

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึง ในการเชื่อมภาชนะแรงดันสูงด้วยเหล็กกล้า ASTM A537 Class1

ปรัชญา เพ็ญสุระ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

ผู้นิพนธ์ประสานงาน อีเมล : Prachya.pea@kmutt.ac.th

รับต้นฉบับ: 29 กรกฎาคม 2562; รับผิดชอบต่อฉบับแก้ไข: 15 กันยายน 2562; ตอบรับบทความ: 30 กันยายน 2562
เผยแพร่ออนไลน์: 25 ธันวาคม 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง สำหรับการเชื่อมภาชนะแรงดันสูงในเหล็กกล้า ASTM A537 Class1 ด้วยกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม หลังจากทำการเชื่อมได้มีการทดสอบค่าความเค้นแรงดึง วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม คือ 3-นิวรอนในชั้นอินพุต 3 นิวรอน จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน 14 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน (3-14-1) การเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์คสำหรับการปรับค่าน้ำหนักและไบแอส รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น คือ ฟังก์ชันลอก-ซิกมอยด์ สำหรับชั้นนำเข้า ฟังก์ชันแทน-ซิกมอยด์ สำหรับชั้นซ่อน และฟังก์ชันเพียวรินสำหรับชั้นผลลัพธ์ มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่ 0.284 สภาวะการเชื่อมที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดพบโครงสร้างจุลภาคเฟิร์ลไลต์ละเอียด ลักษณะกลม มีการกระจายตัวกันอย่างหนาแน่น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีประสิทธิภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทำนาย ควบคุมคุณภาพของรอยเชื่อมให้ได้ค่าความเค้นแรงดึง ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อไป

คำสำคัญ : แบบจำลอง ภาชนะแรงดันสูง วิธีโครงข่ายประสาทเทียม ค่าความเค้นแรงดึง การเชื่อมใต้ฟลักซ์

Artificial Neural Network Modeling for Prediction of Tensile Strength in Pressure Vessel Welding with Steel ASTM A537 Class 1

Prachya Peasura

*Department of Production Technology Education Faculty of Industrial Education and Technology,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand*

Corresponding Author. E-mail address: Prachya.pea@kmutt.ac.th

Received: 29 July 2019; Revised: 15 September 2019; Accepted: 30 September 2019

Published online: 25 December 2019

Abstract

This research described to the determine a mathematic model using artificial neural network (ANN) for predicting the of tensile strength in the pressure vessel steel ASTM A537 Class1 grade with submerge arc welding process. The following welding parameters were studied: the welding current, voltage and travel speed. The resulting welding samples were examined using tensile strength tests which were observed microstructure with scanning electron microscopy (SEM) and determine a suitable mathematic model. The research results reveal that using a neural network model with the proposed mathematical model, which tensile strength represents 3 neurons for the input 14 neurons and 1 output neurons (3-14-1). The Levenberg-Marquart training algorithm was also train for weight and bias network. The neuron of log-sigmoid for input layer, tan-sigmoid for hidden layer and purelin for output layer activation function was assigned. The mean square error (MSE) and coefficient of determination (R2) for tensile strength predict was showed that of 0.284. The welding conditions which have the highest tensile strength was showed that microstructure phenomenon could be that fine pearlite and spheroidized pearlite with distribute intensity in heat affected zone. The mathematical model that can be effectively applied to predict and quality control of welds to obtain tensile strength according to the standard requirements, which was reduce production costs and increase work efficiency.

Keywords : Model, Pressure Vessel, Artificial Neural Network, Tensile Strength, Submerge Arc Welding

1) บทนำ

ภาชนะทนแรงดันสูง (Pressure Vessel) มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตในประเทศไทยมาก เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมขนส่งก๊าซทางเรือ เป็นต้น เนื่องจากอุตสาหกรรมดังกล่าวจะต้องใช้พลังงานที่ได้จากก๊าซธรรมชาติ หรือเชื้อเพลิงอื่น ๆ ในสถานะก๊าซ ภาชนะสำหรับบรรจุก๊าซประเภทต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นจะต้องใช้เหล็กกลุ่มพิเศษในการสร้างภาชนะทนแรงดันสูง โดยสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials, ASTM) ได้จัดกลุ่มเหล็กกล้าประเภทนี้เป็นเหล็กกล้าทนแรงดันสูง (Pressure Vessel Steels)[1] สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้ากลุ่มนี้ต้องมีการพิจารณาถึงความสามารถในการเชื่อม (Weldability) และข้อพิจารณาในการเชื่อม (Welding Consideration) เนื่องจากเหล็กกล้ากลุ่มนี้มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.2% จึงมีโอกาสในการเสี่ยงต่อการแตกร้าวขณะทำการเชื่อมหรือหลังการเชื่อมได้ ถ้าสภาวะการเชื่อมไม่เหมาะสม [2]

เหล็กกล้าทนแรงดันสูงเกรด ASTM A537 Class1 เป็นเหล็กกล้าที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อน ซึ่งส่งผลให้มีค่าความเค้นแรงดึงมากกว่าเกรดอื่น ๆ เช่น ASTM A516 เหล็กกล้า ASTM A537 Class 1 นิยมใช้ในการผลิตหม้อไอน้ำแรงดันสูง (Boiler) และภาชนะรับความดันสูง (Pressure Vessel) ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และปิโตรเคมี กระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้ในการเชื่อม ASTM A537 Class1 ได้แก่ กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerge Arc Welding) เนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมอัตโนมัติ คุณภาพรอยเชื่อมสูง สามารถเชื่อมได้อย่างรวดเร็ว สามารถควบคุมปริมาณความร้อนเข้าในชิ้นงานได้เป็นอย่างดี เมื่อมีการปรับพารามิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม เหล็กกล้า ASTM A537 Class1 เมื่อทำการคำนวณปริมาณคาร์บอนเทียบเท่า (Carbon Equivalent) เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อการแตกร้าว พบว่ามีปริมาณคาร์บอนเทียบเท่าที่ 0.61 มีความเสี่ยงต่อการแตกร้าวประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ [3] ทำให้เกิดปัญหาการแตกร้าวใต้แนวเชื่อม (Underbead Cracking) ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากที่สุดในการเชื่อมเหล็กกล้าเกรดนี้ รายงานวิจัยของ Kalyankar and Chudasama [4] ที่ได้หาแนวทางป้องกันการแตกร้าวบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของเหล็กกล้า ASTM A537 รวมถึงรายงานการวิจัยของ Behnam

