV คือค่าความแข็ง

x คืออัตราการเย็นตัว (Cooling rate)

ซึ่งพบว่าการทำนายผลของความแข็งของเหล็กกล้าที่เย็นตัวในอัตราการเย็นตัวต่างๆ จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลอ้างอิง (รูปที่ 4.9 (a)) แสดงดังรูปที่ 4.10 (b) จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการเย็นตัวอยู่ในช่วง 0.2°C/s - 3°C/s มีความแข็งอยู่ระหว่าง 160-180 HV แต่เมื่ออัตราการเย็นตัวสูงขึ้นจาก 3°C/s - 30°C/s ความแข็งของเหล็กจะเพิ่มสูงขึ้นเป็น 220 HV – 430 HV เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้านั้นมีเฟสเบนไนต์มากขึ้นจึงส่งผลให้ความแข็งของเหล็กกล้าเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่ออัตราการเย็นตัวมากกว่า 30°C/s ขึ้นไป ความแข็งของเหล็กกล้าที่ได้จะอยู่ประมาณ 470-475 HV โดยจะสังเกตเห็นว่าความแข็งจะไม่เพิ่มสูงขึ้นอีก เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์อย่างสมบูรณ์แล้ว

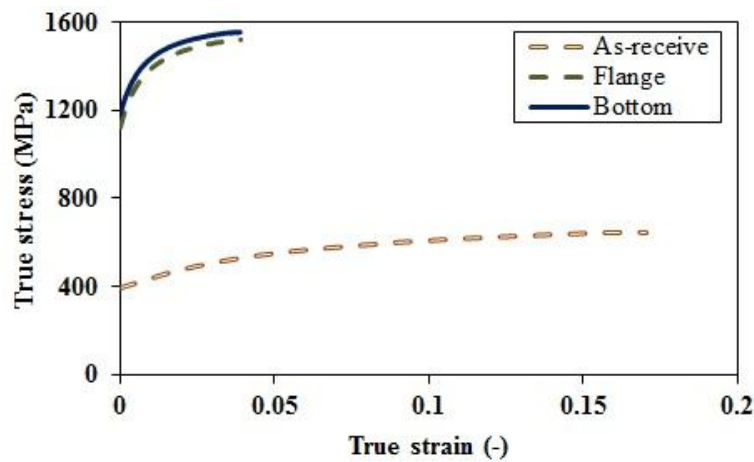


รูปที่ 4.10 (a) แผนภาพ Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagram ของเหล็กกล้าโบรอนเกรด 22MnB5 [17] (b) แนวโน้มของค่าความแข็งที่ได้ของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านอัตราการเย็นตัวต่างๆ เทียบระหว่างผลการทำนายและข้อมูลอ้างอิง

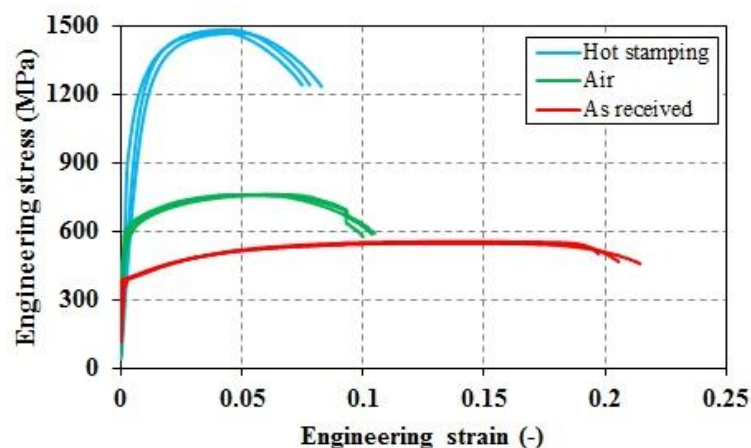
4.4 ผลการทดสอบแรงดึง

การทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงดึงของเหล็กกล้าผสมโบรอนตั้งต้น ปรากฏว่าค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) มีค่าประมาณ 550 MPa และค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield strength) ประมาณ 390 MPa และความสามารถของวัสดุที่ยืดออกได้โดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย (Elongation) ประมาณ 18 % สำหรับความสามารถในการต้านทานแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณพื้นที่ตรงกลาง (Bottom) พบว่าค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดของเหล็กกล้าโบรอนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 1470 MPa และได้ค่าความเค้น ณ จุดครากที่ประมาณ 1110 MPa นอกจากนั้นยังพบว่าบริเวณตรงกลาง (Bottom) ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าบริเวณบริเวณปีก (Flange) ประมาณ 60 MPa ดังแสดงในรูปกราฟความเค้นความเครียดของตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานหลังการขึ้นรูปร้อนดังรูปที่ 4.11 โดยที่ค่าความแข็งแรงที่ได้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการวาง

ท่อหล่อเย็นของแม่พิมพ์ [1] เนื่องจากบริเวณ Bottom ใกล้กับบริเวณที่มีการวางท่อหล่อเย็นทำให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานในบริเวณดังกล่าวสูงกว่าอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานบริเวณ Flange



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดจริงของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน ณ บริเวณ Bottom และ Flange ของชิ้นงานเทียบกับเหล็กตั้งต้น



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดทางวิศวกรรมของเหล็กกล้าโบรอน ที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน เทียบกับเหล็กกล้าที่เย็นตัวในอากาศ และเหล็กกล้าตั้งต้น

จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดทางวิศวกรรมที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศ พบว่าค่าการต้านทานแรงดึงสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 630 MPa และค่าความเค้น ณ จุดครากอยู่ที่ประมาณ 760 MPa แสดงดังรูปที่ 4.12 และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกลดังกล่าวนี้กับเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้นแล้ว พบว่าเหล็กกล้าที่เย็นตัวในอากาศให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดครากที่สูงกว่า แต่ค่าการยืดตัวลดต่ำลง เนื่องจากเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศมีโครงสร้างแบบเบนไนต์เกือบทั้งหมด และมีโครงสร้างมาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรท์ปะปนเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเทียบเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศกับ

เหล็กกล้าโบราณที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเค้น ณ จุดครากน้อยกว่า เหล็กกล้าโบราณที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน ทั้งนี้สำหรับสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโบราณตั้งต้น เหล็กกล้าโบราณที่ผ่านการเย็นตัวในอากาศและเหล็กกล้าโบราณที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนได้ถูกสรุปและแสดงในตารางที่ 4.1 เนื่องจากค่าสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการเปลี่ยนเฟสของเหล็กกล้า เกิดจากการเปลี่ยนเฟสจากออสเทนไนต์เป็นเฟสมาร์เทนไซต์ อัตราการเย็นตัวที่เร็วทำให้คาร์บอนอะตอมแพร่ออกจากโครงสร้างเหล็กไม่ทัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจาก FCC ไปเป็น BCC ไม่ทันจึงได้โครงสร้าง BCT แทน ซึ่งการแทรกของอะตอมคาร์บอนใน lattice ทำให้ lattice เกิดการบิดเบี้ยว โดยอะตอมที่แทรกตัวอยู่นี้จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ถ้ามีความหนาแน่นของดิสโลเคชันมากจะส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงขึ้นและมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามหากโครงสร้างมีปริมาณมาร์เทนไซต์ที่เป็นเฟสที่แข็งอยู่เป็นจำนวนมากจะส่งผลให้ค่าการยืดตัวลดต่ำลงเช่นเดียวกัน [31]

ตารางที่ 4.1 ตารางสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโบราณตั้งต้น เย็นตัวในอากาศและที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	%Elongation (-)	Tensile strength* Elongation
As-received	390	550	20	11,000
Air	620	760	10	7,600
Hot stamping	1110	1470	8	11,760

จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) สามารถจำลองพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดได้ด้วยสมการของแข็งของวัสดุ อาทิเช่น กฎยกกำลัง (Hardening Law) ของ Hollomon [61] กฎของลูดวิก (Ludwik's Law) [62] กฎของสวิฟท์ (Swift Law) [63] หรือกฎของว็อยซ์ (Voce Law) [64] เป็นต้น สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดตามกฎยกกำลังของ Hollomon อธิบายด้วยสมการ 4.2 ซึ่งเหมาะสำหรับใช้จำลองพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุหลายๆชนิด

$$\sigma = K \varepsilon_p^n \quad \text{Eq. 4.2}$$

เมื่อ

σ คือความเค้นจริง (True stress)

