

ผลกระทบของระยะเวลาการอบอ่อนหลังกระบวนการที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล
ของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP980

Effect of Process Annealing Time on The Microstructure and Mechanical Properties of High
Strength Dual Phase Steel DP980

ณัฐศักดิ์ พรพุดศิริ^{1*}, พงศกร หลีตระกูล¹, พิสิทธิ์ เมืองน้อย¹, จินกมล ลุยจันทร์¹, และ พลากร ประคำทอง¹

Natthasak Pornputsiri*, Pongsakorn Leetrakul, Phisit Muangnoi, Jinkamon Luijan, and
Phalakorn Prakhomthong

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ตำบลหนองแก
อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

¹Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Nhong Kea, Hua Hin, Prachubkirkhan, Thailand

*Corresponding author. Tel.: 086-6676802 E-mail: natthasak.por@rmutr.ac.th

Received: 12-03-2025 Revised: 31-07-2025 Accepted: 19-08-2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลจากผลการอบอ่อนหลังกระบวนการที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน 4 ระดับคือ 5 นาที 30 นาที 60 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เฟสแข็งชนิดมาร์เทนไซต์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องด้วยการเปลี่ยนรูปไปเป็นโครงสร้างฟีนเฟอร์ไรท์ อีกทั้งปริมาณธาตุคาร์บอนในเฟสมาร์เทนไซต์ก็จะมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ดังนั้นเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลา 5-60 นาที ค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของชิ้นทดสอบจึงมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่อัตราการยืดตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเป็น 180 นาที อัตราส่วนของเฟสมาร์เทนไซต์จะลดลงอย่างชัดเจน มีพฤติกรรมการเติบโตของเฟสเกิดขึ้นและมีการตกตะกอนของคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนของเฟสมาร์เทนไซต์ที่เพิ่มมากขึ้นรวมทั้งมีผลึกใหม่เกิดขึ้นบางส่วน จึงส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นทดสอบ ซึ่งพบว่าที่ระยะเวลาการอบอ่อน 180 นาที จะได้สมบัติทางกลโดยรวมที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าความเค้นครากที่ 853.97 N/mm² ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดที่ 929.37 N/mm² การยืดตัวสม่ำเสมอที่ร้อยละ 13.37 และการยืดตัวโดยรวมที่ร้อยละ 17.25

คำสำคัญ การอบอ่อนหลังกระบวนการ ระยะเวลาการอบอ่อน โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ABSTRACT

The aim of this research was to study the microstructural evolution and mechanical properties of DP980 high-strength steel sheets subjected to process annealing at 600 °C, with holding times of 5, 30, 60, and 180 minutes. The results show that increasing the annealing holding time leads to a continuous decrease in the martensite phase, which gradually transforms into a ferrite matrix, accompanied by a reduction in the carbon content within the martensite. As the annealing holding time increases from 5 to 60 minutes, the yield stress and tensile strength of the sample gradually decrease, while both uniform elongation and total elongation tend to increase continuously. When the annealing time exceeds 180 minutes, the proportion of the martensite phase gradually decreases, grain growth occurs, and there is increased precipitation of carbides at the grain boundaries of the martensite phase, accompanied by some recrystallization. Excellent overall mechanical properties were achieved at an annealing time of 180 minutes. The yield stress was 853.97 N/mm², the tensile strength was 929.37 N/mm², the uniform elongation was 13.37%, and the total elongation was 17.25%

Keyword: Process annealing, Annealing time, Microstructure, Mechanical property, High strength steel.