Sadeghi et al. [5] ที่ได้ลดความเค้นตกค้างในการเชื่อมเพื่อป้องกันความเสี่ยงต่อการแตกร้าวในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน การเชื่อมเหล็กกล้า ASTM A537 Class 1 ด้วยการเชื่อมใต้ฟลักซ์เพื่อให้ได้คุณภาพของรอยเชื่อมเหมาะสม จะต้องมีการพิจารณาถึงค่าความเค้นแรงดึงที่สามารถรับแรงกระทำจากการออกแบบรอยเชื่อม ไม่เกิดรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในการเชื่อม ดังนั้น จึงมีความจำเป็นจะต้องเชื่อมในสภาวะที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมการผลิตก่อนที่จะได้ข้อกำหนดกระบวนการเชื่อม (Welding Procedure Specification, WPS) จำเป็นจะต้องมีการจัดทำผลการทดสอบกระบวนการเชื่อม (Procedure Qualification Record, PQR) โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามมาตรฐาน ASME Boiler and Pressure Vessel Code สถานประกอบการที่ทำธุรกิจการเชื่อมภาชนะทนแรงดันสูงในประเทศไทย ส่วนใหญ่ใช้มาตรฐานดังกล่าวในการผลิตภาชนะทนแรงดันสูง สำหรับกระบวนการจัดทำ PQR ต้องมีการทดลองเชื่อมในพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน รวมถึงต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมด้วยการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย และการตรวจสอบสมบัติทางกล เช่น การทดสอบค่าความเค้นแรงดึง การทดสอบการดัดโค้ง เป็นต้น ทำให้ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง และใช้เวลาในการดำเนินการมาก

แบบจำลองโครงข่ายประสาท (Artificial Neural Network, ANN) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการวิจัยปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) เป็นการคำนวณเลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการพยากรณ์ข้อมูล โดยข้อดีของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถคัดแยกคุณลักษณะพิเศษ (Feature Extraction) ของข้อมูลด้วยตนเอง สามารถนำข้อมูลนำเข้า (Input Data) สำหรับการสร้างแบบจำลองได้โดยตรง ซึ่งมีความแตกต่างจากการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ที่จะต้องทำการคัดแยกคุณลักษณะพิเศษของข้อมูลด้วยตนเองจึงทำให้มีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้ ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในงานเชื่อม ได้แก่ การทำนายค่าความเค้นแรงดึง ขนาดรอยเชื่อม ความเค้นตกค้าง รวมถึงการหาความเหมาะสมในกระบวนการเชื่อมต่าง ๆ ดังรายงานวิจัยของ Chinnadurai et al. [6] ได้สร้างแบบจำลองด้วยโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึงในการเชื่อมท่อ Vignesh and Padmanaban [7] ได้นำเสนอแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึงในการเชื่อมอูมิเนียมด้วย

กระบวนการเชื่อมเสียดทาน งานวิจัยของ Babu et al. [8] ได้ทำการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายโครงสร้างจุลภาค และสถานะการกัดกร่อนในการเชื่อมเสียดทานในอลูมิเนียม รายงานวิจัยของ Sarka et al.[9] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองแบบมัลติเพอร์เซ็ปชัน และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายลักษณะของรอยเชื่อมและความกว้างของเขตอิทธิพลความร้อนในการเชื่อมเหล็กกล้า Yu et al.[10] ได้ออกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความแข็งในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยการเชื่อมเลเซอร์ รายงานการวิจัยของ Srinivasan et al.[11] ได้ทำการสร้างแบบจำลองด้วยโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าเกรด 15CDV6 ด้วยกระบวนการเชื่อมทิก Dewan et al.[12] ศึกษาแบบจำลองแบบ adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) และโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึงในการเชื่อมแบบเสียดทาน Zhao et al. [13] และคณะได้ออกแบบการทดลองแบบแพคทอเรียลและสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึงในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด รายงานวิจัยของ Narayanareddy et al.[14] ได้ทำการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลข และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายการบิดตัวในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม Kumar et al.[15] ได้ทำการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายลักษณะของรอยเชื่อมในกระบวนการเชื่อมเย็น โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง ลักษณะรอยเชื่อม ความเค้นตกค้าง ในกระบวนการเชื่อมเสียดทาน กระบวนการเชื่อมทิก การเชื่อมความต้านทานชนิดจุด ในอลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้า เป็นต้น

จากปัญหาและงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่ได้มีงานวิจัยใดที่ได้มุ่งเน้นในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการเชื่อมเหล็กกล้า ASTM A537 Class 1 ด้วยกระบวนการเชื่อมได้พัลส์ อีกทั้งการเลือกสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมมีความจำเป็นในการที่จะมีเครื่องมือเพื่อช่วยในการเลือกปัจจัย ระดับของปัจจัยที่มีความเหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความเค้นแรงดึงที่เหมาะสม ไม่เกิดการแตกร้าวทั้งในบริเวณรอยเชื่อมและเขตอิทธิพลความร้อน โดยทำการเลือกปัจจัยนำเข้า (Input) ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดัน และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออิทธิพลของสมบัติทางกล

และโครงสร้างจุลภาค ปัจจัยส่งออก (Output) ได้แก่ ค่าความเค้นแรงดึง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง รูปแบบแบบบ็อกซ์-เบนเคน เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความเค้นแรงดึงจากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง เลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อม และหาสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับการระบุในข้อกำหนดกระบวนการเชื่อม (Welding Procedure Specification, WPS) โดยงานวิจัยนี้อุตสาหกรรมการผลิตภาชนะแรงดันสูงสามารถนำข้อมูลวิจัย และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ไปประยุกต์ใช้เพื่อพยากรณ์ ควบคุมคุณภาพของรอยเชื่อมให้ได้ค่าความเค้นแรงดึง ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ลดปริมาณในการทำ PQR และลดต้นทุนในการจัดทำ PQR ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานต่อไป

2) ระเบียบวิธีการวิจัย

2.1) วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย คือเหล็กกล้าทนแรงดันสูง เกรด ASTM A537 Class 1 ความหนา 6 มิลลิเมตร ทำการเตรียมชิ้นทดสอบขนาด 75 x 180 x 6 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASME Boiler and Pressure Vessel Section IX [16] มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ ASTM A537 Class 1

C	Mn	Si	Ni	Mo	P	S
0.248	1.48	0.52	0.21	0.078	0.030	0.026

2.2) การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยได้กำหนดปัจจัยที่ได้ใช้ในการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม เนื่องจากปัจจัยทั้งสามจะส่งผลกระทบต่อปริมาณความร้อนที่เข้าในชิ้นงาน ส่งผลต่ออัตราการเย็นตัวในวัสดุถ้าเลือกใช้ระดับของปัจจัยที่ไม่เหมาะสม และมีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกล [17] งานวิจัยได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง รูปแบบการทดลองบ็อกซ์-เบนเคน ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม รวมถึงการหาระดับปัจจัยที่

