การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและสูงในสภาวะกรดและทรายโดยใช้การออกแบบการทดลองทากุชิ

A Study of Corrosion-Erosion Behavior of Low and High Carbon Steels in Acid and Sand Environments Using Taguchi's Experimental Design

ธนะรัตน์ รัตนกูล[1], กันต์ธมน สุขกระจ่าง[1*], ฉัตรชัย แก้วดี[2], วีรพล ปานศรีนวล[2] และ วีระยุทธ สุดสมบูรณ์[2]

Tanarat Rattanakool[1], Kantamon Sukkrajang[1*], Chatchai Kaewdee[2], Weeraphol Pansrinual[2], and Weerayute Sudsomboon[2]

[1] คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

[2] หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชานวัตกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: tanarat.ra@skru.ac.th

วันที่รับบทความ: 31 กรกฎาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 10 สิงหาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 14 สิงหาคม 2567
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1018) และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (AISI 1060) ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยใช้เทคนิคทากุชิเพื่อออกแบบการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพ การทดลองถูกออกแบบโดยใช้ออร์โธกอนอล อาร์เรย์ L9 ด้วยชุดทดสอบโรเทตติ่งไซลินเดอร์อิเล็กโทรด (Rotating Cylinder Electrode) เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบ (1,800, 3,600 และ 5,400 RPM) และสภาวะการทดลองสามสภาวะ ได้แก่ น้ำกลั่นผสมทราย สารละลายกรดซัลฟิวริก ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 และสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 ผสมทราย โดยแบ่งชุดการทดลองตามประเภทของเหล็กกล้า (เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอนสูง) เพื่อศึกษาการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กกล้า ผลลัพธ์ของการวิจัยแสดงให้เห็นว่าทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีประสิทธิภาพในการทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะ การทดลองที่เป็นสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 โดยไม่มีทราย การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratio; S/N) แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเล็กน้อย (53.9 เทียบกับ 52.4) ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในกระบวนการทางเทคนิคที่ต้องการความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง การใช้เทคนิค Taguchi ช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และนำไปสู่ การเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการ

คำสำคัญ: การกัดกร่อน-สึกกร่อน, ทากุชิ, ระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน

Abstract: This research aims to investigate and compare the corrosion-erosion behavior of low carbon steel (AISI 1018) and high carbon steel (AISI 1060) under different environmental conditions. A Taguchi experimental design was employed to efficiently evaluate the effects of rotational speed (1,800, 3,600, and 5,400 RPM) and three environmental conditions: distilled water with sand, sulfuric acid solution at pH 4, and sulfuric acid solution at pH 4 with sand on weight loss. An L9 orthogonal array and a rotating cylinder electrode (RCE) setup were utilized for the experiments. Both steel types exhibited good corrosion-erosion resistance, particularly in the sulfuric acid solution at pH 4 without sand. Signal-to-noise ratio (S/N) analysis indicated slightly better performance for high carbon steel (S/N = 53.9) compared to low carbon steel (S/N = 52.4). These findings can be applied to select suitable materials for applications demanding resistance to diverse environments, especially those with high acidity. The application of Taguchi methodology facilitated efficient experimental planning and analysis, enabling informed material selection.

