

# แบบจำลองคณิตศาสตร์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองและวิธีโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับทำนายผลแรงดึงเหนือนและขนาดน้กเกิดสำหรับเหล็กเคลือบสังกะสี JIS G3313 ที่ผ่านการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด

พีรวิฑูลี เล้าภายิต<sup>1</sup> ปรัชชญา เพ็ญสุระ<sup>1\*</sup>

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและวิเคราะห์รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง โดยออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง และแบบจำลองด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม ในการทำนายค่าแรงดึงเหนือนและขนาดน้กเกิดสำหรับการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดในเหล็กเคลือบสังกะสี JIS G3313 ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้า เวลา และแรงกดอเล็กโทรดในการเชื่อม หลังจากทำการเชื่อมได้มีการทดสอบแรงดึงเหนือน การวัดขนาดน้กเกิด และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการวิจัยพบว่าสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ เวลาในการเชื่อม 9 ไซเคิล และแรงกดอเล็กโทรด 1.5 กิโลนิวตัน ส่งผลให้มีค่าแรงดึงเหนือน มีขนาดน้กเกิดตามเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐาน JIS Z3140:2017 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนมีเกรนของเฟอร์ไรท์ เฟอร์ไรท์ละเอียด และหนาแน่น บริเวณน้กเกิดเกิดโครงสร้างเฟอร์ไรท์รูปเข็มที่มีความละเอียด จึงส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีความแข็งแรงสูง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โดยโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายค่าแรงดึงเหนือน คือ ชั้นอินพุตจำนวน 3 นิวรอน ชั้นซ่อนจำนวน 10 นิวรอน และชั้นแสดงผลจำนวน 1 นิวรอน (3-10-1) ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่ 0.0026 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.956 สำหรับทำนายขนาดน้กเกิด ชั้นอินพุตจำนวน 3 นิวรอน ชั้นซ่อนจำนวน 5 นิวรอน และชั้นแสดงผลจำนวน 1 นิวรอน (3-5-1) ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่ 0.0004 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.958 โดยงานวิจัยนี้ภาคอุตสาหกรรมการผลิตสามารถนำข้อมูลวิจัย และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปใช้เพื่อพยากรณ์ ควบคุมคุณภาพของรอยเชื่อมให้ได้ค่าแรงดึงเหนือน และขนาดน้กเกิดตามเกณฑ์การยอมรับต่อไป

**คำสำคัญ :** แบบจำลองคณิตศาสตร์, วิธีพื้นผิวตอบสนอง, วิธีโครงข่ายประสาทเทียม, การเชื่อมความต้านทานชนิดจุด, เหล็กเคลือบสังกะสี

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: Prachya.pea@kmutt.ac.th, รับเมื่อ 24 มิถุนายน ตอบรับ 20 กันยายน 2562

# Mathematic Model by Response Surface Methodology and Artificial Neural Network for Predict Result of Tensile Shear and Nugget Size of Zinc Coated Steel JIS G3313 Welded by Resistance Spot Welding

Peerawut Laophasit<sup>1</sup> Prachya Peasura<sup>1\*</sup>

## Abstract

This research described to the determine an optimization mathematic model using response surface methodology in central composite design method and artificial neural network (ANN) for predicting the of tensile shear and nugget size in the zinc coated steel JIS G3313. The following resistance spot welding (RSW) parameters were studied: the welding current, welding time, and electrode force. The resulting materials were examined using tensile shear tests which were observed nugget size and microstructure with scanning electron microscopy (SEM). The microstructure phenomenon could be explained by the welding optimum condition that fine pearlite and intensity in heat affected zone. The research results reveal that an optimum RSW parameters were welding current of 12 kilo amperes, welding time of 9 cycle and 1.5 kilo newton electrode force. The fine acicular ferrite occurred in the nugget size, which results in increased welding material high mechanical property. The ANN model with the proposed mathematical model, which tensile shear represents 3 neurons for the input 10 neurons for 1 hidden layer and 1 output neurons (3-10-1). The ANN model was developed to establish of the nugget predict represents 3 neurons for the input 5 neurons for 1 hidden layer and 1 output neurons (3-5-1). The mean square error (MSE) and coefficient of determination ( $R^2$ ) for tensile shear predict was showed that of 0.0026 and 0.956 respectively, which nugget size predicted MSE of 0.0004 and  $R^2$  of 0.958. This research, the related manufacturing sector can use research data and mathematical models was used to predict and quality control of the RSW processes to obtain tensile shear and the nugget size according to the acceptance criteria.

**Keywords:** Mathematic Model, Response Surface Methodology, Artificial Neural Network, Resistance Spot Welding, Zinc Coated Steel

---

<sup>1</sup> Department of Production Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut University of Technology Thonburi

\* Corresponding author, E-mail: Prachya.pea@kmutt.ac.th, Received: 24 June 2019 Accepted: 20 September 2019

## 1. บทนำ

เหล็กเคลือบสังกะสี JIS G3313 เป็นวัสดุที่นิยมใช้เชื่อมประกอบตัวถังในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากสมบัติเด่นของวัสดุในด้านการเชื่อม สามารถป้องกันสนิมและการขีดเกาะที่ดี การเลือกใช้การเชื่อมความต้านทานชนิดจุดในภาคอุตสาหกรรมเนื่องจากสามารถเชื่อมประกอบเป็นชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว ผลกระทบทางความร้อนมีน้อย มีความแข็งแรงเพียงพอกับการใช้งาน [1] ขนาดของรอยเชื่อมที่เล็กและมีสมบัติทางกลที่แข็งแรงตามมาตรฐานที่กำหนดในด้านของการออกแบบโครงสร้าง เทคนิคการออกแบบรถยนต์สมัยใหม่ Toyota New Global Architecture (TNGA) เป็นแนวคิดที่ออกแบบมาเพื่อสร้างความมั่นคงของรถยนต์จากโครงสร้างที่แข็งแรง ด้วยการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมบนตัวรถเพื่อช่วยรองรับแรงบิดที่มีต่อตัวถังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทรงตัวและเกาะถนน [2] การเชื่อมความต้านทานชนิดจุด (Resistance Spot Welding, RSW) เป็นการเชื่อมแบบต่อเกย (Lap Joint) โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงาน คือ อิเล็กโทรดตัวบนเคลื่อนที่ลงมา กดชิ้นงานสองชิ้นให้ติดกัน ปล่อยกระแสไฟฟ้า กดอัดชิ้นงาน กดค้างไว้ และปลดชิ้นงาน การเชื่อมความต้านทานชนิดจุด มีปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลของรอยเชื่อมอยู่ 3 ปัจจัย คือ แรงกดที่หัวอิเล็กโทรด เวลา และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม [3]

การเชื่อมความต้านทานชนิดจุดในภาคอุตสาหกรรม การผลิตยังพบปัญหาจากการเลือกใช้พารามิเตอร์ในการเชื่อมที่ยังไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดปัญหาในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดแบบต่างๆ เช่น การเกิดการกระจายของน้ำโลหะขณะเชื่อม การแตกร้าวในรอยเชื่อม และการหลอมที่ไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อม [4]