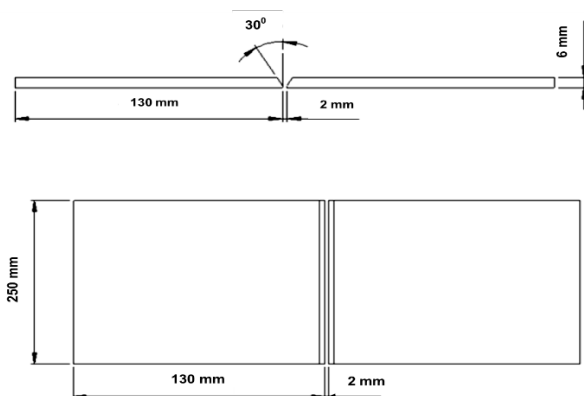
เหมาะสม การออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบนเคน แบ่งระดับของปัจจัยเป็น 3 ระดับ แสดงในตารางที่ 2 ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จำนวนชิ้นงานที่ได้ทำการทดลองทั้งหมด 45 ชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน

ปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย
	-1	0	1	
กระแสไฟฟ้า (X_1)	340	360	380	แอมแปร์
แรงดันไฟฟ้า (X_2)	22	24	26	โวลต์
ความเร็วในการเชื่อม (X_3)	24	27	30	เซนติเมตรต่อ นาที

2.3) กรรมวิธีการเชื่อม

การศึกษาวิจัยใช้กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW) ในการเชื่อมใต้ใช้ลวดเชื่อม F7A2-EM12K ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร ตามข้อกำหนดมาตรฐาน AWS A5.17 Specification for Carbon Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding [18] เชื่อมต่อชน (Butt Joint) ในตำแหน่งท่าราบ ทำการบากร่องวี (V-Joint) มุม 60 องศา ผิวหน้าของรอยขอบชิ้นงานส่วนตรงที่ฐาน (Root Face) 2 มิลลิเมตร ระยะเว้น (Root Opening) 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 โดยใช้ทองแดงเป็นแผ่นรองหลัง มีอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน แล้วทำการเชื่อมดินแนวชิ้นงานตามการออกแบบการทดลอง ปัจจัยควบคุม ได้แก่ ระยะอาร์ก 2.0 มิลลิเมตร , ระยะยื่นของลวดเชื่อม 15 มิลลิเมตร มุมในการเชื่อม 90 องศา [3]



รูปที่ 1 แสดงขนาดชิ้นงานก่อนทำการเชื่อม

2.4) การทดสอบสมบัติทางกล

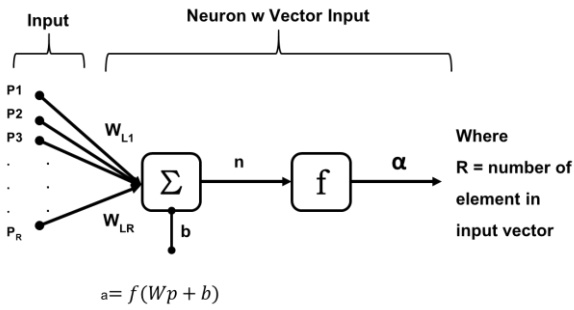
การจัดทำข้อกำหนดมาตรฐานการเชื่อม มาตรฐานสากลได้มีการระบุให้มีการทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบความเค้นแรงดึง และการทดสอบการดัดโค้ง ในงานวิจัยได้มีการจัดทำชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASME Boiler & Pressure Vessel Code ทั้งการทดสอบความเค้นแรงดึง (QW462.1 a) และการดัดโค้ง (QW462.3 a) [16] จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบความเค้นแรงดึงโดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Tester) ทดสอบการดัดโค้งด้านหน้ารอยเชื่อม (Face Bend Test) และทดสอบการดัดโค้งด้านรากของรอยเชื่อม (Face Bend Test)

2.5) การทดสอบโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานหลังจากการเชื่อมนำมาเตรียมผิวโดยการขัดกระดาษทราย ขัดผิวมัน จากนั้นนำชิ้นงานมากัดชิ้นรอย (Etching) โดยใช้กรดไนตริก 2 มิลลิลิตร และเมทานอล 98 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการกัดชิ้นรอย 5 วินาที [19] การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า และ 5,000 เท่า วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS) รวมถึงการวิเคราะห์การแตกหักของวัสดุ

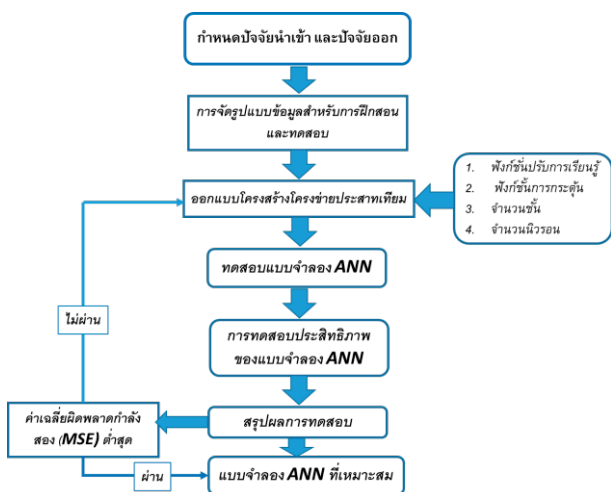
3) โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการวิจัยปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ที่ไม่เชิงเส้น โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการคำนวณเลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการพยากรณ์ข้อมูล โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neural) ซึ่งจำลองมาจากการทำงานของระบบสมองมนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function, f) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight, w) และค่าไบแอส (Bias, b) เป็นเครื่องมือจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาท ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว [20]

การดำเนินการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ดำเนินการกำหนดปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัยได้แก่กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและความเร็วในการเชื่อม ทำการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน ปัจจัยส่งออก ได้แก่ค่าความเค้นแรงดึง จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างรูปแบบต่างๆ โดยพิจารณาจาก 4 องค์ประกอบได้แก่ ฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ ฟังก์ชันการกระตุ้น จำนวนชั้น และจำนวนนิวรอน ทำการทดสอบแบบจำลอง ประสิทธิภาพแบบจำลอง สรุปผล และทำการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดจากค่าความผิดพลาดกำลังสอง ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังการดำเนินการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

3.1 การจัดรูปแบบข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและทดสอบ

การจัดรูปแบบข้อมูลสำหรับการฝึกสอน (Training) และทดสอบ (Testing) จากจำนวนปัจจัยนำเข้า (Input) 3 ปัจจัย ผลลัพธ์เป้าหมาย (Output) 1 ค่า โดยมีข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์จำนวน 45 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแบบบ็อกซ์ เบนท์เคน