1. บทนำ

ด้วยการพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมยานยนต์ โลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเฟสคู่ชนิดรีดเย็นเกรดต่างๆ จำนวนมากถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วน โครงสร้าง ชิ้นส่วนเสริมแรง และชิ้นส่วนป้องกันการชน เช่น คานเสา และตัวถังของรถยนต์ เป็นต้น โดยให้ความสำคัญและมุ่งเน้นให้รถยนต์มีน้ำหนักที่เบาลง เพื่อการประหยัดพลังงาน และปกป้องสิ่งแวดล้อม รวมถึงเพิ่มความปลอดภัยจากการชนกระแทก [1] เหล็กกล้าชนิดเฟสคู่ (DP) มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ซึ่งมีสมบัติอ่อนเหนียวและเฟสมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งแรงสูง ส่งผลให้สมบัติทางกลของเหล็กกล้าชนิดนี้มีความสมดุลย์ที่ดีระหว่างความแข็งแรงและความเหนียว [2] ทั้งนี้หากเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงทั่วไปชนิดอื่นๆ จะพบว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่จะมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างบางประการซึ่งเป็นผลดีต่อการขึ้นรูป เช่น มีอัตราความเครียดเชิงสูง มีอัตราส่วนการครากตัวต่ำ (อัตราส่วนระหว่างความเค้นครากและความแข็งแรงดึง) และความต่อเนื่องในการครากตัวหรือการเปลี่ยนรูปถาวร [3] เพื่ออธิบายเหตุผลของคุณสมบัติทางกลที่เหนือกว่าในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลมีหลายประการ เช่น ขนาดเกรน [4-5] อัตราส่วนระหว่างความเครียดในเฟสมาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรต์ [6] อัตราส่วนพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์ [7] และลักษณะขององค์ประกอบเฟสภายในโครงสร้างจุลภาค [8] อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่าความแข็งแรงในเฟสมาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรต์ ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าชนิดเฟสคู่เช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อสมบัติทางกลเพิ่มสูงขึ้น มักจะส่งผลโดยตรงทำให้ค่าความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุลดลง และสำหรับผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ค่าความแข็งแรงของวัสดุที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ยากต่อการขึ้นรูป ส่งผลต่ออัตราการสึกหรอของแม่พิมพ์และค่าการติดตัวกลับของวัสดุขึ้นงานหลังการขึ้นรูปเพิ่มมากขึ้น [9]

การปรับปรุงค่าความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าเฟสคู่ชนิดรีดเย็นให้ดียิ่งขึ้น สามารถดำเนินการได้ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น การปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมี กระบวนการผลิต และโครงสร้างจุลภาคเป็นต้น [10] การรีดเย็นเป็นกระบวนการขึ้นรูปวัสดุที่อุณหภูมิปกติโดยใช้แรงกดของลูกรีดเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยหลังการขึ้นรูปจะส่งผลให้วัสดุมีค่าความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้กระบวนการรีดเย็นจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติของทางกลของโลหะและโลหะผสมอย่างเห็นได้ชัด โดยการขึ้นรูปในลักษณะนี้จะไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกใหม่แต่จะทำให้ค่าความหนาแน่นและการเคลื่อนตัวของภายในโครงสร้างจุลภาคของโลหะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อสมบัติทางกลของโลหะ โดยจะทำให้สมบัติด้านความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นส่วนสมบัติด้านความสามารถในการเปลี่ยนรูปถาวรจะมีแนวโน้มลดลง [11] ทั้งนี้การรีดเย็นเป็นรูปแบบหนึ่งของการขึ้นรูปเย็นสำหรับวัสดุประเภทโลหะและโลหะผสม ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่า

ความหนาแน่นของการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นได้หลายเท่า การเคลื่อนตัวของผลึก (Dislocations) เกิดจากจุดบกพร่อง (Defects) ภายในโครงสร้างจุลภาค จากผลกระทบของแรงกระทำหรือค่าความเค้นจากการขึ้นรูป ค่าความหนาแน่นของการเคลื่อนตัวที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการสะสมของค่าความเค้นภายใน (Internal stresses) ของวัสดุ [12] ซึ่งจะส่งผลโดยตรงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและความเค้นครากเพิ่มมากขึ้น ส่วนความสามารถในการยึดตัวจะมีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงของเกรนโครงสร้างจุลภาคจะเกิดในลักษณะของการยึดตัวไปในทิศทางของการรีด ทั้งนี้การนำวัสดุไปผ่านกระบวนการทางความร้อนซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ จะช่วยบรรเทาการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้ โดยเรียกกระบวนการดังกล่าวนี้ว่า การอบอ่อนหลังกระบวนการ [13]