ε คือความเครียดจริง (True strain)

K คือค่าคงที่วัสดุ (Strength coefficient)

n คือเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain hardening exponent)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดตามกฎของ Ludwik อธิบายด้วยสมการ 4.3 โดยที่สมการของ Ludwik นั้นมีความแตกต่างกับสมการของ Hollomon คือ มีการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield strength) เพิ่มเข้ามาในสมการการจำลองพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด

$$\sigma = \sigma_y + h\varepsilon_p^m \quad \text{Eq. 4.3}$$

เมื่อ

σ คือความเค้นจริง (True stress)

σ_y คือค่าคงที่ความเค้น ณ จุดคราก (Yield strength)

ε คือความเครียดจริง (True strain)

h คือค่าคงที่

m คือค่าคงที่

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดตามกฎของ Swift อธิบายด้วยสมการ 4.4 โดยที่สมการของ Swift นั้นมีความแตกต่างกับสมการของ Hollomon คือ มีการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า offset strain เพิ่มเข้ามาในสมการการจำลองพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad \text{Eq. 4.4}$$

เมื่อ

σ คือความเค้นจริง (True stress)

ε คือความเครียดจริง (True strain)

ε_0 คือค่าความเครียดเท่ากับ 0.002

K คือค่าคงที่วัสดุ (Hardening coefficient)

n คือเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain hardening exponent)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดตามกฎของ Voce อธิบายด้วยสมการ 4.5 โดยที่สมการของ Voce มีความแตกต่างจากสมการที่กล่าวมาเบื้องต้น โดยใช้สมการแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีการพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield strength) และค่าความเค้นสูงสุด (Saturation stress) จะเหมาะสำหรับการจำลองพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดกับวัสดุที่มีการยืดตัวได้ดี (strain สูง) เช่น อลูมิเนียม เป็นต้น

$$\sigma = B - (B - A)\exp(-c\varepsilon_p) \quad \text{Eq. 4.5}$$

เมื่อ

σ คือความเค้นจริง (True stress)

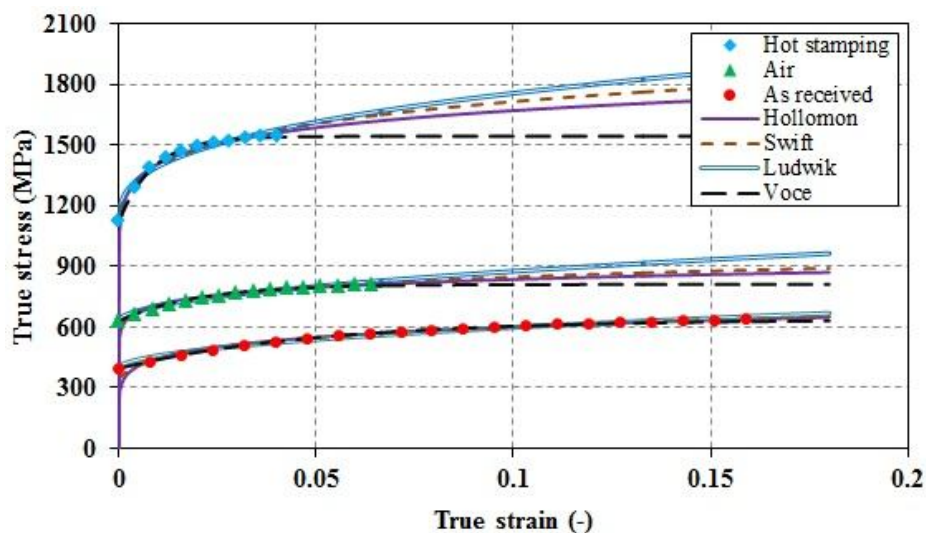
ε คือความเครียดจริง (True strain)

A คือ ค่าคงที่ความเค้น ณ จุดคราก (Constant, yield stress)