กำหนดจำนวนรอบในการวนซ้ำ (Epoch)=1,000 โดยแปลงข้อมูลให้มีค่าระหว่าง 0-1 โดยใช้สมการ (1)

$$X = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

หลังจากข้อมูลได้ทำการฝึกสอนและทดสอบ ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมแล้วข้อมูลที่ได้จะต้องถูกแปลงค่ากลับเป็นค่าจริงจากสมการที่ (2)

$$X = [X_i (X_{\max} - X_{\min}) + X_{\min}] \quad (2)$$

โดยที่ X คือ ข้อมูลที่ได้รับการแปลงค่า

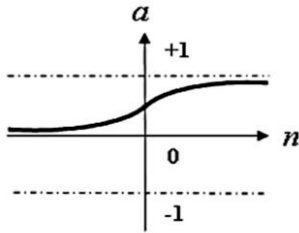
X_i คือ ข้อมูลการทดลองที่ i

X_{\min} คือ ข้อมูลการทดลองที่มีค่าน้อยที่สุด

X_{\max} คือ ข้อมูลการทดลองที่มีค่ามากที่สุด

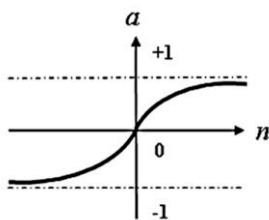
3.2 การออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม ในงานวิจัยได้มีการแบ่งข้อมูลสำหรับฝึกสอน และทดสอบทำให้เกิดการเรียนรู้ด้วยเทคนิคการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ ฝึกสอนด้วยวิธีอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์กมาร์ค (Levenberg-Maquartm Algorithm) [21] ฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ (Learning Function) ชนิดการเคลื่อนลงตามความชัน (Learning gradient descent, Learnqd) รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น (Activate Function) ในงานวิจัยได้ใช้ฟังก์ชันลอจิสติกมอยด์ (log-sigmoid) สำหรับชั้นนำเข้า (Input Layer) ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์ (tan-sigmoid) สำหรับชั้นซ่อน (Hidden Layer) และฟังก์ชันเพียวริน (purelin) สำหรับชั้นผลลัพธ์ (Output layer) สลับกันเพื่อที่จะได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดน้อยที่สุด (Mean Square Error, MSE) และทำให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพในการทำนายที่แม่นยำสูง สำหรับฟังก์ชันการถ่ายโอนในแต่ละชั้นแสดงในรูปที่ 4-6 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3)-(5)



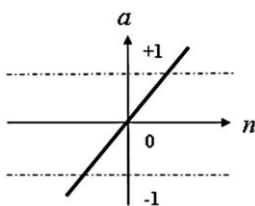
รูปที่ 4 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบลอก-ซิกมอยด์
แหล่งที่มา : J. Y. Shim et al. [22]

$$a = \text{Logsig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (3)$$



รูปที่ 5 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแทน-ซิกมอยด์
แหล่งที่มา : J. Y. Shim et al. [22]

$$a = \text{Tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1 \quad (4)$$



รูปที่ 6 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบเพียวริน
แหล่งที่มา : J. Y. Shim et al. [22]

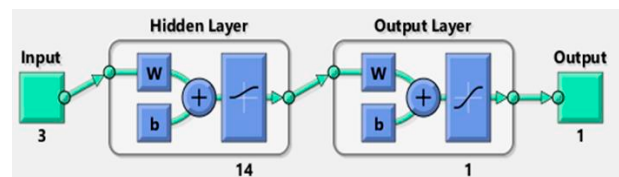
$$a = \text{Purelin}(n) \quad (5)$$

งานวิจัยได้ออกแบบโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมโดยได้ระบุจำนวนชั้น 1 ชั้น มีรูปแบบที่แตกต่างกันทั้งหมด 8 รูปแบบตามจำนวนของนิวรอนในแต่ละชั้น และชนิดของฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ โดยทำการพิจารณาเลือกโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมจากค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสอง (MSE) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

Neuron			MSE
Input Layer	Hidden Layer	Output layer	
3	4	1	0.00153
3	8	1	0.00148
3	10	1	0.00138
3	12	1	0.00150
3	14	1	0.00137
3	16	1	0.00145
3	18	1	0.00144
3	20	1	0.00178

จากตารางที่ 3 ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึงได้แก่ 3-14-1 ประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในชั้นอินพุต 3 นิวรอน จำนวนนิวรอนในชั้นฮิดเดน 14 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน มีค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสองเท่ากับ 0.00137 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงข่ายประสาทเทียมของการทำนายค่าความเค้นแรงดึง

3.3) การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมพิจารณาจาก ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ดังแสดงในสมการ (6) และ (7) โดยที่ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{N} \quad (6)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - A)^2} \quad (7)$$

เมื่อ T คือ ผลลัพธ์เป้าหมาย

A คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนาย

N คือ จำนวนข้อมูล

4) ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

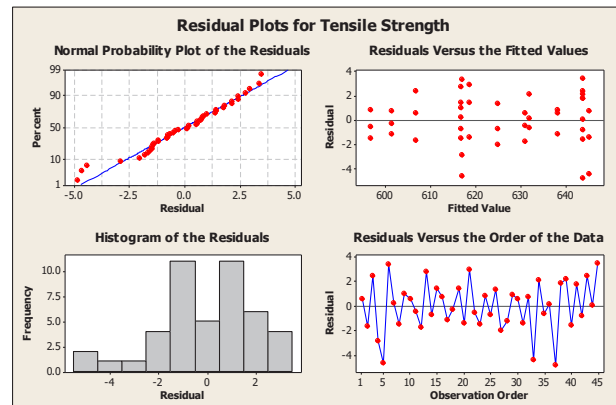
4.1) ผลการวิจัยด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

งานวิจัยได้มีการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบนเคน (Box-Bhenken Design) ซึ่งเป็นรูปแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ในการออกแบบการทดลอง รวมถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึง จากนั้นจึงทำการเลือกแบบจำลองที่มีความสามารถในการทำนายที่แม่นยำเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับแบบจำลองของวิธีการพื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสม พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R^2) สัมประสิทธิ์การพยากรณ์ที่ปรับแก้แล้ว (R^2_{adj}) ค่าความน่าจะเป็นของการถดถอย (P-Value of Regression) และค่าความน่าจะเป็นของความเหมาะสมในสมการ (P-Value of Lack of Fit) สำหรับแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง(Full Quadratic) แบบจำลองเชิงเส้นรวมผลกระทบรวม (Linear + Interaction) แบบจำลองเชิงเส้นรวมสแควร์ (Linear + Squares) และแบบจำลองเชิงเส้น (Linear) โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากแบบจำลองทุกรูปแบบ พบว่ารูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมได้แก่ แบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง มาใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (P-Value 0.05) โดยมีการวิจัยดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสอง

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	11032.40	11032.39	1225.82	240.77	0.000
Linear	3	1140.00	2310.32	770.11	151.26	0.000
Square	3	8442.80	9348.42	3116.14	612.05	0.000
Interaction	3	1449.50	1449.54	483.18	94.90	0.000
Residual Error	35	178.20	178.20	5.09		
Lack-of-Fit	3	27.40	27.42	9.14	1.94	0.143
Pure Error	32	150.80	150.78	4.71		
Total	44	11210.60				
$R^2 = 98.40\%$ $R^2_{(adj)} = 98.00\%$						

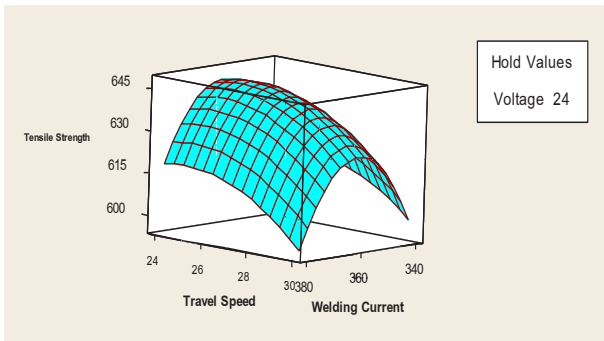
จากตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการแบบเต็มรูปแบบยกกำลังสอง พบว่าค่าความน่าจะเป็นของการถดถอย (P-Value of Regression) เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ (P-Value <0.05) ดังนั้นสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยในแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และปัจจัยหลักมีอิทธิพลต่อปัจจัยตอบสนอง (กระแสไฟฟ้า (X_1) แรงดันไฟฟ้า (X_2) และความเร็วในการเชื่อม (X_3)) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ต่อแบบจำลอง การพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองจะพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นของความเหมาะสมในสมการ (P-Value of Lack of Fit) พบว่าค่า P-Value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.143 ซึ่งมากกว่า 0.05 (P-Value 0.05) สรุปว่าแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองมีความพอเพียง แบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองมีค่า R^2 เท่ากับ 98.40 เปอร์เซ็นต์ และค่า R^2_{adj} เท่ากับ 98.00 เปอร์เซ็นต์ เป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ



รูปที่ 8 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

การดำเนินการทดลองจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องและเหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยพิจารณาจากการแจกแจงข้อมูลแบบปกติของค่าความเค้นแรงดึง (Probability Plot of Tensile Strength) ที่มีค่า P-Value 0.063 ดังนั้นแล้วค่า P-Value ของการทดสอบมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) ข้อมูลจึงมีความแจกแจงแบบปกติ และพิจารณารูปที่ 8 พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot of the Residuals) จากฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อน (Histogram of the Residuals) มีการกระจายตัวเป็นรูปทรงแบบปกติ ทำให้ประมาณได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ แผนภูมิการกระจาย

เทียบกับค่าประมาณ (Residuals Versus the Fitted Values) พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดไม่ได้มีลักษณะแบบกรวยปลายเปิด หรือรูปแบบลำโพง การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าความคลาดเคลื่อนพิจารณาจากแผนภูมิการกระจาย (Residuals Versus the Order of the Data) พบว่าการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนแสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) [23] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารูปแบบการทดลองของแบบจำลองสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้



รูปที่ 9 แสดงพื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วมระหว่าง 3 ปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย

จากรูปที่ 9 พบว่าพื้นผิวตอบสนองของการทำนายค่าความเค้นแรงดึงมีสถานะที่เหมาะสม ซึ่งปัจจัยของการเชื่อมมีอิทธิพลมากต่อค่าความเค้นแรงดึง โดยปัจจัยที่แสดงให้เห็นพื้นผิวตอบสนองที่ดีที่สุด สำหรับ ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 24 เซนติเมตรต่อนาที

แบบจำลองของสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสอง สำหรับค่าความเค้นแรงดึง แสดงดังสมการที่ (8)

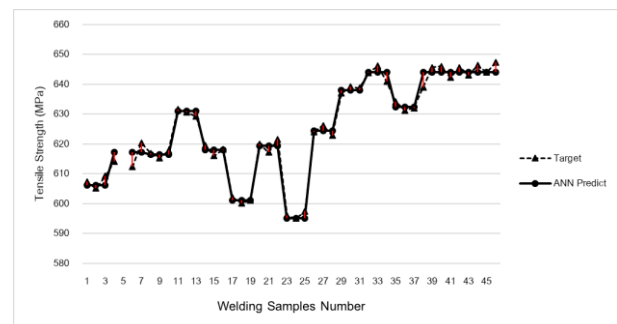
$$Y_{ts} = -1103.23 + 53.919(X_1) + 29.043(X_2) + 118.053(X_3) - 0.069(X_1)^2 + 2.104(X_2)^2 - 0.874(X_3)^2 - 0.143(X_1)(X_2) - 0.027(X_1)(X_3) - 2.669(X_2)(X_3) \quad (8)$$

แบบจำลองสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสองของค่าความเค้นแรงดึงมีข้อจำกัดการใช้สมการดังนี้ กระแสไฟฟ้า(X_1) ที่ 340 ถึง 380 แอมแปร์, แรงดันไฟฟ้า(X_2) ที่ 22 ถึง 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม(X_3) ที่ 24 ถึง 30 เซนติเมตรต่อนาที เมื่อ

Y_{TS} = ค่าความเค้นแรงดึง (เมกะปาสคาล, MPa) X_1 = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, Ampere) X_2 = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์, Voltage) และ X_3 = ความเร็วในการเชื่อม (เซนติเมตรต่อนาที, cm/min)

4.2) ผลการวิจัยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

แบบจำลองในการทำนายค่าความเค้นแรงดึงสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าแรงดันสูง เกรด ASTM A537 Class1 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการทำภาชนะแรงดันสูง จำเป็นต้องมีความแข็งแรงที่เพียงพอในการรับความเค้นในลักษณะต่างๆ เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้นขณะทำการใช้งาน แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึง คือ นิวรอนในชั้นอินพุต 3 นิวรอน จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 14 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน (3-14-1) การเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ควูด รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น คือ ลอก-ซิกมอยด์ สำหรับชั้นนำเข้า ฟังก์ชันแทน-ซิกมอยด์ สำหรับชั้นซ่อน และฟังก์ชันเพียวรินสำหรับชั้นผลลัพธ์



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงเป้าหมายกับค่าที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

จากรูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับค่าเป้าหมายจำนวน 45 ค่า พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าผลลัพธ์มาก เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองมีทั้งหมด 13 ค่า โดยเป็นข้อมูลที่ยังไม่ได้มีการใช้ในการทดสอบ พบว่าค่าความเฉลี่ยคลาดเคลื่อนของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เท่ากับ 0.284 ซึ่งน้อยกว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองที่ 0.658 ดังแสดงในตารางที่ 5 ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้น สามารถทำนายค่า
ความเค้นแรงดึงที่ได้จากการเชื่อมใกล้เคียงข้อมูลจริงมาก