การอบอ่อนหลังกระบวนการ (Process annealing) คือ กระบวนการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Subcritical annealing) เป็นวิธีพื้นฐานของกระบวนการทางความร้อนซึ่งเป็นลักษณะของการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ของวัสดุประเภทเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็นซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยจะควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตหรือเส้น Ac_1 เล็กน้อย [14] ด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม ก่อนจะค่อยๆ ปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของวัสดุหลังกระบวนการขึ้นรูปเย็น โดยทั่วไประหว่างกระบวนการอบอ่อนจะมีพฤติกรรมภายในโครงสร้างจุลภาคแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนซึ่งประกอบด้วย การคืนรูป (Recovery) การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และการเติบโตของเกรน (Grain growth) ในขั้นตอนการคืนรูปของกระบวนการอบอ่อนจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งขั้นตอนนี้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลจะมีแนวโน้มที่จะฟื้นตัวโดยสมบัติเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เป็นลักษณะค่อยเป็นค่อยไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยโครงสร้างจุลภาคจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในกรณีนี้การคืนรูปเป็นลักษณะของการกำจัดเคลื่อนตัวที่มากเกินไป การกำจัดดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้จากการรวมตัวของส่วนที่เคลื่อนตัวให้มีทิศทางที่ตรงข้ามกัน ในขั้นตอนนี้ความต้านทานภายในจะกลับคืนมาเกือบสมบูรณ์ ก่อนถึงสถานะการเกิดผลึกใหม่ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงจะเกิดขึ้นเล็กน้อยแบบค่อยเป็นค่อยไปจึงต้องใช้ความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นซึ่งจะเรียกว่าการเกิดผลึกใหม่ของโครงสร้างพื้น [1,3,4] เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดเกรนใหม่ซึ่งปราศจากความเครียด ส่วนเกรนเก่าที่เสียรูปจะเกิดการแตกตัวและเติบโตขึ้น โดยพฤติกรรมเหล่านี้จะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีพลังงานสูง เช่น บริเวณขอบเกรนและส่วนที่มีความหนาแน่นของการเคลื่อนตัวสูง เกรนใหม่เหล่านี้เกิดขึ้นเพื่อทดแทนเกรนเก่าที่เสียรูปซึ่งก่อให้เกิดความเครียดเชิง เป็นการส่งเสริมพฤติกรรมการเกิดผลึกใหม่จากผลของพลังงานซึ่งได้จากการขึ้นรูปแบบเย็น ทั้งนี้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการตกผลึกใหม่ของวัสดุจะประกอบไปด้วย องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค ธาตุโลหะผสม ความบริสุทธิ์ อัตราการขึ้นรูปแบบเย็น และรูปแบบการอบอ่อน

[14] เมื่อการเกิดผลึกใหม่เสร็จสมบูรณ์ ขั้นตอนที่สามของกระบวนการอบอ่อนก็จะเริ่มต้นขึ้นคือ เมื่อการเกิดผลึกใหม่เสร็จสิ้นจะส่งผลต่อเนื่องให้เกิดการเติบโตของเกรนซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานบนพื้นผิว เมื่อการขยายตัวในเชิงขนาดที่เพิ่มขึ้นและจำนวนของเกรนที่ลดลงจึงส่งผลให้พื้นที่ของขอบเกรนลดลงและพลังงานพื้นผิวทั้งหมดจะลดลงตามไปด้วย ในขั้นตอนนี้สมบัติทางกลจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเนื่องจากพลังงานที่เก็บไว้ทั้งหมดได้ถูกปลดปล่อยออกไปก่อนแล้ว [4]

โดยบทความนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ DP980 ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของเฟสมาร์เทนไซต์และโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ภายในโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดค่าความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่นดังกล่าว โดยการกำหนดอุณหภูมิการอบอ่อนที่ 600 °C ด้วยระยะเวลา 4 ระดับคือ 5 นาที 30 นาที 60 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้ภายหลังจากดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผล จะสามารถอธิบายถึงผลการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคภายใต้ผลกระทบของระยะเวลาในการอบอ่อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล และเพื่อกำหนดระยะเวลาในการอบอ่อนที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของโลหะแผ่น ซึ่งมีความสำคัญต่อการนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนอุตสาหกรรม โดยจะทำการเก็บข้อมูลเพื่อการประเมินผลและวิเคราะห์ผลจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึง เพื่อนำผลที่ได้จากการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นอุตสาหกรรมและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในทางปฏิบัติต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับเงื่อนไขของระยะเวลาการอบอ่อนหลังกระบวนการของวัสดุโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ DP980 ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร โดยการตรวจสอบสมบัติทางกลจะดำเนินการโดยการทดสอบแรงดึงซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 1 และองค์ประกอบทางเคมีจะดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (Optical Emission Spectrometer-OES) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น UH1450 ซึ่งผลการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 2

2.2 การทดสอบแรงดึง

นำชิ้นทดสอบโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง DP980 ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนไปทำการตรวจสอบสมบัติทางกล ด้วยวิธีการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 [15] ซึ่งใช้สำหรับการทดสอบแรงดึงโลหะแผ่นบาง ทำการตัดเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐานดังรายละเอียดภาพที่ 1 โดยผลการทดสอบจะแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียด ซึ่งระบุสมบัติทางกลที่สำคัญประกอบด้วย ค่าความเค้นคราก (Yield strength), ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate

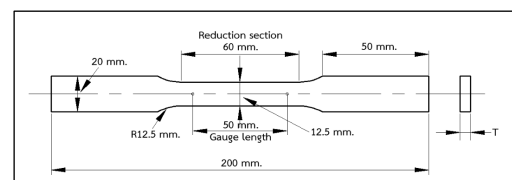
tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform Elongation) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวโดยรวม (Total elongation)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง DP980

วัสดุ	สมบัติทางกล			
	Ys (N/mm ²)	UTS (N/mm ²)	UE (%)	TE (%)
DP980	764.44	996.98	11.89	15.02

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP980 (Wt%)

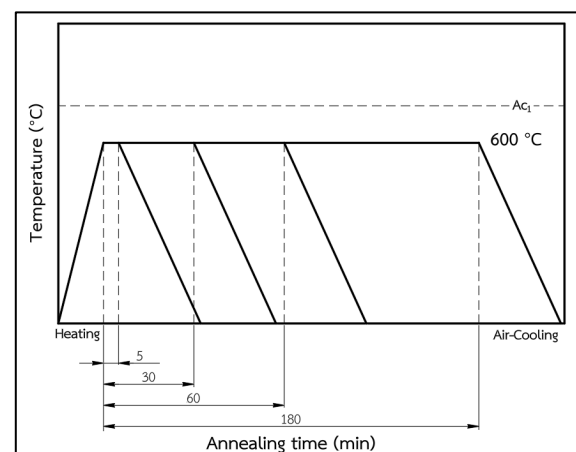
C	Mn	Si	P	Cr	Fe
0.1766	1.823	1.4262	0.0190	0.0306	Bal.



ภาพที่ 1 ชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 ที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง [15]

2.3 เงื่อนไขการอบอ่อนหลังกระบวนการ

นำโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ซึ่งถูกตัดเตรียมเป็นชิ้นทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ไปอบให้ความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้าด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 10 °C/sec จนถึงอุณหภูมิ 600 °C และคงอุณหภูมิดังกล่าวไว้ภายในเตาด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 5 นาที 30 นาที 60 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ จากนั้นจะปล่อยให้เย็นตัวภายในเตาจนถึงอุณหภูมิห้องด้วยอัตราการการลดลงของอุณหภูมิที่ 5 °C/sec ทั้งนี้แผนภาพการควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาอบอ่อนสำหรับการทดลองนี้แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพการอบอ่อนหลังกระบวนการของชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน

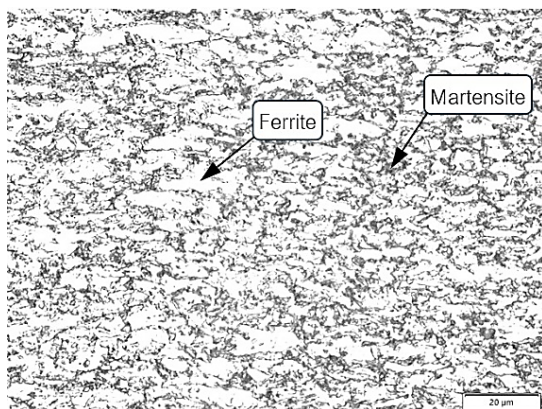
2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ตัดเตรียมวัสดุโลหะแผ่นขึ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนไปหล่อด้วยเรซิน ทำการขัดผิวเรียบด้วยเครื่องขัดขึ้นทดสอบแบบจานหมุนโดยใช้กระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 240, 360, 400, 500, 600, 800, 900, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ในขั้นตอนสุดท้ายจะถูกนำไปขัดด้วยผงอลูมินาขนาด 1 ไมโครเมตร เพื่อให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบเงา และนำชิ้นทดสอบไปจุ่มในกรดไนตริกร้อยละ 3 (3% Nitric acid) ที่ผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ (Ethanol alcohol) และล้างชำระด้วยน้ำเปล่า เพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Light Optical Microscope; LOM)