ปัญหาในการเชื่อมดังกล่าวนี้ภาคอุตสาหกรรมไม่ประสงค์ให้เกิดขึ้น เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นในผลิตภัณฑ์ซึ่งกระทบต่อธุรกิจอย่างรุนแรง การพิจารณาถึงความเหมาะสมและคุณภาพของรอยเชื่อมหรือบริเวณที่เกิดการหลอมละลายของรอยเชื่อมพิจารณาถึงค่าแรงดึงเฉือน ขนาดนิกเกต (Nugget Size) หรือบริเวณที่เกิดการหลอมละลายของรอยเชื่อม [5] ตามมาตรฐาน JIS Z3140:2017 เป็นวิธีการทดสอบและเกณฑ์การยอมรับสำหรับเหล็กคาร์บอนต่ำ [6] งานวิจัยของ Cameron et al. [7] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการประเมินคุณภาพของการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด โดยคุณภาพของชิ้นงานเชื่อมขึ้นกับขนาดนิกเกตและค่าแรงดึงเฉือน รายงานวิจัยของ Aravinthan et al. [8] ได้ออกแบบการทดลองทางทฤษฎีในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดสำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าที่มีความหนาต่างกันพบว่ากระแสไฟฟ้า และเวลาในการเชื่อมมีผลต่อแรงดึงเฉือนและขนาดนิกเกต Haiqiang et al. [9] ได้จัดทำข้อกำหนดการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดที่เหมาะสม โดยวิธีการ Isotropic Microstructure with Penalization (SIMP) สำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายของการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดได้มีความพยายามในการนำเครื่องมือวัดชนิดต่างๆ มาทำการประยุกต์ใช้แต่ยังมีข้อจำกัดหลายประการดังรายงานวิจัยของ Kang et al. [10] ได้ทำการรายงานภาพรวมของความก้าวหน้าล่าสุดของการวิเคราะห์กระบวนการและการควบคุมคุณภาพในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดที่ได้มีความพยายามนำระบบสัญญาณเข้ามาเพื่อควบคุมคุณภาพแต่ในทางปฏิบัติมีข้อจำกัดค่อนข้างมาก

จากรายงานการวิจัยจะเห็นได้ว่าขนาดนิกเกต และค่าแรงดึงเฉือนมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการบ่ง

บอกถึงคุณภาพงานเชื่อม สำหรับการทำการตรวจสอบคุณภาพของค่าแรงดึงเหนือ และขนาดนักเกตจำเป็นต้องทำการตรวจสอบแบบทำลาย ซึ่งจะต้องมีขั้นตอนในการทดสอบที่ยุ่งยาก อีกทั้งในการปฏิบัติงานจะไม่สามารถนำชิ้นงานที่เชื่อมแล้วมาทำการตรวจสอบได้ โดยมีงานวิจัยต่างๆที่ได้ประยุกต์ใช้วิธีการต่างๆเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และหาความเหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด เช่นวิเคราะห์การลดรอยเชิงเส้น โดยการประมาณค่าของสัมประสิทธิ์ในสมการลดรอยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด แต่ในการทำนายคุณภาพของกระบวนการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด ได้แก่ ขนาดนักเกต และค่าแรงดึงเหนือ ความสัมพันธ์ของปัจจัยซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำให้การวิเคราะห์การลดรอยมีการพยากรณ์ที่คลาดเคลื่อนสูง ต่อมาวิธีวิธีการที่พัฒนาการสร้างแบบจำลอง โดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบหลักการทำงานของสมองมนุษย์เพื่อใช้ประโยชน์ในการทำนายเหตุการณ์จากข้อมูลที่มีอยู่ จากรายงานของ Thongchai et al. [11] ได้หาความเหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมในการเชื่อมอลูมิเนียมสำหรับ Darshan and Dhaval [12] ได้ประยุกต์ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายความแข็งแรงในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด Hamed et al. [13] ได้ทำการสร้างโมเดลและหาความเหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด โดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบวิธีโครงข่ายประสาทเทียมวิธีมัลติเจนนิติกแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโมเดล Fahim et al. [14] ได้นำข้อมูล

ขนาดของนักเกตวิเคราะห์เพื่อสร้างโมเดลโดยใช้โมเดลดิซันท์รีอัลกอริทึม Kuanfang He and Xuejun Li [15] ได้ใช้เทคนิคการประมาณค่าเชิงปริมาณสำหรับประเมินคุณภาพการเชื่อมโดยใช้ซอฟต์แวร์แมชชีน B. S. Gawai [16] และคณะได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ และหาความเหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้า HR E-34 โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง โดยใช้การออกแบบบ็อกซ์-เบนเคน F. A. Ghazali [17] และคณะได้หาความเหมาะสมในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดโดยใช้วิธีการทาคูชิและวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) F. Mirzaei [18] และคณะได้ทำการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีพื้นผิวตอบสนองสำหรับการเชื่อมเหล็กเคลือบสังกะสี

จากปัญหาและงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่ได้มีงานวิจัยที่ได้ทำศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง โดยออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) และแบบจำลองด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดในเหล็กเคลือบสังกะสี JIS G3313 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าแรงดึงเหนือและขนาดนักเกต จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง และเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดในเหล็กเคลือบสังกะสี JIS G3313 โดยงานวิจัยนี้ภาคอุตสาหกรรมการผลิตที่เกี่ยวข้อง สามารถนำข้อมูลวิจัย และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไป

ประยุกต์ใช้เพื่อพยากรณ์ ความคมคุณภาพของรอยเชื่อม ให้ได้ค่าแรงดึงเฉือน และขนาดนั้กเกิดตามเกณฑ์มาตรฐานการยอมรับ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานต่อไป

**2. วิธีการดำเนินการวิจัย (Methodology)**

**2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย**

วัสดุที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัย คือ เหล็กเคลือบสังกะสี JIS G3313 เป็นเหล็กกล้า (Iron, Fe) ที่ผ่านกระบวนการเคลือบสังกะสี (Zinc, Zn) แบบจุ่มร้อนและอบเพื่อเร่งให้เกิดชั้นของสารประกอบ Zn-Fe ที่ผิวชั้นเคลือบมีความหนา 1 มิลลิเมตร มีลักษณะสีเทาด้าน สม่่าเสมอไม่มีลวดลาย มีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กเคลือบสังกะสี JIS G3313 (Weight %)

C	Mn	Al	Cr	P	S
0.043	0.271	0.054	0.047	0.006	0.007

**2.2 การกำหนดปัจจัยสำหรับการวิจัย**

การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลองสำหรับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อที่จะนำผลจากการทดลองมาวิเคราะห์ โดยอ้างอิงหลักการทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตามมาตรฐานที่ใช้ ซึ่งจะก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ๆ ขึ้นจาก

การวิจัยในครั้งนี้ ได้กำหนดปัจจัยหลักและปัจจัยตอบสนองดังนี้

ปัจจัยหลัก คือ ปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนไประหว่างการทดลอง ปัจจัยชนิดนี้มีผลต่อผลการทดลองค่อนข้างมาก ซึ่งมีอยู่ 3 ปัจจัย คือ แรงกดของอิเล็กโทรด (Electrode Force) เวลาที่ใช้ในการเชื่อม (Welding Time) และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม (Welding Current) ปัจจัยตอบสนอง คือ ปัจจัยที่ปรับเปลี่ยนไปตามปัจจัยหลัก เป็นปัจจัยที่เกิดจากการทดลองและบันทึกผลได้แก่ ค่าแรงดึงเฉือน (Tensile Shear) และ โครงสร้างมหภาคเพื่อหาขนาดนั้กเกิด (Nugget Size)