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง

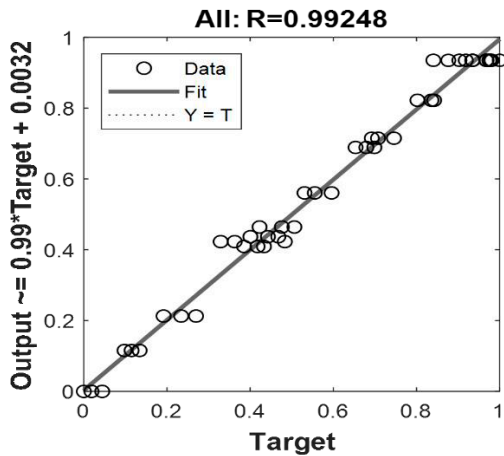
No.	Welding Parameters			Tensile Strength Target	Tensile Strength Predict			
	X ₁	X ₂	X ₃		FQM	SE	ANN	SE
1	340	22	27	607.227	606.799	0.428	606.935	0.292
2	340	24	27	615.573	616.984	1.411	615.210	0.363
3	380	22	27	616.640	616.750	0.110	616.490	0.150
4	380	26	27	630.480	631.050	0.570	631.100	0.620
5	340	24	24	617.933	616.810	1.123	617.933	0.000
6	340	24	30	601.157	601.422	0.265	601.157	0.000
7	380	24	24	619.573	618.600	0.973	619.365	0.208
8	380	24	30	596.210	596.625	0.415	595.121	1.089
9	360	22	24	624.393	624.883	0.490	624.393	0.000
10	360	22	30	638.290	638.241	0.049	638.055	0.235
11	360	24	24	643.630	645.361	1.731	643.943	0.313
12	360	26	30	632.463	631.956	0.508	632.463	0.000
13	360	24	27	644.370	643.888	0.482	643.952	0.418
MSE						0.658		0.284

FQM คือ แบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง (Full Quadratic Equation)

ANN คือ วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

MSE คือ ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Mean Square Error)

SE คือ ค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Square Error)



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายและผลลัพธ์ที่ได้จาก
โครงข่ายประสาทเทียม

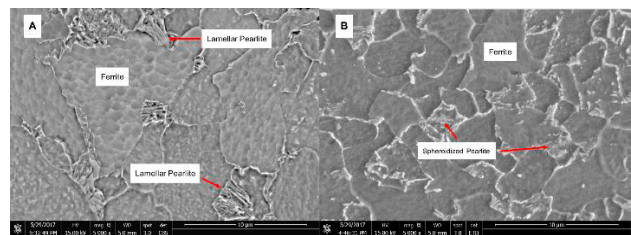
ประสิทธิภาพของแบบจำลองสามารถพิจารณาได้จากค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าแบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง นอกจากนี้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.992 มีความชันเท่ากับ 0.99 และตัดแกน y ที่ 0.0032 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์เป้าหมายกับผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเชิงเส้นที่มีความแม่นยำ โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายค่าความเค้นแรงดึงของชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้า ASTM A537 class 1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 11

ดังนั้นแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเชิงเส้นแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง โดยโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแก้ปัญหาการเกิดแบบจำลองที่ไม่จำรูปแบบของข้อมูลฝึกสอน (Over Fitting) ได้ ถึงแม้จะมีการแบ่งข้อมูลในการฝึกสอน (Training) แต่ข้อมูลทุกค่าสามารถได้รับการฝึกสอนทั้งหมด ดังนั้นข้อมูลจากการทดลอง 45 ค่าจึงเพียงพอที่นำมาใช้กับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึงในการเชื่อมโลหะแรงดันสูงได้อย่างแม่นยำ

4.3) การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคทางานวิจัยใช้การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายหลังจากการได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้น

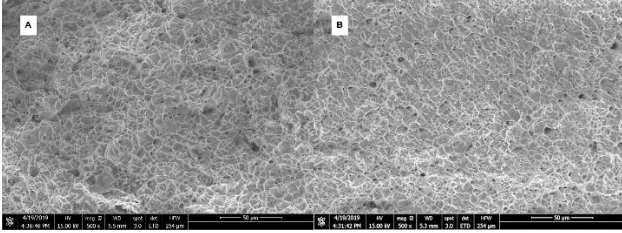
แรงดึงแล้ว ในงานวิจัยจะทำการเชื่อมในสภาวะที่ให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 360 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 27 เซนติเมตร ต่อนาที จะส่งผลให้มีค่าความเค้นแรงดึงที่ 643.59 เมกะปาสคาล งานวิจัยทำการเชื่อมชิ้นงานอีก 3 ชิ้นงานในสภาวะดังกล่าว เพื่อทำการเปรียบเทียบกับสภาวะการเชื่อมที่มีค่าความเค้นแรงดึงน้อยที่สุด เพื่อศึกษาถึงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นแรงดึง ในการวิจัยทำการวิเคราะห์เฉพาะบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมและทดสอบค่าความเค้นแรงดึงทุกชิ้นงานเชื่อม ทุกสภาวะการเชื่อมเกิดความเสียหายในบริเวณดังกล่าว



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของ ASTM A537 class 1 (A) เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 22 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 27 เซนติเมตรต่อนาที (B) เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 360 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 27 เซนติเมตรต่อนาที

โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า ASTM A537 class 1 ประกอบไปด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่เป็นโครงสร้างพื้น และโครงสร้างเฟอร์ไรท์ จากรูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมในสภาวะที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสไฟ 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 22 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 24 เซนติเมตรต่อนาที โครงสร้างจุลภาคมีขนาดเกรนที่ใหญ่ มีโครงสร้างลามีลาเพิร์ลไลต์ (Lamellar Pearlite) [24] ที่หยาบกระจายตัวบนโครงสร้างเฟอร์ไรท์ มีความหนาแน่นของเฟิร์ลไลต์ 45.32 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสภาวะการเชื่อมดังกล่าวปริมาณความร้อนที่เข้าไปในชิ้นงานน้อยทำให้อัตราการเย็นตัวต่ำส่งผลให้เกิดเฟิร์ลไลต์ละเอียด และเกรนละเอียดเกิดได้น้อยจึงส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 12(A) สำหรับสภาวะการเชื่อมที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคเฟิร์ลไลต์ละเอียด มีการกระจายตัวกันอย่างหนาแน่น 68.42 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงการ

เกิดเพิร์ลไลต์ในลักษณะกลม (Spheroidized Pearlite)[24] เนื่องจากสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานที่เพียงพอทำให้อัตราการเย็นตัวสูงส่งผลให้เพิร์ลไลต์สามารถเกิดได้อย่างหนาแน่นละเอียด และเพิร์ลไลต์บางส่วนรวมตัวกันในลักษณะกลม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xue B. et al. [25] และ W. Hui et al. [26] ส่งผลทำให้วัสดุมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น