3. ผลทดลอง

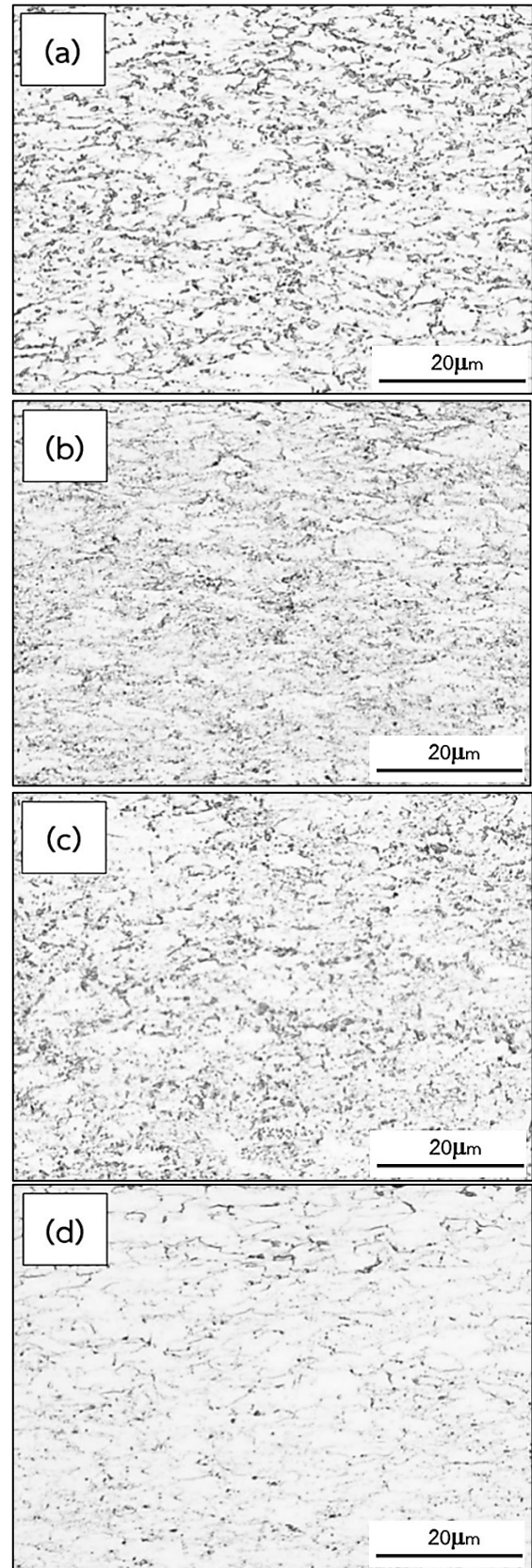
3.1 ผลกระทบของระยะเวลาการอบอ่อนที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาค

ภาพที่ 3 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของวัสดุเหล็กกล้า DP980 ซึ่งไม่ผ่านการอบอ่อนพบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยเฟสหลักสองชนิดคือเฟสชนิดแข็งมาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรต์ที่มีขนาดเกรนต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากขั้นตอนการก่อตัวที่แตกต่างกัน โดยจากผลการเปรียบเทียบพื้นที่ของเฟสโดยใช้โปรแกรม ImageJ ดังภาพที่ 5 จะพบว่าม็อดราส่วนพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์ที่ร้อยละ 48.106 และมีพื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ที่ร้อยละ 51.894

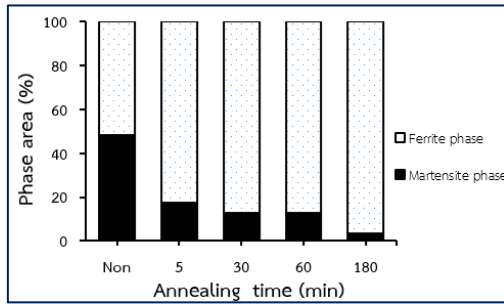


ภาพที่ 3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ DP980 ที่ไม่ผ่านการอบอ่อน

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ประกอบด้วยเฟสหลัก 2 ชนิดคือเฟสมาร์เทนไซต์ (Martensite phase) ส่วนพื้นผิวสีดำ และโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ (Ferrite matrix) ส่วนพื้นผิวสีขาวซึ่งมีขนาดเกรนต่างกัน สาเหตุหลักเกิดจากความแตกต่างของรูปแบบการก่อตัวจากกระบวนการทางความร้อน [16]



ภาพที่ 4 ลักษณะของโครงสร้างจุลภาคทางโลหะวิทยาหลังการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 °C (a) 5 นาที (b) 30 นาที (c) 60 นาที และ (d) 180 นาที



ภาพที่ 5 อัตราส่วนพื้นที่เฟสของชิ้นทดสอบจากการอบอ่อนด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน

หลังกระบวนการอบอ่อนพบว่าโครงสร้างจุลภาคโดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์ขนาดใหญ่ซึ่งเกิดขึ้นภายหลังการรีดเย็นและกระบวนการอบอ่อน ส่วนเฟสมาร์เทนไซต์ซึ่งมีความแข็งสูงจะเกิดจากการก่อตัวในระหว่างการเย็นตัวภายหลังการอบอ่อน ซึ่งเฟสนี้จะมีขนาดเล็กและเกิดกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เฟสมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างมีพื้นที่ลดลงและมีขนาดเล็ก ทั้งนี้ขนาดและอัตราส่วนของพื้นที่เฟสภายในโครงสร้างจุลภาคจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล ซึ่งมีความสำคัญมากในการปรับปรุงค่าความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่ ดังภาพที่ 4 ซึ่งแสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบเหล็กกล้า DP980 ซึ่งผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน 4 ระดับคือ 5 นาที 30 นาที 60 นาที และ 180 นาที ตามลำดับ โดยลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 5 นาที (ภาพที่ 4(a)) พบว่าเฟสมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างจุลภาคจะมีพื้นที่น้อยลง โดยมีพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์คิดเป็นร้อยละ 17.525 หรือลดลงร้อยละ 30.581 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ส่วนพื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์มีอัตราส่วนพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 82.475 ส่วนชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 30 นาที (ภาพที่ 4(b)) พบว่าเฟสมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างจุลภาคจะมีพื้นที่ลดลงเล็กน้อย โดยมีพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์คิดเป็นร้อยละ 12.679 หรือลดลงร้อยละ 35.427 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ส่วนพื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์มีอัตราส่วนพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 87.321 เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นที่ 60 นาที (ภาพที่ 4(c)) พบว่าพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหากเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยมีพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์คิดเป็นร้อยละ 12.822 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.143 ส่วนพื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์มีอัตราส่วนพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 87.178 และเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นเป็น 180 นาที (ภาพที่ 4(d)) พบว่าพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์จะลดลงมากที่สุด โดยมีพื้นที่ของเฟสมาร์เทนไซต์คิดเป็นร้อยละ 3.625 หรือลดลงร้อยละ 44.481 เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ส่วน

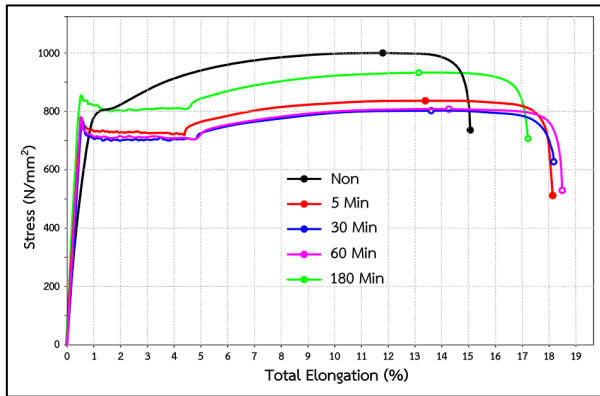
พื้นที่ของโครงสร้างพื้นเฟอร์ไรต์มีอัตราส่วนพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 96.375

3.2 ผลกระทบของระยะเวลาการอบอ่อนที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล

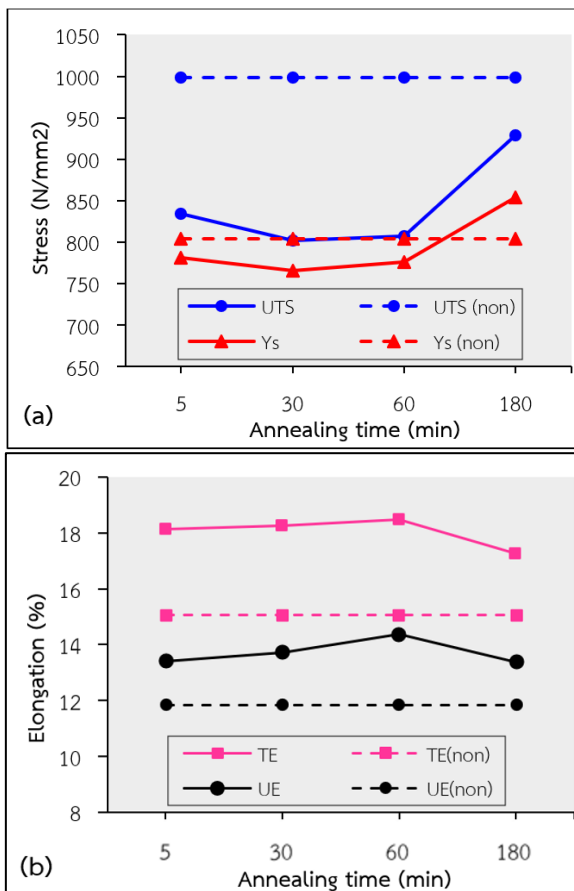
หลังการอบอ่อนจะนำชิ้นทดสอบโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงไปทำการทดสอบแรงดึงโดยลักษณะของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบแสดงดังภาพที่ 6 ส่วนกราฟสมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนภายใต้อุณหภูมิวิกฤติ (600 °C) ด้วยระยะเวลาการอบอ่อนที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้นในช่วง 5-60 นาที ค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงจะมีแนวโน้มลดลง ส่วนอัตราการยืดตัวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของพื้นที่เฟสมาร์เทนไซต์ในโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการอบอ่อนเพิ่มขึ้นที่ 180 นาที ค่าความเค้นครากและค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการเกิดขึ้นของเฟสเฟสซีเมนต์ไธต์ (Cementite) บริเวณขอบเกรน ส่วนอัตราการยืดตัวโดยรวมของชิ้นทดสอบจะลดลงเล็กน้อย