**2.3 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง**

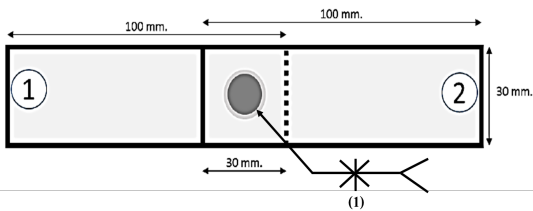
การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการทำนายผลค่าแรงดึงเฉือนและขนาดนั้กเกิดของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดบนเหล็กเคลือบสังกะสี JIS G3313 ได้ออกแบบการทดลองตามรูปการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ที่มี 3 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 5 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนั้นจึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 หน่วยการทดลอง และมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง จำนวนหน่วยการทดลองทั้งหมด 60 หน่วยการทดลอง

**ตารางที่ 2** การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

Factors	Symbol	Level					Unit
		- $\alpha$	-1	0	1	$\alpha$	
Electrode Force	$X_1$	1.5	1.75	2.00	2.25	2.50	kN
Welding Time	$X_2$	9	10	11	12	13	Cycle
Welding Current	$X_3$	8	9	10	11	12	kA

**2.4 การเชื่อมความต้านทานชนิดจุด**

การเชื่อมเหล็ก JIS G3313 ด้วยเครื่องเชื่อมความต้านทานชนิดจุด Model S1-6-355 ใช้ไฟฟ้าแบบสามเฟส ชนิดไฟฟ้าเชื่อมแบบกระแสสลับ ความถี่ 50 เฮิรท์ แรงกดสูงสุด 5.9 กิโลนิวตัน กระแสไฟฟ้าสูงสุด 16,500 แอมแปร์ ระบายความร้อนด้วยน้ำ และกดชิ้นงานด้วยระบบนิวส์แมคคิก ทำการเชื่อมชิ้นงานตามลำดับการทดลองแบบ CCD การเชื่อมชิ้นงานเป็นลักษณะการเชื่อมต่อเกยแบบ 1 ชั้น ทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน JIS Z3136:1999 [19] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงขนาดชิ้นงานเชื่อมตามมาตรฐาน JIS Z3139

**2.5 การทดสอบแรงดึงเฉือน**

การทดสอบแรงดึงเฉือนนำชิ้นงานทดลองทั้งหมด 60 ชิ้นมาทดสอบ โดยทดสอบค่าแรงดึงเฉือนของชิ้นงานทีละชิ้นตามลำดับด้วยแรงดึงคงที่ 10 มิลลิเมตร ต่อนาที เมื่อเครื่องทดสอบดึงชิ้นงานแต่ละชิ้นจนเกิดรอยฉีกขาดออกจากกันจึงจะหยุดดึง

**2.6 การวัดขนาดน้กเกิด**

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการวัดขนาดน้กเกิดภายหลังที่มีการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย จากนั้นขัดด้วยผงอลูมินาและมากัดชิ้นรอยโดยใช้กรดมีส่วนผสมคือ HF 7.5 มิลลิตร, HNO<sub>3</sub> 2.5 มิลลิตรและ Methanol 200 มิลลิตร ใช้เวลาในการกัดชิ้นรอยเป็นเวลา 30 วินาที วัดขนาดน้กเกิดด้วยกล้อง Measurement

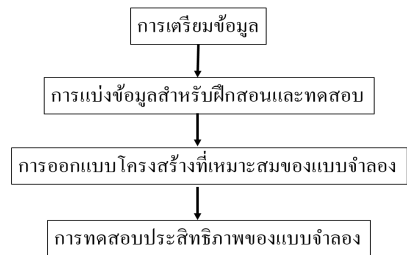
Microscope ใช้กำลังขยาย 0.7 เท่า ได้หน่วยเป็น มิลลิเมตร และทำการบันทึกผล

**2.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนส่องกราด**

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน และขนาดน้กเกิด เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยในการเชื่อมต่อโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น รวมถึงการวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงเฉือน โดยใช้กำลังขยาย 1,000 - 5,000 เท่า

**2.8 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม**

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2 ลำดับการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

**2.8.1. การเตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและทดสอบ**

การเตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและทดสอบ ค่าน้ำหนักและไบแอสเริ่มต้น ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยข้อมูลป้อนเข้าและข้อมูลส่งออก มีข้อมูลทั้งหมด 60 ข้อมูล โดยแปลงข้อมูลให้มีค่าระหว่าง 0-1 โดยใช้สมการ (1)

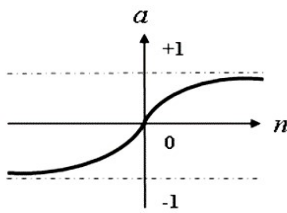
$$X = 0.1 + (X_i / (1.2 \times X_{max})) \tag{1}$$

โดยที่ x คือข้อมูลที่ได้รับการแปลงค่า

X<sub>i</sub> คือ ข้อมูลการทดลองที่ i

X<sub>max</sub> คือ ข้อมูลการทดลองที่มีค่ามากที่สุด

กำหนดจำนวนรอบในการวนซ้ำ (Epoch)=1,000 สำหรับฟังก์ชันถ่ายโอนในงานวิจัยนี้เลือกใช้ฟังก์ชันแทน-ซิกมอยด์ (Tan-Sigmoid) ดังรูปที่ 3 [20] สำหรับฟังก์ชันการถ่ายโอนในชั้นซ่อนหนึ่ง และชั้นแสดงผล โดยฟังก์ชันแทน-ซิกมอยด์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 3 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแทน-ซิกมอยด์[20]

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

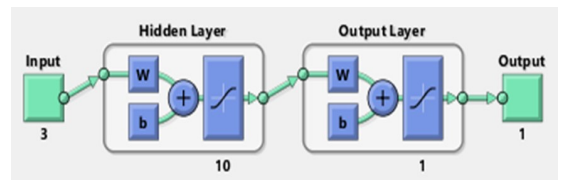
**2.8.2 การแบ่งข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบ**

งานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกการแบ่งชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบเป็นวิธีแบบไขว้ เนื่องจากชุดข้อมูลที่ออกแบบการทดลองมีความเหมาะสม และเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับข้อมูล โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 ชุดเท่ากันแบบสุ่ม จากนั้นทำการคำนวณค่าความผิดพลาดในโครงข่ายประสาทเทียม 5 รอบ โดยแต่ละรอบการคำนวณของข้อมูลทั้งหมด 12 ชุด จัดเป็นข้อมูลสำหรับฝึกสอน 11 ชุดและข้อมูลสำหรับทดสอบ 1 ชุด

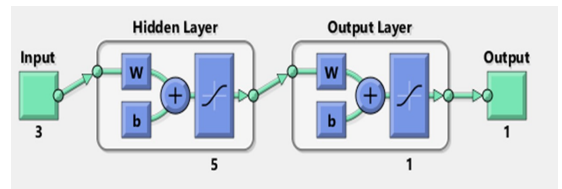
**2.8.3 การออกแบบโครงสร้างสำหรับแบบจำลอง**

จากการออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม งานวิจัยได้ระบุจำนวนชั้น 1 ชั้น จำนวนนิวรอนทั้งหมด 10 รูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบมี จำนวนนิวรอนที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าแรงดึงเดือน คือ 3-10-1 ประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในชั้นอินพุต 3 นิวรอน จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่

หนึ่ง 10 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0612 สำหรับโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายขนาดนักเกตที่เหมาะสม คือ 3-5-1 ประกอบด้วยนิวรอนในชั้นอินพุต 3 นิวรอน จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่หนึ่ง 5 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอนมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0103 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 โครงข่ายประสาทเทียมของการทำนายค่าแรงดึงเดือน



รูปที่ 5 โครงข่ายประสาทเทียมของการทำนายค่าขนาดนักเกต

**2.8.4 การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง**

การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง ในโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการพิจารณา ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ดังแสดงในสมการ (3) และ (4)

สมการที่ 2 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{N} \quad (3)$$

สมการที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R<sup>2</sup>)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - A)^2} \quad (4)$$

โดยที่ T คือ ผลลัพธ์เป้าหมาย

A คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนาย

N คือ จำนวนข้อมูล

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

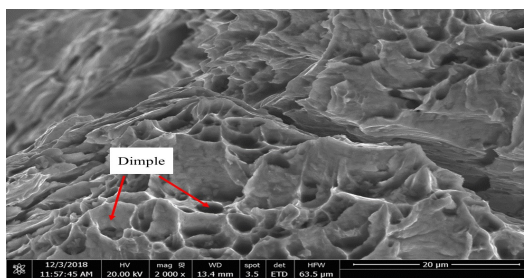
#### 3.1 ผลการทดสอบงานเชื่อม

ชิ้นงานหลังจากการเชื่อมตามการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง รูปแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง จำนวนชิ้นงานทั้งหมด 60 ชิ้น จำนวน 2 ชุด เพื่อทำการทดสอบค่าแรงดึงเฉือน และขนาดนักรแตก โดยค่าที่ได้จะนำมาทำการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

##### 3.1.1 ผลการทดสอบค่าแรงดึงเฉือน

ผลการสอบค่าแรงดึงเฉือนของชิ้นงาน พบว่าค่าแรงดึงเฉือนสูงสุด คือ 6.792 กิโลนิวตัน เมื่อใช้แรงกดคดเล็กโทรด 1.5 กิโลนิวตัน เวลาที่ในการเชื่อม 9 ไซเคิล และกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ สำหรับค่าแรงดึงเฉือนต่ำสุด คือ 5.437 กิโลนิวตัน เมื่อใช้แรงกดคดเล็กโทรด 2.00 กิโลนิวตัน เวลาที่ในการเชื่อม 11 ไซเคิล และกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 8 กิโลแอมแปร์ การตรวจสอบรูปแบบการเสียหายของชิ้นงานที่มีค่าแรงดึงเฉือนสูงสุดที่บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน การวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการนิกขาด พบว่าชิ้นงานที่ได้รับ

แรงดึงเฉือนสูงสุดจะพบผิวแตกที่สามารถวิเคราะห์ที่ความเสียหายลักษณะเฉพาะของผิวแตกได้เป็นชนิด Ratchet Marks ซึ่งลักษณะของผิวแตกสามารถบ่งชี้ถึงทิศทางของการขยายตัวของรอยแตกลักษณะของ Dimple ที่เกิดขึ้นได้ โดยจะมีลักษณะขีดขาวในแนวตั้ง ซึ่งเป็นแนวเดียวกับการทดสอบแรงดึงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะผิวแตกแบบ Dimple ที่สภาวะการเชื่อมกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 9 ไซเคิล แรงกดคดเล็กโทรด 1.5 กิโลนิวตัน

จากรูปที่ 6 ลักษณะผิวแตกแบบ Dimple จากสภาวะการเชื่อมที่มีค่าแรงดึงเฉือนสูงสุด พบว่ามีช่องว่างขนาดเล็ก (Void) และหลุม (Dimple) จำนวนมากและพบการเริ่มต้นของรอยแตกแบบเหนียวมีลักษณะการแตกจากบริเวณจุดบกพร่องของวัสดุ บริเวณช่องว่างขนาดเล็กและสิ่งเจือปน วัสดุเหนียวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรทำให้ช่องว่างขนาดเล็กมีการรวมตัวกัน (Void Coalescence) กลายเป็น รอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) และขยายไปเป็นรอยร้าวขนาดใหญ่จนเกิดการแตกหัก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yixi Z. และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการแตกหักในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด



**3.1.2 ผลการวัดขนาดนั้กเกิด**

ขนาดของนั้กเกิดเป็นข้อำหนดคุณภาพของการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดตามมาตรฐาน JIS Z3140:2017 โดยมีการวัดขนาดนั้กเกิดดังรูปที่ 7



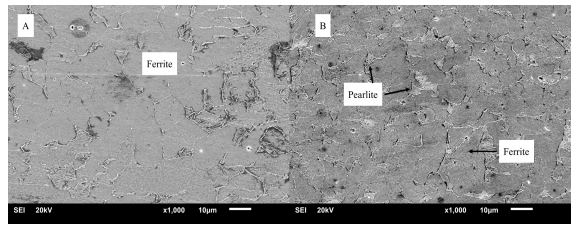
**รูปที่ 7** โครงสร้างมหภาคบริเวณนั้กเกิด (Nugget Size) และเขตอิทธิพลความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ)

ผลการลองวัดขนาดนั้กเกิดในชิ้นงานเชื่อมพบว่าสภาวะการเชื่อมเมื่อใช้แรงกดอเล็กโตรด 1.5 กิโลนิวตัน เวลาในการเชื่อม 9 ไซเคิล และกระแสที่ใช้ในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ ส่งผลให้มีขนาดนั้กเกิดใหญ่สุด คือ 6.611 มิลลิเมตร เนื่องจากสภาวะการเชื่อมดังกล่าวมีปริมาณความร้อนเข้าในชิ้นงานสูง ส่งผลให้มีขนาดนั้กเกิดขนาดใหญ่ที่สุด แต่สภาวะการเชื่อมดังกล่าวมีการหลอมละลายลึก 72 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังไม่ได้เกินเกณฑ์การหลอมละลายลึกตามมาตรฐานกำหนดที่ไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ [22] สำหรับชิ้นงานเชื่อมที่มีขนาดนั้กเกิดน้อยที่สุด คือ 4.841 มิลลิเมตร เมื่อใช้แรงกดอเล็กโตรด 2.25 กิโลนิวตัน เวลาที่ในการเชื่อม 10 ไซเคิล และกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 9 กิโลแอมแปร์

**3.1.3 โครงสร้างจุลภาค**

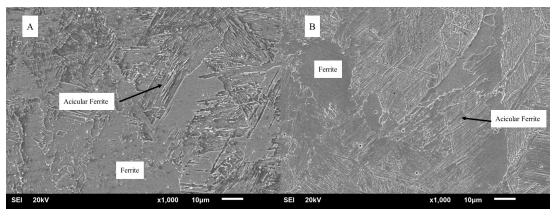
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนและบริเวณนั้กเกิด รวมถึงวิเคราะห์ความเสียหายของชิ้นงานภายหลังจากการทดสอบแรงดึง ด้วย