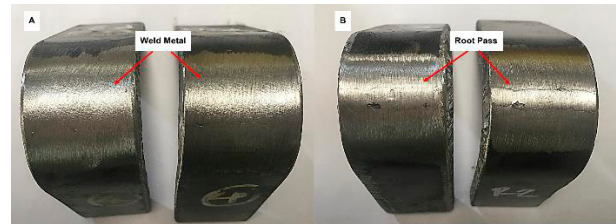
รูปที่ 13 แสดงลักษณะรอยแตกหักของ ASTM A537 class 1 (A) เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 22 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 27 เซนติเมตรต่อนาที (B)เชื่อมด้วยกระแสไฟ 360 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 27 เซนติเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 13 แสดงบริเวณรอยแตกหักหลังจากการทดสอบแรงดึง พบว่าเป็นการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) พบว่ามีช่องว่างขนาดเล็กที่เริ่มก่อตัวขึ้นบริเวณของรอยแตกมีลักษณะเป็นร่องหลุม (Dimple) [27] จากรูป 13(A) พบร่องหลุมขนาดใหญ่เนื่องจากลักษณะของเกรนในโครงสร้างจุลภาคที่มีขนาดใหญ่ รวมถึงโครงสร้างเพิร์ลไลต์ที่หยาบส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความเค้นแรงดึงที่ต่ำเมื่อทำการเปรียบเทียบกับสภาวะการเชื่อมดังรูปที่ 13(B) มีร่องหลุม (Dimple) ขนาดเล็กและปริมาณมาก เนื่องจากมีปริมาณเพิร์ลไลต์ที่มีความละเอียดหนาแน่นสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jesús Toribio et al. [28] และ M. Saadat et al. [29] ที่ได้ศึกษาถึงลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่มีผลกระทบต่อลักษณะการแตกของวัสดุในการเชื่อม ดังนั้นในสภาวะดังกล่าวจึงส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด

4.4) ผลการทดสอบการดัดโค้ง

การพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้า ASTM A537 class 1 สามารถทำนายได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม แต่ในการพิจารณาเลือกสภาวะที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาจากองค์ประกอบต่างๆ เช่น การศึกษาลักษณะการเกิดโครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบสภาวะการเชื่อมต่าง ๆ การ

พิจารณาสมบัติทางกล การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เป็นต้น ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล โดยเฉพาะอย่างยิ่งมาตรฐาน ASME BPVC Section IX - Welding, Brazing, and Fusing Qualifications ในการจัดทำผลการทดสอบกระบวนการเชื่อม (Procedure Qualification Record: PQR) ได้กำหนดการตรวจสอบแบบไม่ทำลายชนิดต่างๆ การทดสอบค่าความเค้นแรงดึง และการทดสอบการดัดโค้ง(Bend Test) สำหรับการทดสอบการดัดโค้งมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อม เช่น รอยแตก รอยยุบ เป็นต้น ทำการตรวจสอบผิวหน้า รอยเชื่อม (Face Bend Test) และตรวจสอบรอยราก (Root Bend Test) ก่อนที่จะเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการระบุ ในข้อกำหนดกระบวนการเชื่อม (Welding Procedure Specification: WPS) ต่อไปดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงชิ้นงานทดสอบการดัดโค้ง A บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม B บริเวณรากของรอยเชื่อม

จากรูปที่ 14 ชิ้นงานเชื่อมด้วยกระแสไฟ 360 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 27 เซนติเมตรต่อนาที เป็นสภาวะที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด พบว่าการทดสอบดัดโค้งผิวหน้ารอยเชื่อม (Face Bend Test) ไม่พบรอยแตก หรือรอยยุบบริเวณที่ทำการทดสอบการดัดโค้ง ดังรูปที่ 14(A) การทดสอบดัดโค้งบริเวณรากรอยเชื่อม(Root Bend Test) จากการตรวจสอบรอยแตก รอยยุบ พบว่าไม่ปรากฏสิ่งดังกล่าว ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ที่สภาวะการเชื่อมด้วยกระแสไฟ 360 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 27 เซนติเมตรต่อนาที เป็นสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมสามารถนำมาระบุข้อกำหนดกระบวนการเชื่อม (Welding Procedure Specification: WPS) สำหรับการเชื่อมภาชนะแรงดันสูงด้วยเหล็กกล้า ASTM A537 class 1 ต่อไป

5) สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง และแบบจำลองด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่น้อยสุด พบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง ได้แก่ แบบจำลองด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดน้อยสุดที่ 0.284 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม คือ 3-นิวรอน ในชั้นอินพุต 3 นิวรอน จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 14 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแอสตงผล 1 นิวรอน (3-14-1) การเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์กมาร์ค รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น คือ ลอจิกมอยด์ สำหรับชั้นนำเข้า ฟังก์ชันแทนซิมมอยด์ สำหรับชั้นซ่อน และฟังก์ชันเพียวรินสำหรับชั้นผลลัพธ์

สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เชื่อมด้วยกระแสไฟ 360 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 27 เซนติเมตรต่อนาที พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคเพิร์ลไลต์ละเอียด มีการกระจายตัวกันอย่างหนาแน่น 68.42 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงการเกิดเพิร์ลไลต์ในลักษณะกลม (Spheroidized Pearlite) เนื่องจากสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานที่เพียงพอทำให้อัตราการเย็นตัวสูงส่งผลให้เพิร์ลไลต์สามารถเกิดได้อย่างหนาแน่นละเอียด และเพิร์ลไลต์บางส่วนรวมตัวกันในลักษณะกลม ส่งผลให้วัสดุมีลักษณะการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) มีร่องหลุม (Dimple) ขนาดเล็กและปริมาณมาก การทดสอบดัดโค้งผิวหน้ารอยเชื่อม (Face Bend Test) และบริเวณรากรอยเชื่อม (Root Bend Test) ไม่พบรอยแตก หรือรอยยุบบริเวณที่ทำการทดสอบการดัดโค้ง โดยสภาวะการเชื่อมดังกล่าวชิ้นงานเชื่อมมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด สามารถนำมาระบุข้อกำหนดกระบวนการเชื่อม (Welding Procedure Specification: WPS) สำหรับการเชื่อมภาชนะแรงดันสูงด้วยเหล็กกล้า ASTM A537 Class 1 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพยากรณ์ ควบคุมคุณภาพของรอยเชื่อมให้ได้ค่าความเค้นแรงดึงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย บุคลากรภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปีงบประมาณ 2562 รวมถึงอุปกรณ์ในการสนับสนุนในการทำวิจัย