B คือ ค่าคงที่ความเค้นสูงสุด (Constant, saturation stress)

c คือ ค่าคงที่

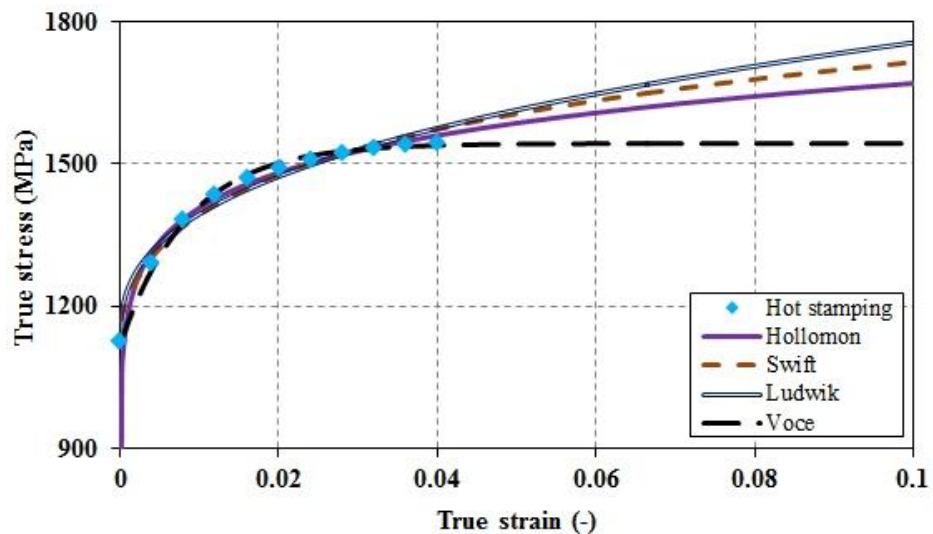
สมการ 4.2-4.5 สามารถใช้จำลองพฤติกรรมความเค้นความเครียดของเหล็กกล้าโบรอนได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เมื่อพิจารณาการทำนายความสัมพันธ์ความเค้นความเครียดที่ใช้สมการ 4.2-4.5 ของเหล็กกล้าโบรอนตั้งต้นพบว่า สมการดังกล่าวสามารถให้ค่าความแม่นยำในระดับใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาในกรณีของเหล็กกล้าโบรอนที่เย็นตัวในอากาศ พบว่าสำหรับสมการของ Ludwik เมื่อความเครียดจริงเพิ่มสูงขึ้นค่าความเค้นจริงที่ทำนายได้จะเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าสมการอื่นๆ แต่สมการของ Hollomon, Swift และ Voce ยังให้ความแม่นยำใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับผลการทดลอง โดยที่สมการของ Swift ค่าความเครียดจริงสูงกว่าสมการของ Hollomon เพียงเล็กน้อย แต่สมการของ Voce จะให้ค่าความแข็งแรงดิ่งที่คงที่เมื่อการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดที่ทำนายด้วย Hollomon, Swift, Ludwik และ Voce ของเหล็กกล้าตั้งต้น เหล็กกล้าที่เย็นตัวในอากาศและเหล็กกล้าหลังผ่านการขึ้นรูปร้อน

เมื่อพิจารณาการทำนายความสัมพันธ์ความเค้นความเครียด ของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าสมการการจำลองพฤติกรรมความเค้นความเครียดของ Voce เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสมการของ Hollomon, Ludwik และ Swift จะให้ค่าความแข็งแรงดิ่งที่สูงมากเมื่อเทียบกับการทดลองเมื่อการยืดตัวเพิ่มสูงขึ้น จึงไม่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมความเค้นความเครียดของเหล็กกล้าโบรอนที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน และสมการของ Voce มีพารามิเตอร์ของค่าคงที่ความเค้น ณ จุดคราก (yield stress) และค่าคงที่ความเค้นสูงสุด (Saturation stress) โดยที่พารามิเตอร์ของ Voce ที่หา

ได้จะนำไปใช้ทำนายสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สมการของ Voce ในการทำนายพฤติกรรมสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นความเครียดที่ทำนายด้วย Hollomon, Swift, Ludwik และ Voce ของเหล็กกล้าโปรอนหลังผ่านการขึ้นรูปร้อน