กล้องจุลทรรศน์อเล็กโตรนแบบส่องกราด



**รูปที่ 8** โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อเล็กโตรนแบบส่องกราด บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (A) กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 13 ไซเคิล และแรงกดอเล็กโตรด 2.0 กิโลนิวตัน (B) กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ (ผู้ประเมิน 1 ข้อ 40) เวลาเชื่อม 9 ไซเคิล แรงกดอเล็กโตรด 1.5 กิโลนิวตัน

จากรูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคในชิ้นงานเชื่อมบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน พบว่ามีโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไรต์ โดยที่สภาวะการเชื่อมที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 13 ไซเคิล และแรงกดอเล็กโตรด 2.0 กิโลนิวตัน พบว่าชิ้นงานเชื่อมมีขนาดเกรนที่ใหญ่ มีเพิร์ลไรต์หยาบบริเวณขอบเกรนเนื่องจากเกิดสภาวะที่มีปริมาณความร้อนมากเกินไป (Overheat) จึงส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีค่าแรงดึงเลื่อนต่ำแสดงในรูปที่ 8 (A) สำหรับสภาวะการเชื่อมที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 9 ไซเคิล แรงกดอเล็กโตรด 1.5 กิโลนิวตัน เป็นสภาวะในการเชื่อมที่เหมาะสมจึงทำให้โครงสร้างจุลภาคมีเกรนของเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไรต์ละเอียดแต่มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอกัน รวมถึงมีความหนาแน่นเพิร์ลไรต์มาก จึงส่งผลให้วัสดุเชื่อมมีค่าแรงดึงเลื่อนสูง แสดงในรูปที่ 8 (B)



**รูปที่ 9** โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริเวณ นักเกิด (A) กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 13 ไซเคิล และแรงกดอิเล็กโทรด 2.0 กิโลนิวตัน (B) กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 9 ไซเคิล แรงกดอิเล็กโทรด 1.5 กิโลนิวตัน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมบริเวณนักเกิด ที่มีสภาวะการเชื่อมที่ต่างกันพบว่าโครงสร้างเฟอไรต์รูปเข็ม (Acicular Ferrite) ที่มักเกิดขึ้นในบริเวณรอยเชื่อมสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีสภาวะอัตราการเย็นตัวต่ำ [23] ในสภาวะการเชื่อมที่มีปริมาณความร้อนเข้าในชิ้นงานที่มากเกินไปจะพบว่าลักษณะเฟอไรต์รูปเข็มมีขนาดที่ใหญ่ และหยาบ ดังรูปที่ 9[A] สำหรับสภาวะการเชื่อมดังรูปที่ 9[B] พบว่าเกิดโครงสร้างเฟอไรต์รูปเข็มที่มีความละเอียดมาก [24] เนื่องจากปริมาณความร้อนเข้าในชิ้นงานเชื่อมที่มีความเหมาะสมส่งผลให้บริเวณนักเกิดมีความแข็งแรงสูง

**3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง**

การพิจารณาคุณภาพของการเชื่อมความต้านทานชนิดจุดสำหรับทุกมาตรฐาน จะต้องมีการพิจารณาจากสองตัวชี้วัด ได้แก่ ค่าแรงดึงเฉือน ขนาดนักเกิด และเปอร์เซ็นต์การหลอมละลายลึก ซึ่งจะต้องอยู่ตามเกณฑ์มาตรฐาน JIS Z3140:2017

โดยในงานวิจัยได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง โดยใช้รูปแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

**3.2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าแรงดึงเฉือน และขนาดนักเกิด จะพิจารณารูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ด้วยกัน 4 รูปแบบ ได้แก่

1. รูปแบบจำลอง Full Quadratic
2. รูปแบบจำลอง Linear และ Interaction
3. รูปแบบจำลอง Linear และ Squares
4. รูปแบบจำลอง Linear

โดยการพิจารณาเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุด จะพิจารณาจากค่า  $R^2$ ,  $R^2_{adj}$ , ค่า P-Value ของ Regression และ ค่า P-Value ของ Lack-of-Fit ระหว่างแบบจำลองของ Full Quadratic, Linear + Interaction, Linear + Squares และ Linear [25] โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากแบบจำลองทุกรูปแบบ ทุกการทดลอง พบว่ารูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมได้แก่ รูปแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง (Full Quadratic) มาใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลในระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$  โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

จากตารางที่ 3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองแบบเต็มรูปแบบยกกำลังสอง พบว่าค่า P-Value ของ Regression เท่ากับ 0.000 ซึ่ง  $< 0.05$  ( $\alpha$ ) จึงสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยในแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และอย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย  $X_1, X_2, X_3$  หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากค่า P-Value ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.764 ซึ่ง  $> 0.05$  ( $\alpha$ )

สรุปว่าแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองมีความพอเพียง แบบจำลองในเทอมให้ค่า R<sup>2</sup> เท่ากับ 92.19% และค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 90.78% จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ

แบบจำลองสมการคณิตศาสตร์เต็มรูปแบบยกกำลังสอง ของค่าแรงดึงเฉือนได้ดังนี้

$$Y_{TS} = 1.546 - 0.577(X_1) - 0.039(X_2) + 0.748(X_3) + 0.089(X_1)^2 + 0.039(X_2)^2 + 0.019(X_3)^2 + 0.016(X_1)(X_2) - 0.019(X_1)(X_3) - 0.078(X_2)(X_3) \quad (5)$$

โดยมีข้อจำกัดการใช้สมการที่ X<sub>1</sub> ระหว่าง 1.5- 2.5 กิโลนิวตัน, X<sub>2</sub> ระหว่าง 9.0- 13.0 ไซเคิล และ X<sub>3</sub> ระหว่าง 8.0 - 12.0 และ กิโลแอมแปร์ เมื่อ

Y<sub>TS</sub> = ค่าแรงดึงเฉือน (กิโลนิวตัน, kN)

X<sub>1</sub> = แรงกดที่หัวอิเล็กโทรด (กิโลนิวตัน, kN)

X<sub>2</sub> = เวลาที่ใช้ในการเชื่อม (ไซเคิล, Cycle)

X<sub>3</sub> = กระแสที่ใช้ในการเชื่อม (กิโลแอมแปร์, kA)

สำหรับแบบจำลองสมการคณิตศาสตร์ของค่าแรงดึงเฉือนมีข้อพิจารณาการใช้งาน เมื่อต้องการให้ค่าแรงดึงเฉือนสูงสุด ควรใช้แรงกดที่หัวอิเล็กโทรดที่ 1.5 กิโลนิวตัน เวลาในการเชื่อมที่ 9 ไซเคิล กระแสที่ใช้ในการเชื่อมให้อยู่ที่ 12 กิโลแอมแปร์ จะทำให้ได้ค่าแรงดึงเฉือนที่ 6.851 กิโลนิวตัน โดยสามารถเพิ่มหรือลดแรงกดที่หัวอิเล็กโทรด เวลาและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมได้ แต่ควรมีการพิจารณาขนาดน้กเกิด และการหลอมละลายลึกลงไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ ตามเกณฑ์มาตรฐานประกอบด้วย เนื่องจากค่าแรงดึงเฉือนจะมีความสัมพันธ์กับขนาดน้กเกิดซึ่งจะทำให้สามารถ