Key words: Corrosion-Erosion, Taguchi, Signal-to-Noise Ratio

1. บทนำ

เหล็กเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคการเกษตรด้วยคุณสมบัติที่แข็งแรง ราคาถูก และหาได้ง่าย อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของเหล็ก คือ ความอ่อนไหวต่อการเกิดสนิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดหรือด่างสูง ตัวอย่างเช่น ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ท่อส่งก๊าซและน้ำมันที่อยู่ใต้ทะเลต้องเผชิญกับสภาวะที่รุนแรง ทั้งความเค็มของน้ำทะเล แรงดันสูง และสารประกอบที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรง การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและสูงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเหล็กทั้งสองชนิดนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีราคาถูกขึ้นรูปง่าย และมีความเหนียวสูง เหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป เช่น โครงสร้างอาคาร ชิ้นส่วนรถยนต์ และภาชนะบรรจุ ในขณะที่เหล็กกล้าคาร์บอนสูง มีความแข็งแรงและความทนทานต่อการสึกกร่อนสูงกว่า แต่มีความเหนียวน้อยกว่า เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น เครื่องมือ ใบมีด และชิ้นส่วนเครื่องจักร การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งสองชนิด จะช่วยในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งรวมไปถึงการใช้งานทางการเกษตรที่อุปกรณ์อย่างรถไถอุปกรณ์อย่างใบไถและจานไถของรถไถต้องสัมผัสกับดินที่มีความเป็นกรด เช่น ดินเปรี้ยว ซึ่งมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ต่ำถึง 4.5-3.0 หรือต่ำกว่า ปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กจึงเป็นอุปสรรคสำคัญที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ แม้ว่าเหล็กจะมีความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนได้ในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการเติมคาร์บอนหรือธาตุอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง แต่การสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดอย่างต่อเนื่อง ย่อมนำไปสู่การกัดกร่อนที่รุนแรงขึ้น ส่งผลให้อุปกรณ์เหล็กมีอายุการใช้งานสั้นลง เกษตรกรต้องแบกรับภาระค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์บ่อยครั้ง เพื่อแก้ไขปัญหานี้การศึกษาเพื่อยืดอายุการใช้งานและลดการกัดกร่อนของเหล็กในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนในสภาวะกรดซัลฟิวริกมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากกรดซัลฟิวริกเป็นสารเคมีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ปุ๋ย แบตเตอรี่ และโลหะ

การสัมผัสกับกรดซัลฟิวริกเป็นสาเหตุสำคัญของการกัดกร่อนในอุปกรณ์และโครงสร้างต่างๆ เช่น ท่อส่ง ถังเก็บ และชิ้นส่วนเครื่องจักร ยิ่งไปกว่านั้น กรดซัลฟิวริกยังเป็นองค์ประกอบสำคัญในดินเปรี้ยว ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในภาคการเกษตร ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชและอายุการใช้งานของอุปกรณ์การเกษตร การทำความเข้าใจถึงกลไกการกัดกร่อนในสภาวะกรดซัลฟิวริกจึงช่วยในการเลือกใช้วัสดุ ออกแบบอุปกรณ์ และพัฒนาเทคนิคการป้องกันการกัดกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคการเกษตร ส่วนการเลือกใช้ทรายในการทดลอง เป็นการจำลองสภาวะการกัดกร่อน-สึกกร่อน ซึ่งเกิดจากการเสียดสีของอนุภาคของแข็งกับพื้นผิวโลหะ ในสภาพแวดล้อมจริง อนุภาคของแข็งเหล่านี้ เช่น ทราย ตะกอน หรือผงฝุ่น มักพบในของไหล เช่น น้ำ น้ำมัน หรือก๊าซ การเสียดสีของอนุภาคเหล่านี้ ร่วมกับสภาวะกัดกร่อน เช่น สภาพความเป็นกรดจะเร่งกระบวนการกัดกร่อน ทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงและรวดเร็วยิ่งขึ้น การศึกษาผลของทรายต่ออัตราการกัดกร่อน จึงช่วยในการประเมินความทนทานของวัสดุในสภาวะการใช้งานจริง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ท่อส่งน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติมักมีทรายและตะกอนปะปนอยู่ ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อน-สึกกร่อนอย่างรุนแรง หรือในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องจักร สายพานลำเลียง และท่อ ต้องสัมผัสกับแร่ที่มีความแข็งและมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เกิดการสึกกร่อนและการกัดกร่อน