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับอัตราการเย็นตัวต่างๆ ของเหล็กกล้าโปรอน และพารามิเตอร์จากสมการของ Voce (A , B และ c) จากค่าต่างๆในตารางที่ 4.2 สามารถใช้หาความสัมพันธ์ของค่าความแข็ง (HV) พารามิเตอร์ของ Voce (A , B และ c) ได้ด้วยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear equation) และสมการพหุนาม (Polynomial equations) แสดงดังสมการที่ 4.6-4.8

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของ Voce โมเดลที่ใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมสมบัติทางกลของเหล็กกล้าโปรอนและค่าความแข็ง (HV) ที่อัตราการเย็นตัวที่ต่างกันตามรูปที่ 4.13

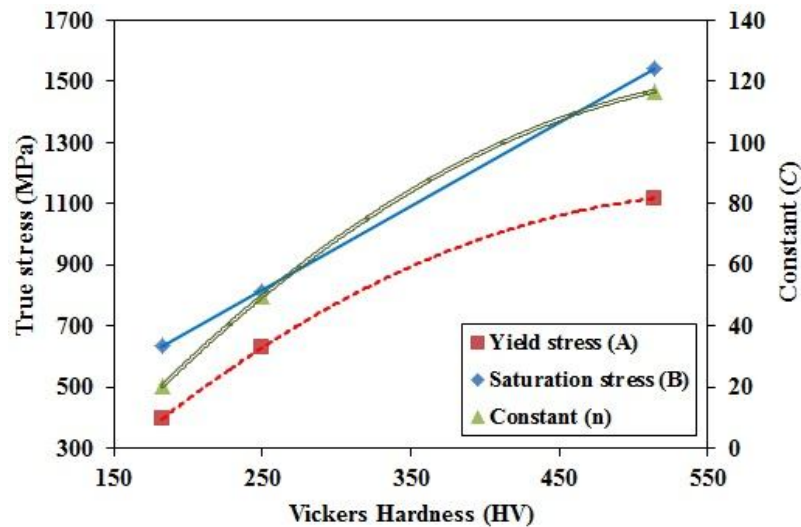
Cooling rate	Vickers hardness	A , yield stress	B , saturation stress	c , constant
0.7	182	394.7	636.2	20.1
7	250	629.6	810.5	49.8
90	514	1117.6	1542.8	116.8

$$A(HV) = A_1 HV^2 + A_2 HV + A_3 \quad \text{Eq. 4.6}$$

$$B(HV) = B_1 HV + B_2 \quad \text{Eq. 4.7}$$

$$c(HV) = c_1 HV^2 + c_2 HV + c_3 \quad \text{Eq. 4.8}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง (HV) ของชิ้นงานเหล็กกล้าโบรอนที่มีอัตราการเย็นตัวต่างๆและพารามิเตอร์ของ Voce โมเดล (A , B และ c) ตามสมการที่ 4.5 สามารถแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยที่ค่าคงที่ของพารามิเตอร์ของสมการ 4.6-4.8 แสดงไว้ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.15 พารามิเตอร์ของ Voce โมเดลที่อยู่ในฟังก์ชันของค่าความแข็ง

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของพารามิเตอร์จากสมการที่ 4.6-4.8

$A(\text{HV})$	$A_1 = -0.0048$	$A_2 = 5.441$	$A_3 = -454.09$
$B(\text{HV})$	$B_1 = 2.743$	$B_2 = 131.56$	
$c(\text{HV})$	$c_1 = -0.0006$	$c_2 = 0.6752$	$c_3 = -84.514$

เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปรีดร้อนนั้น อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานจะไม่คงที่เนื่องจากแต่ละขั้นตอนการขึ้นรูปรีดร้อนนั้นอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานจะไม่เท่ากัน เช่น ขั้นตอนการนำชิ้นงานออกจากเตาไปวางไว้บนแม่พิมพ์ ขั้นตอนนี้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานจะไม่สูงมาก แต่ในขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานและขั้นตอนการเย็นของชิ้นงานในแม่พิมพ์จะมีอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานที่สูงมากเป็นต้น โดยความแข็งของเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและพารามิเตอร์ของ Voce โมเดลที่หาได้เพื่อทำนายสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปรีดร้อนที่ตำแหน่งต่างๆโดยอาศัยข้อมูลหรือผลคำนวณด้วยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์