เลือกใช้ค่าแรงดึงเฉือนและขนาดน้กเกิดที่เหมาะสมตามต้องการได้ต่อไป

จากตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสอง พบว่าสมการในเทอมเต็มรูปแบบยกกำลังสอง ให้ค่า R<sup>2</sup> เท่ากับ 94.32% และค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 93.30% จึงเป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่น่าพอใจ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการแบบเต็มรูปแบบยกกำลังสอง ค่า P-Value ของ Regression เท่ากับ 0.000 ซึ่ง < 0.05 (α) จึงสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยในเทอมเต็มรูปแบบยกกำลังสองมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และอย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ จากค่า P-Value ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.960 ซึ่ง > 0.05 (α) สรุปว่าสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสองมีความพอเพียง

สมการคณิตศาสตร์เต็มรูปแบบยกกำลังสองของขนาดน้กเกิด ได้ดังนี้

$$Y_N = 71.046 - 22.912(X_1) - 4.256(X_2) - 4.252(X_3) + 1.646(X_1)^2 + 0.155(X_2)^2 + 0.145(X_3)^2 + 0.650(X_1)(X_2) + 0.928(X_1)(X_3) - 0.031(X_2)(X_3) \quad (6)$$

เมื่อ

Y<sub>N</sub> = ขนาดน้กเกิด (มิลลิเมตร, mm)

X<sub>1</sub> = แรงกดที่หัวอิเล็กโทรด (กิโลนิวตัน, kN)

X<sub>2</sub> = เวลาที่ใช้ในการเชื่อม (ไซเคิล, Cycle)

X<sub>3</sub> = กระแสที่ใช้ในการเชื่อม (กิโลแอมป์, kA)

**ตารางที่ 3** ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการแบบเต็มรูปแบบยกกำลังสองของค่าแรงดึงเดือน

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	3.442	3.442	0.382	65.540	0.000
Linear	3	3.162	3.162	1.054	180.630	0.000
Square	3	0.129	0.129	0.043	7.410	0.000
Interaction	3	0.150	0.150	0.050	8.570	0.000
Residual Error	50	0.291	0.291	0.005		
Lack-of-Fit	5	0.015	0.015	0.003	0.510	0.764
Pure Error	45	0.276	0.276	0.006		
Total	59	3.733				

$R^2 = 92.19\%$   $R^2_{(adj)} = 90.78\%$

**ตารางที่ 4** ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสองของขนาดนักเกิด

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	7.320	7.320	0.813	92.340	0.000
Linear	3	2.348	2.348	0.782	88.870	0.000
Square	3	3.020	3.020	1.006	114.300	0.000
Interaction	3	1.951	1.951	0.650	73.840	0.000
Residual Error	50	0.440	0.440	0.008		
Lack-of-Fit	5	0.009	0.009	0.001	0.200	0.960
Pure Error	45	0.430	0.430	0.009		
Total	59	7.760				

$R^2 = 94.32\%$   $R^2_{(adj)} = 93.30\%$

DF คือ ค่าที่ใช้เพื่อชดเชย ความผิดพลาดของตัวอย่าง  
 Seq SS คือ ผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบน  
 Adj SS คือ ผลรวมกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนที่ทำการ  
 ปรับค่าแล้ว  
 Adj MS คือ ค่าเฉลี่ยความเบี่ยงเบนกำลังสองที่ทำการ  
 ปรับค่าแล้ว

F คือ ค่าสถิติที่ใช้พิจารณาใน F-distribution  
 P คือ เป็นค่าที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานโดย  
 เปรียบเทียบกับค่า  $\alpha$  งานวิจัยใช้  $\alpha = 0.05$   
 $R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  
 $R^2_{(adj)}$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ทำการปรับค่า

**3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย  
โครงข่ายประสาทเทียม**

ผลการวิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น ด้วยระบบการเรียนรู้แบบแพร่กระจายกลับ สำหรับการปรับค่าน้ำหนักและไบแอส คือ อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ก [26] โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าแรงดึงเดือน คือ 3-10-1 และ 3-5-1 สำหรับทำนายขนาดนักเกต ด้วยการแบ่งชุดข้อมูลวิธีแบบไขว้ ให้ผลลัพธ์ของค่าน้ำหนักและไบแอสที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6

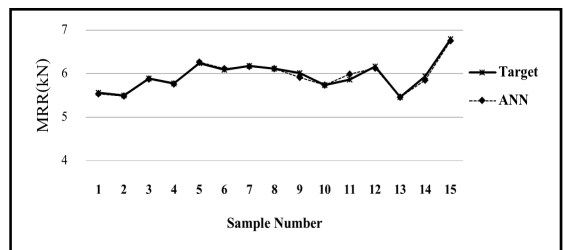
**ตารางที่ 5** น้ำหนักและไบแอสในโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่าแรงดึงเดือน

Neuron	Weight		Bias	
1	-0.586	-1.373	2.816	2.575
2	-1.331	2.132	-2.055	1.98
3	2.14	1.689	-0.38	-1.944
4	2.8622	-1.315	0.527	-1.289
5	-1.711	-2.181	1.142	-0.512
6	0.345	-0.093	2.267	-2.027
7	-0.944	2.279	0.563	-0.187
8	1.365	-0.71	-2.411	1.068
9	1.952	0.734	-1.962	2.371
10	1.651	-1.938	-1.77	2.927

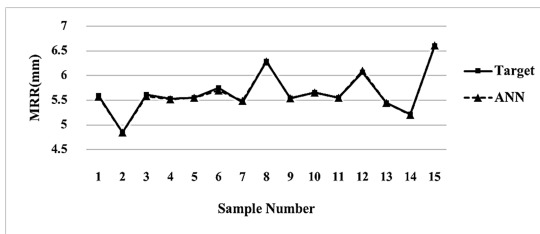
**ตารางที่ 6** น้ำหนักและไบแอสในโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายขนาดนักเกต

Neuron	Weight		Bias	
1	-2.490	0.243	-2.620	0.330
2	-1.278	0.848	3.667	-3.340
3	0.299	-2.704	-1.430	0.182
4	1.124	1.419	2.984	2.553
5	0.956	1.553	-0.865	1.189