การศึกษาผลของความเร็วรอบต่อการกัดกร่อนมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากความเร็วรอบสัมพันธ์โดยตรงกับสภาพการไหลของของไหลในระบบท่อหรือเครื่องจักร ความเร็วรอบที่สูงขึ้นหมายถึงอัตราการไหลที่เร็วขึ้น ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการกัดกร่อนในหลายด้าน อัตราการถ่ายโอนมวลจะสูงขึ้น ทำให้สารกัดกร่อน เช่น ออกซิเจน หรือไอออน ถูกพัดพาไปยังพื้นผิวโลหะได้เร็วขึ้น เร่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าและเพิ่มอัตราการกัดกร่อน นอกจากนี้ การไหลที่ความเร็วสูงยังสร้างแรงเฉือนที่พื้นผิวโลหะ ซึ่งอาจทำให้ชั้นป้องกันของโลหะหลุดออก เปิดเผยพื้นผิวโลหะให้กับสารกัดกร่อน และในสภาวะที่มีอนุภาคของแข็ง เช่น ทราย ความเร็วรอบสูงจะเพิ่มแรงกระแทกของอนุภาคเหล่านี้กับพื้นผิวโลหะ ส่งผลให้เกิดการสึกกร่อน ดังนั้น การทำความเข้าใจถึงผลของความเร็วรอบจึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบระบบท่อหรือเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับอัตราการไหล เพื่อลดปัญหาการกัดกร่อน-สึกกร่อน เช่น การเลือกใช้วัสดุที่ทนทานต่อการกัดกร่อนสูง หรือการออกแบบท่อให้มีการไหลที่ราบเรียบ ลดการปั่นป่วน การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ช่วยระบุและควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของวัสดุหรือกระบวนการในการศึกษาผลของความเร็วรอบและปัจจัยอื่น ๆ ต่อการกัดกร่อน เทคนิคทากุชิจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมอย่างยิ่ง เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้จำนวนการทดลองที่น้อยลง แต่ยังคงครอบคลุมปัจจัยและระดับปัจจัยที่สำคัญ นำไปสู่การประหยัดเวลาและทรัพยากรเมื่อเทียบกับวิธีการออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิม เช่น แฟคทอเรียล (Factorial design) ซึ่งต้องใช้จำนวนการทดลองที่มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีปัจจัยและระดับปัจจัยจำนวนมาก นอกจากนี้เทคนิคทากุชิยังช่วยในการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ทั้งแบบเดี่ยวและแบบปฏิสัมพันธ์ พร้อมทั้งสามารถระบุค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ และประเมินผลลัพธ์โดยใช้อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, S/N) ซึ่งเป็นการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการโดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างผลลัพธ์ที่ต้องการกับความผันแปรที่ไม่ต้องการแม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน แต่ยังคงมีช่องว่างในองค์ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาที่มุ่งเน้นการเปรียบเทียบพฤติกรรมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและสูงภายใต้สภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย และการประยุกต์ใช้เทคนิคทากุชิในการออกแบบการ

ทดลอง งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยศึกษาผลของความเร็วรอบ สภาวะแวดล้อม และชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและสูง ต่ออัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อน เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกการกัดกร่อน และเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่ช่วยลดอัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อน ผลการวิจัยนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้วัสดุ การออกแบบอุปกรณ์ และการพัฒนาเทคนิคการป้องกันการกัดกร่อนในอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงการพัฒนาองค์ความรู้ด้านการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน โดยประสิทธิภาพของวิธีทากูชิ ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง และถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยในหลากหลายสาขา เช่น อุตสาหกรรมการผลิต ปรับปรุงกระบวนการผลิตลดของเสียเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักร เช่น การใช้ทากูชิ ในการปรับปรุงคุณภาพของงานเชื่อมโลหะ [1] การขึ้นรูปพลาสติก [2] การตัดเฉือนโลหะ [3] การผลิตวัสดุนาโน [4] ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเซลล์ [5] การผลิตยา [6] และการพัฒนาวัคซีน [7] ด้วยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ เราสามารถระบุปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนของเหล็กในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดและหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเหล่านั้น เพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน จากปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กจึงเป็นอุปสรรคสำคัญที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ การทำความเข้าใจถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อน และการระบุค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเหล่านี้ เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเหล็กกล้าคาร์บอนที่ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดียิ่งขึ้น หากปราศจากงานวิจัยเช่นนี้ เราอาจไม่สามารถยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์เหล็ก ลดต้นทุนการผลิต และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเป้าไปที่การศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและสูง ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน รวมถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของความเร็วรอบ โดยใช้เทคนิคทากูชิ เพื่อหาแนวทางในการลดอัตราการกัดกร่อน ยืดอายุการใช้งาน และลดต้นทุนในการบำรุงรักษา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี การเกษตร และการผลิต รวมถึงเป็นการเพิ่มพูนองค์ความรู้เกี่ยวกับการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอนสูงภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน

2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อน ด้วยการออกแบบการทากูชิ

3. ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ มุ่งศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนโดยใช้การออกแบบการทดลองทากูชิ มีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

3.1 วัสดุที่ศึกษา เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง

3.2 สภาวะการทดลอง น้ำกลั่นผสมทรายสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 และสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 ผสมทราย

3.3 ตัวแปรที่ศึกษา ความเร็วรอบ ได้แก่ 1,800 3,600 และ 5,400 รอบต่อนาที

3.4 วิธีการทดลอง ใช้ชุดทดสอบโรเทตติ่งไซลินเดอร์อิเล็กโทรด (RCE) และออกแบบการทดลองโดยใช้ออร์โทโกนัล อาร์เรย์ L9 ตามเทคนิคทากูชิ

4. วิธีดำเนินการวิจัย

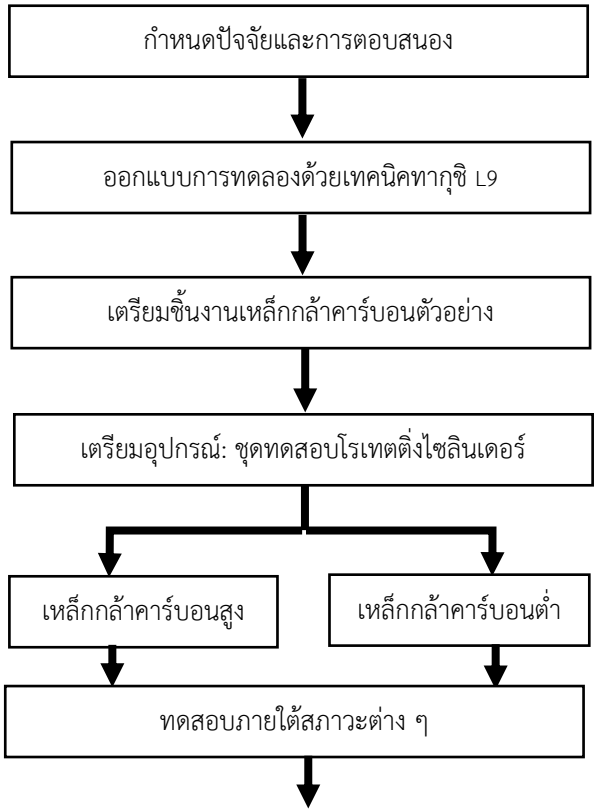
การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนโดยใช้การออกแบบการทดลองทากูชิ โดยเลือกใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ชนิด AISI 1018 และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชนิด AISI 1060 มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังภาพที่ 1 และมีรายละเอียดดังนี้

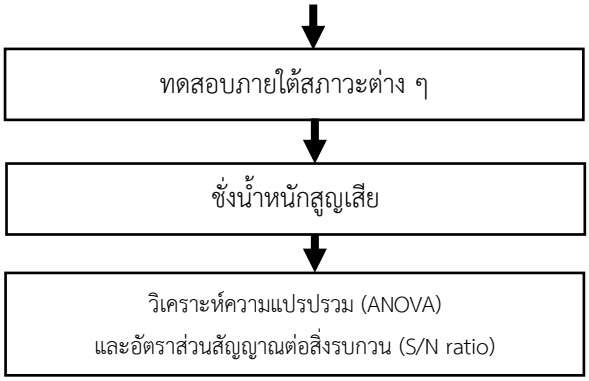
4.1 ผลการกำหนดปัจจัยและการตอบสนองต่อพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน โดยใช้การออกแบบการทดลองทากุชิ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กำหนดปัจจัยและการตอบสนอง