REFERENCES

- [1] W. H. Kearns, *Welding handbook metals and their weldability*, 7th ed. USA: American Welding Society, 1982.
- [2] R. L. O'Brien, *Welding handbook welding processes*, 8th ed. USA: American Welding Society, 1992.
- [3] The lincon electric company, *The Procedure Hand book of Arc Welding*, USA: The Lincoln Electric Company, 1995.
- [4] V. D. Kalyankar and G. Chudasama, "Effect of post weld heat treatment on mechanical properties of pressure vessel steels," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 11, Part 3, pp. 24675–24684, Jan. 2018.
- [5] B. Sadeghi, H. Sharifi, M. Rafiei, and M. Tayebi, "Effects of post weld heat treatment on residual stress and mechanical properties of GTAW: The case of joining A537CL1 pressure vessel steel and A321 austenitic stainless steel," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 94, pp. 396–406, Dec. 2018.
- [6] T. Chinnadurai, S. Saravanan, N. Prabakaran, M. Karthigai Pandian, and S. Deebika, "Analyzing the weld strength of ultrasonic polymer welding using Artificial Neural Networks," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 14, Part 2, pp. 28320–28327, Jan. 2018.
- [7] R. Vaira Vignesh and R. Padmanaban, "Artificial neural network model for predicting the tensile strength of friction stir welded aluminium alloy AA1100," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 8, Part 3, pp. 16716–16723, Jan. 2018.
- [8] K. Kamal Babu et al., "Parameter optimization of friction stir welding of cryorolled AA2219 alloy using artificial neural network modeling with genetic algorithm," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94, No. 9, pp. 3117–3129, Feb. 2018.
- [9] A. Sarkar, P. Dey, R. N. Rai, and S. C. Saha, "A comparative study of multiple regression analysis and back propagation neural network approaches on plain carbon steel in submerged-arc welding," *Sādhanā*, Vol. 41, No. 5, pp. 549–559, May 2016.

- [10] L. Yu, K. Saida, S. Hirano, N. Chigusa, M. Mochizuki, and K. Nishimoto, "Application of neural network-based hardness prediction method to HAZ of A533B steel produced by laser temper bead welding," *Welding in the World*, Vol. 61, No. 3, pp. 483–498, May 2017.
- [11] L. Srinivasan, M. C. Khan, T. D. B. Kannan, P. Sathiyaa, and S. Biju, "Application of Genetic Algorithm Optimization Technique in TIG Welding of 15CDV6 Aerospace Steel," *Silicon*, Vol. 11, No. 1, pp. 459–469, Feb. 2019.
- [12] M. W. Dewan, D. J. Huggett, T. Warren Liao, M. A. Wahab, and A. M. Okeil, "Prediction of tensile strength of friction stir weld joints with adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and neural network," *Materials & Design*, Vol. 92, pp. 288–299, Feb. 2016.
- [13] D. Zhao, D. Ren, K. Zhao, S. Pan, and X. Guo, "Effect of welding parameters on tensile strength of ultrasonic spot welded joints of aluminum to steel – By experimentation and artificial neural network," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 30, pp. 63–74, Dec. 2017.
- [14] V. V. Narayanareddy, N. Chandrasekhar, M. Vasudevan, S. Muthukumaran, and P. Vasantharaja, "Numerical Simulation and Artificial Neural Network Modeling for Predicting Welding-Induced Distortion in Butt-Welded 304L Stainless Steel Plates," *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 47, No. 1, pp. 702–713, Feb. 2016.
- [15] N. Pavan Kumar, P. K. Devarajan, S. Arungalai Vendan, and N. Shanmugam, "Prediction of bead geometry in cold metal transfer welding using back propagation neural network," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, No. 1, pp. 385–392, Oct. 2017.
- [16] The American Society of Mechanical Engineers, *Boiler and Pressure Vessel Section IX Welding, Brazing, and Fusing Qualifications*, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [17] B. Venugopal Rao, N. Aravindan, and K. Saraswathamma, "Experimentation of effect of process parameters on mechanical properties in SAW Process," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 13, Part 3, pp. 26961–26967, Jan. 2018.
- [18] American Welding Society, *AWS A5.17 Specification for Carbon Steel Electrodes and Fluxes for Submerged Arc Welding*, USA: American Welding Society, 2019.
- [19] American Society for Metal, *ASM Handbook Metallography and Microstructures*, Vol. 9, American Society for Metal, USA, 1985.
- [20] O. I. Abiodun, A. Jantan, A. E. Omolara, K. V. Dada, N. A. Mohamed, and H. Arshad, "State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey," *Heliyon*, Vol. 4, No. 11, p. e00938, Nov. 2018.
- [21] W.-B. Oh, T.-J. Yun, B.-R. Lee, C.-G. Kim, Z.-L. Liang, and I.-S. Kim, "A Study on Intelligent Algorithm to Control Welding Parameters for Lap-joint," *Procedia Manufacturing*, Vol. 30, pp. 48–55, Jan. 2019.
- [22] J.-Y. Shim, J.-W. Zhang, H.-Y. Yoon, B.-Y. Kang, and I.-S. Kim, "Prediction model for bead reinforcement area in automatic gas metal arc welding," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 8, pp. 1-9, Aug. 2018.
- [23] R.H. Myers, D.C. Montgomery, *Response Surface Methodology Process and Product Optimization using Designed Experiments*, 2nd ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2002.
- [24] D. Hauserova, J. Dlouh, and M. Kover "Pearlite Lamellae Spheroidisation During Austenitization and Subsequent Temperature Hold", *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 62, No. 1, pp. 201-204, 2017.
- [25] X. Bai, S. Wu, and P. K. Liaw, "Influence of thermo-mechanical embrittlement processing on microstructure and mechanical behavior of a pressure vessel steel," *Materials & Design*, Vol. 89, pp. 759–769, Jan. 2016.
- [26] W. Hui, Y. Zhang, X. Zhao, N. Xiao, and F. Hu, "High cycle fatigue behavior of V-microalloyed medium carbon steels: A comparison between bainitic and ferritic-pearlitic microstructures," *International Journal of Fatigue*, Vol. 91, pp. 232–241, Oct. 2016.
- [27] W. Yun, B. Philip, X. Zhenying, and W. Junfeng, "Study on fatigue crack growth performance of EH36 weldments by laser shock processing," *Surfaces and Interfaces*, Vol. 15, pp. 199–204, Jun. 2019.
- [28] J. Toribio, B. González, J.-C. Matos, and F.-J. Ayaso, "Influence of Microstructure on Strength and Ductility in Fully Pearlitic Steels," *Metals*, Vol. 6, No. 12, p. 318, Dec. 2016.
- [29] M. Saadati, A. K. Edalat Nobarzad, and M. Jahazi, "On the hot cracking of HSLA steel welds: Role of epitaxial growth and HAZ grain size," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 41, pp. 242–251, May 2019.