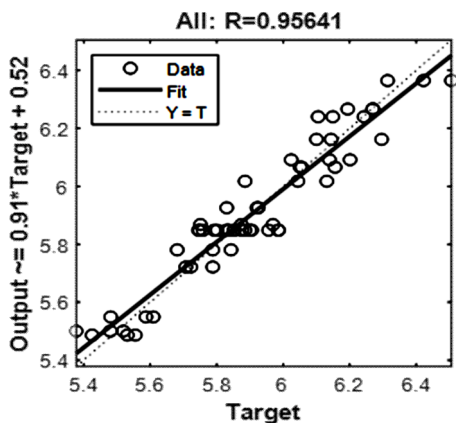
จากตารางที่ 5 ประกอบไปด้วย 1 ชั้นซ่อน 10 นิวรอน มีค่าน้ำหนัก 30 ค่า และไบแอส 10 ค่า สำหรับค่าแรงดึงเดือน มีค่าน้ำหนักระหว่าง -2.181 ถึง 2.862 ไบแอสมีค่าระหว่าง -2.411 ถึง 2.575 ไบแอสมีค่าระหว่าง -2.072 ถึง 2.927 สำหรับขนาดนักเกตประกอบไปด้วย 1 ชั้นซ่อน 5 นิวรอน มีค่าน้ำหนัก 15 ค่าระหว่าง -2.704 ถึง 2.984 ไบแอสมีค่าระหว่าง -3.340 ถึง 2.553 ดังแสดงในตารางที่ 6 จากข้อมูลพบว่าช่วงของค่าน้ำหนัก ไม่ได้มีความแตกต่างกับค่าน้ำหนักเริ่มต้นมาก แสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์กมาร์กมีประสิทธิภาพ



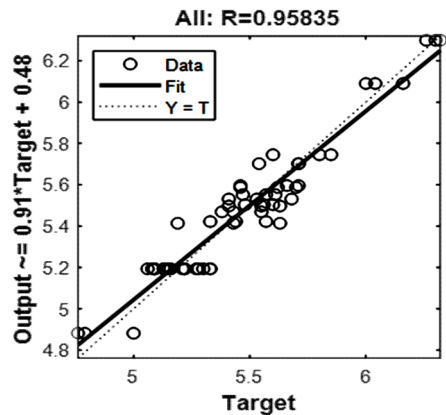
**รูปที่ 10** การเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์เป้าหมายและผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่าแรงดึงเดือน



**รูปที่ 11** การเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์เป้าหมายและผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับขนาดนักเกต จากรูปที่ 10 และ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์เป้าหมายและผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม พบว่าค่าจากการทดลองใกล้เคียงกันมาก โดยค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) เท่ากับ 0.0026 สำหรับการทำนายค่าแรงดึงเฉือน และ 0.0004 สำหรับขนาดนักเกต แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นสามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง



**รูปที่ 12** แสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายกับผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่าแรงดึงเฉือน



**รูปที่ 13** แสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายกับผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายขนาดนักเกต

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายและผลลัพธ์จากโครงข่ายประสาทเทียม ดังแสดงรูปที่ 12 พบว่ามีความชันที่ 0.91 ตัดแกน y ที่ 0.52 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.956 สำหรับการทำนายค่าแรงดึงเฉือน สำหรับการทำนายขนาดนักเกต มีความชันที่ 0.91 ตัดแกน y ที่ 0.48 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.958 ดังแสดงในรูปที่ 13 จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์เป้าหมายและผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเชิงเส้น แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถทำนายผลของค่าแรงดึงเฉือน และขนาดนักเกตในการเชื่อมเหล็กเคลื่อนสั้งกะสี JIS G3313 ด้วยกระบวนการเชื่อมความดันทานชนิดจุด

**3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นการเลือกแบบจำลองที่ให้ประสิทธิภาพในการทำนายสูงสุด โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด

ระหว่างแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ข้อมูลที่ทำการทดสอบประสิทธิภาพมีทั้งหมด 15 ข้อมูล แตกต่างกัน ซึ่งเป็นข้อมูลที่ยังไม่ได้ผ่านการทดสอบ(Test) หรือการฝึกสอน (Training)

**ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสอง และวิธีการ โครงข่ายประสาทเทียม**

Welding Factors			Tensile	Tensile Shear Predict				Nugget	Nugget Size Predict			
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Shear	FQE	SE	ANN	SE	Size	FQE	SE	ANN	SE
			Target					Target				
1.75	10	9	5.559	5.551	0.000	5.534	0.0006	5.590	5.6088	0.00036	5.570	0.0004
2.25	10	9	5.503	5.435	0.005	5.491	0.0001	4.848	4.8708	0.00052	4.850	4E-06
1.75	12	9	5.892	5.841	0.003	5.876	0.0002	5.609	5.6338	0.00062	5.585	0.0005
2.25	12	9	5.770	5.741	9E-04	5.764	3.6E-05	5.530	5.5458	0.00025	5.520	0.0001
1.75	10	11	6.244	6.180	0.004	6.262	0.00032	5.550	5.5328	0.00029	5.550	0.0000
2.25	10	11	6.087	6.045	0.002	6.110	0.0005	5.748	5.7228	0.00063	5.701	0.0023
1.75	12	11	6.180	6.158	5E-04	6.161	0.0003	5.453	5.4338	0.00037	5.490	0.0013
2.25	12	11	6.121	6.039	0.007	6.114	4.9E-05	6.290	6.2738	0.00026	6.291	0.0000
1.5	11	10	6.020	5.950	0.005	5.919	0.0102	5.539	5.535	1.2E-05	5.537	4E-06
2.5	11	10	5.739	5.715	6E-04	5.742	9E-06	5.653	5.6375	0.00024	5.653	0.0000
2	9	10	5.864	5.824	0.002	5.990	0.0158	5.546	5.5070	0.00152	5.551	1E-05
2	13	10	6.165	6.108	0.003	6.126	0.0015	6.063	6.0830	0.0004	6.100	0.0013
2	11	8	5.458	5.422	0.001	5.461	9E-06	5.446	5.4290	0.00029	5.446	0.0000
2	11	10	5.936	5.810	0.016	5.855	0.0065	5.210	5.1750	0.00122	5.200	1E-04
1.5	9	12	6.788	6.851	0.063	6.751	0.0018	6.604	6.6195	0.00022	6.611	3.6E-5
MSE					0.007		0.0026			0.0005		0.0004

FEQ คือ สมการเต็มรูปแบบยกกำลังสอง (Full Quadratic Equation)

ANN คือ วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

MSE คือ ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Mean Square Error)

SE คือ ค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Square Error)

$X_1$  คือ แรงกดอิเล็กโทรด (Electrode Force, kN)

$X_2$  คือ เวลาในการเชื่อม (Welding Time, Cycle)

$X_3$  คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม (Welding Current, Ampere)

จากตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ผลการทดลองพบว่า สมการเต็มรูปแบบยกกำลังสอง (FEQ) สามารถทำนายค่าแรงดึงเฉือน และขนาดน้กเกิด มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่ 0.007 และ 0.0005 ตามลำดับ วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) สามารถทำนายค่าแรงดึงเฉือน และขนาดน้กเกิด มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่ 0.0026 และ 0.0004 ตามลำดับ จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม ให้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่ต่ำที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบการทำนายจากสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสอง และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.956 สำหรับการทำนายค่าแรงดึง และ 0.958 สำหรับการทำนายขนาดน้กเกิด

ดังนั้นสรุปได้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแก้ปัญหาการเกิดแบบจำลองที่ไม่จำรูปแบบของข้อมูลฝึกสอน (Over Fitting) ได้ จากข้อมูลที่ใช้การทดลองทั้งหมด 60 ข้อมูล ถึงแม้ว่ามีการแบ่งข้อมูลในการ

ฝึกสอน (Training) แต่ข้อมูลทุกค่าสามารถได้รับการฝึกสอนทั้งหมด ดังนั้นจำนวนการทดลองจำนวน 60 ข้อมูลจึงเพียงพอที่นำมาใช้กับโครงข่ายประสาทเทียม