ภาพที่ 6 ลักษณะชิ้นทดสอบแรงดึง (a) ไม่ผ่านการอบอ่อน (b) อบอ่อน 5 นาที (c) อบอ่อน 30 นาที (d) อบอ่อน 60 นาที และ (e) อบอ่อน 180 นาที



ภาพที่ 7 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าชนิด เฟสคู่ DP980



ภาพที่ 8 กราฟแสดงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าชนิดเฟสคู่ DP980 (a) ความเค้นครากและความแข็งแรงดึง (b) อัตราการยืดตัว

ภาพที่ 8(a) เป็นกราฟแสดงผลสรุปการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของวัสดุชิ้นทดสอบ (ความแข็งแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าความเค้นคราก (Ys) ตามฟังก์ชันของระยะเวลาการอบอ่อน ซึ่งพบว่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่าความเค้นครากจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบก่อนการอบอ่อน ดังผลการทดลองของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 5 นาที จะพบว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดจะลดลงจาก 998.79 N/mm² เป็น 833.94 N/mm² ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 16.50 ส่วนค่าความเค้นครากจะลดลงเล็กน้อยจาก 804.02 N/mm² เป็น 781.24 N/mm² ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 2.83 ทั้งนี้พบว่าค่าความเค้น

ครากและค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุชิ้นทดสอบจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นในช่วง 5-30 นาที เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเป็น 60 นาที ค่าความเค้นดังกล่าวจะเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย และเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเป็น 180 นาที พบว่าค่าความเค้นทั้งสองจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะค่าความเค้นครากของชิ้นทดสอบดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นครากของชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ทั้งนี้เป็นเพราะคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนบริเวณขอบเกรนของเฟสมาร์เทนไซต์ที่เพิ่มมากขึ้น [17-18] ซึ่งจะส่งผลให้เฟสหรือเกรนภายในโครงสร้างจุลภาคเคลื่อนตัวได้ยากขึ้น ส่วนภาพที่ 8(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของอัตราการยืดตัวแบบสม่ำเสมอและอัตราการยืดตัวโดยรวมของวัสดุกับระยะเวลาการอบอ่อน ซึ่งพบว่าอัตราการยืดตัวของชิ้นทดสอบหลังการอบอ่อนจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการอบอ่อน ดังผลการทดลองของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอบอ่อนเป็นระยะเวลา 5 นาที จะพบว่าอัตราการยืดตัวโดยรวมจะเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 15.05 เป็น 18.13 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.08 ทั้งนี้พบว่าอัตราการยืดตัวโดยรวมจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นในช่วง 5-60 นาที และพบว่าอัตราการยืดตัวโดยรวมจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเป็น 180 นาที

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาวิวัฒนาการหรือการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงชนิดเฟสคู่เกรด DP980 ภายหลังจากการอบอ่อนหลังกระบวนการที่อุณหภูมิ 600 °C ด้วยระยะเวลาการอบที่แตกต่างกัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์มีแนวโน้มลดลงและเปลี่ยนเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ขนาดใหญ่
2. เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นทดสอบมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาการอบอ่อนเพิ่มขึ้นเกิน 30 นาที อัตราส่วนความยาวและความกว้างของเฟสมาร์เทนไซต์จะลดลง เกิดเป็นลักษณะทรงกลมมากขึ้นและมีอัตราส่วนเชิงปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว
3. การอบอ่อนที่ระยะเวลา 180 นาทีจะส่งผลให้วัสดุชิ้นทดสอบมีสมบัติทางกลในภาพรวมที่ดีที่สุด โดยมีค่าความแข็งแรงดึงอยู่ที่ 929.37 MPa การยืดตัวโดยรวมอยู่ที่ร้อยละ 17.25 และค่าความเค้นครากอยู่ที่ 853.97 MPa