#### 4. สรุปผลการทดลอง

1. การเชื่อมความต้านทานชนิดจุดในเหล็กเคลือบสังกะสี JIS G3313 มีสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 12 กิโลแอมแปร์ เวลาเชื่อม 9 ไซเคิล และแรงกดอิเล็กโทรด 1.5 กิโลนิวตัน ส่งผลให้มีค่าแรงดึงเฉือนสูงสุด และมีขนาดน้กเกิดอยู่ในเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐาน JIS Z3140:2017

2. โครงสร้างจุลภาคสำหรับชิ้นงานเชื่อมที่มีสภาวะเหมาะสม ในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนพบโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไรต์ โดยโครงสร้างจุลภาคมีเกรนของเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไรต์ละเอียดแต่มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอเกินไป มีความหนาแน่นเพิร์ลไรต์มากสำหรับโครงสร้างจุลภาคบริเวณน้กเกิด เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรต์รูปเข็มที่มีความละเอียดสูง ดังนั้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีค่าแรงดึงเฉือนสูงสุด

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับงานวิจัยด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม แบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้นด้วยระบบการเรียนรู้แบบแพร่กระจายกลับ กระบวนการเรียนรู้สำหรับการปรับค่าน้ำหนักและไบแอส คือ อัลกอริทึมแบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ค ฟังก์ชันการถ่ายโอนโดยฟังก์ชันแทน-ซิกมอยด์ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับการทำนายค่าแรงดึงเฉือน คือ 3-10-1 และ 3-5-1 สำหรับทำนายขนาดน้กเกิด มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองที่ 0.0026 และ 0.0004 สำหรับค่าแรงดึงเฉือน และขนาดน้กเกิด ตามลำดับ



## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R.L. O'Brien. *“Welding Handbook”* (8th ed.), American Welding Society, 1992.
- [2] Toyota Motor Corporation, “Toyota New Global Architecture”, Available: <http://www.toyota.co.th/TNGA>, 5 August 2018.
- [3] W.H. Kearns, *“Welding Handbook”* (7th ed), American Welding Society, 1982.
- [4] L.F. Jeffus, *“Welding Principles and Applications”* Cengage Learning, 2014.
- [5] R.L. O'Brien, *“Welding Hand Book Test Methods for Evaluating Welded Joints”*, (9th ed), American Welding Society, 2001.
- [6] Japanese Industrial Standard, *“JIS Z 3140-2017 Method of Inspection for Spot Welding”*, Japanese Standard Association, 2017.
- [7] C. Summerville, P. Compston and M. Doolan, “A Comparison of Resistance Spot Weld Quality Assessment Techniques”, *Procedia Manufacturing* 29, 2019, pp. 305-312.
- [8] Aravinthan A. and Mohd A.N., “Spot Welding Parameter Optimization to Improve Weld Characteristics for Dissimilar Metals”, *International Journal of Scientific & Technology Research* 4, 2015, pp. 75-80.
- [9] H. Long, Y. Hu, X. Jin, H. Yu and H. Zhu, “An Optimization Procedure for Spot-Welded Structures Based on SIMP Method”, *Computational Materials Science* 117, 2016, pp. 602-607.
- [10] K. Zhou and P. Yao, “Overview of Recent Advances of Process Analysis and Quality Control in Resistance Spot Welding” *Mechanical Systems and Signal Processing* 124, 2019, pp.170-198.
- [11] T. Arunchai, K. Sonthipermpon, P. Apichayakul and K. Tamee, “Resistance Spot Welding Optimization Based on Artificial Neural Network”, *International Journal of Manufacturing Engineering* 54784, 2014, pp.1-6.
- [12] D. Shah and D.P. Patel, “Prediction of Weld Strength of Resistance Spot Welding Using Artificial Neural Network” *Journal of Engineering Research and Applications* 3, 2013, pp.1486-1491.
- [13] H. Pashazadeh, Y. Gheisari, and M. Hamed. “Statistical Modeling and Optimization of Resistance Spot Welding Process Parameters using Neural Networks and Multi-Objective Genetic Algorithm.” *Journal of Intelligent Manufacturing* 27, 2016, pp. 549-559.

- [14] F. Ahmed and K.Y. Kim, "Data-driven Weld Nugget Width Prediction with Decision Tree Algorithm" *Procedia Manufacturing* 10, 2017, pp. 1009-1019.
- [15] K. He and X. Li. "A Quantitative Estimation Technique for Welding Quality using Local Mean Decomposition and Support Vector Machine." *Journal of Intelligent Manufacturing* 27, 2016, pp.525-533.
- [16] B.S. Gawai, R.L. Karwande, M.D. Irfan and P.S. Thakare, "Mathematical Modeling and Optimization of Process Parameters for Tensile Strength and Nugget Diameter in Resistance Spot Welding of HR E-34 Steel Sheet Joint", *Proceedings of International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation, Mumbai, India, 2018*, pp. 3-13.
- [17] F. A. Ghazali, Z. S. Yupiter, H. P. Manurung, Y. M. Taib, K. M. Hyie, M. A. Ahamat and S. H. A. Hamidi, Three Response Optimization of Spot-Welded Joint using Taguchi Design and Response Surface Methodology Techniques, *The Advances in Joining Technology*, 2018, pp. 85-95.
- [18] F. Mirzaei, H. Ghorbani and F. Kolahan, Numerical Modeling and Optimization of Joint Strength in Resistance Spot Welding of Galvanized Steel Sheets, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 2017, pp. 3489–3501.
- [19] Japanese Industrial Standard, "*JIS Z 3136-1999 Specimen Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot and Embossed Projection Welded Joints*", Japanese Standard Association, Japan, 1999.
- [20] Mohammad D., Ahmed H. E., Othman J., Othman A. K. and Sharifah M., Comparison of Artificial Neural Network Transfer Functions Abilities to Simulate Extreme Runoff Data, 2012 *International Conference on Environment, Energy and Biotechnology*, Singapore, 2012, pp.39-44.
- [21] Yixi Z., Yansong Z. and Xinmin L., Analysis of Fracture Modes of Resistance Spot Welded Hot-Stamped Boron Steel Metals, 764, 2018 pp.1-15.
- [22] Chapple S.C., Temple P.I., Senatore D.A., Barras K. and McCoy, R., "*Welding Hand Book Weld Quality (9<sup>th</sup> ed., Vol.1)*" American Welding Society, Miami, 2001.

- [23] L. KašČák, J. Viňáš and R. MišiČko, Influence of Welding Current in Resistance Spot Welding on the Properties of Zn Coated Steel DX5 1 D, Songklanakarin Journal of Science and Technology 38, 2016, pp. 237-242.
- [24] Lin H.C., Hsu C.A., Lee C.S., Kuo T.Y. and Jeng S.L., Effects of Zinc Layer Thickness on Resistance Spot Welding of Galvanized Mild Steel, Journal of Materials Processing Technology., 251, 2018, pp. 205-213
- [25] Myers R.H., “*Montgomery DC., Response Surface Methodology Process and Product Optimization using Designed Experiments*”, 2 ed., John Wiley and Sons, New York, 2002.
- [26] W.B. Oha, 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, 30, 2019, pp. 48-55.