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ พื้นที่วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่อนุเคราะห์เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

มงคลรัตน์โกสินทร์ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัยงานวิจัยฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhanga W., Xua X., Liua Y., Yub C., Liua X., Xie Z. High-strength cold-formed steel framed shear wall with steel sheet sheathing, *Thin-Walled Struct.* 2021;162: 107584.
- [2] Singh A.K., Bhattacharya B., Biswas S. High strength, ductility and sheet formability by normalizing and quenching of low carbon micro alloyed dual-phase steel., *Materials Science & Engineering A.* 2024; 890: 145848.
- [3] Zhang T., Jia F., Liu H., Pan D., Xie H., Wu H., Liu J., Yang T., Zhang X., Huo M., Wang Z., Li L., Linton V., Jiang F., Jiang Z. Microstructure-based modelling of formability for advanced high strength dual-phase steels, *Materials Science & Engineering A.* 2024; 915: 147227.
- [4] Bhargavaa M. , Chakrabartyb S. , Barnwala V. K. , Tewaria A. , Mishra S.K. Effect of microstructure evolution during plastic deformation on the formability of Transformation Induced Plasticity and Quenched & Partitioned AHSS, *Materials & Design.* 2018; 152: 65–77.
- [5] He Z. , Liang J. , Ruan X. , Wang X. , Ning J. , Gao Q. , Guo E. , Du W. Tailoring the microstructure and mechanical properties of laser metal deposited Hastelloy X superalloy via heat treatment and subsequent hot plastic deformation, *J. Mater. Process. Technol.* 2025; 336: 118678.
- [6] Li Q., Zhang H., Chen F., Xu D., Sui D., Cui Z. Study on the plastic anisotropy of advanced high strength steel sheet: Experiments and microstructure-based crystal plasticity modeling, *Int. J. Mech. Sci.* 2020; 176: 105569.
- [7] Zhang, F., Ruimi, A., Wo, P. C., & Field, D. P. Morphology and distribution of martensite in dual phase (DP980) steel and its relation to the multiscale mechanical behavior. *Materials Science & Engineering A.* 2016; 659: 93–103.
- [8] Skowronek, A., Grajcar, A. & Petrov, R.H. Dependence of mechanical properties on the phase composition of intercritically annealed medium-Mn steel as the main competitor of high-strength DP steels. *Sci. Rep.* 2024; 14: 9567.
- [9] Srinivasan T., Ramu P., Suresh G., Govardhan Y.S, Srinivasan S. Impact of mechanical properties on sheet metal forming processes by using single-point incremental shaping method, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2020; 954: 012028.
- [10] Mazaheri Y, Jahanara A.H., Sheikhi M., Ghassemali E. On the Simultaneous Improving of Strength and Elongation in Dual Phase Steels via Cold Rolling, *Metals.* 2020; 10: 1676.
- [11] Bassini E., Marchese G., Ugues D. Effect of Cold Rolling on Microstructural and Mechanical Properties of a Dual-Phase Steel for Automotive Field, *Materials.* 2022; 15: 7482.
- [12] Radwanski K., Kuziak R., Rozmus R. Structure and mechanical properties of dual-phase steel following heat treatment simulations reproducing a continuous annealing line, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2019; 19(2): 453-468.
- [13] Alzreedy A.M. Effect of Process Annealing Temperature on Some Tensile Properties and Microstructure of Cold Rolled 1010 Steel, *Int. J. Acad. Res. Appl. Sci.* 2022; 22: 12-16.
- [14] Ueki M., Horie S., Nakamura T. Factors affecting dynamic recrystallization of metals and alloys, *Mater. Sci. Technol.* 1987; 3(5): 329-337.
- [15] ASTM International. ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International United State, PA 19428-2959; Last previous edition approved 2021.
- [16] Krajewski S., Nowacki J. Dual-phase steels microstructure and properties consideration based on artificial intelligence techniques, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 2014; 4: 278-286.
- [17] Uscinowicz R. Effect of Elevated Temperature and Annealing Time on Mechanical Properties of Ti/Cu Bimetal, *Materials.* 2022; 15: 8707.
- [18] Lian X.K., Li y., Ren F.Z., Xiong Y., Wu Y.L., Han S., He T.T., Wang C.X. Effect of annealing time on microstructure and mechanical properties of cryorolled AISI 310S stainless steel, *J. Iron Steel Res. Int.* 2023; 30: 548-556.