ลำดับ	ปัจจัย		การตอบสนอง (Responds)
	ความเร็วรอบ (RPM)	สภาวะ (Condition)	
1	1,800	น้ำกลั่นผสมทราย	การสูญเสีย
2	3,600	ซัลฟิวริก	น้ำหนักของ
3	5,400	ซัลฟิวริกทราย	เหล็ก (%)

จากตางรางที่ 1 แสดงรายละเอียดของการทดลองตามการจัดระดับที่กำหนดไว้ในการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กคาร์บอนในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ ปัจจัยที่ 1 ความเร็วในการหมุน มีระดับทั้งหมด 3 ระดับ คือ 1,800 [8], 3,600 [9] และ 5,400 RPM [10] ปัจจัยที่ 2 สภาพแวดล้อม มีระดับทั้งหมด 3 ระดับ คือ น้ำกลั่นผสมทราย [11] กรดซัลฟิวริก ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 [12] และ กรดซัลฟิวริก ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 ผสมทราย [13] โดยมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กเป็นการตอบสนอง





ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินวิจัย

จากภาพที่ 1 อธิบายรายละเอียดภาพขั้นตอนวิธีดำเนินการการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและสูงในสภาวะกรดและทราย โดยใช้การออกแบบการทดลองทากุชิ

4.2 ผลออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากุชิ L9 สำหรับ 2 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ซึ่งมีการทดลอง ทั้งหมด 9 ครั้ง เพื่อตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

การทดลอง	ความเร็วรอบ	สภาวะ	เหล็ก
1	1,800	น้ำกลั่นผสมทราย	คาร์บอนต่ำ
2	1,800	ซัลฟิวริก	คาร์บอนต่ำ
3	1,800	ซัลฟิวริกทราย	คาร์บอนต่ำ
4	3,600	น้ำกลั่นผสมทราย	คาร์บอนต่ำ
5	3,600	ซัลฟิวริก	คาร์บอนต่ำ
6	3,600	ซัลฟิวริกผสมทราย	คาร์บอนต่ำ
7	5,400	น้ำกลั่นผสมทราย	คาร์บอนต่ำ
8	5,400	กรดซัลฟิวริก	คาร์บอนต่ำ
9	5,400	ซัลฟิวริกผสมทราย	คาร์บอนต่ำ

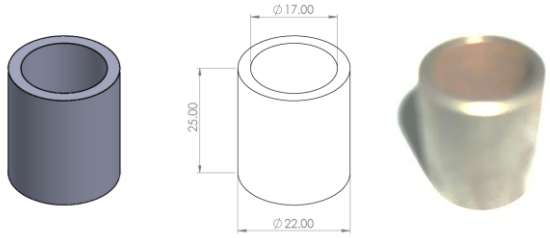
ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองเหล็กกล้าคาร์บอนสูง

การทดลอง	ความเร็วรอบ	สภาวะ	เหล็ก
1	1,800	น้ำกลั่นผสมทราย	คาร์บอนสูง
2	1,800	ซัลฟิวริก	คาร์บอนสูง
3	1,800	ซัลฟิวริกทราย	คาร์บอนสูง
4	3,600	น้ำกลั่นผสมทราย	คาร์บอนสูง
5	3,600	ซัลฟิวริก	คาร์บอนสูง

การทดลอง	ความเร็วรอบ	สภาวะ	เหล็ก
6	3,600	ซัลฟิวริกผสมทราย	คาร์บอนสูง
7	5,400	น้ำกลั่นผสมทราย	คาร์บอนสูง
8	5,400	กรดซัลฟิวริก	คาร์บอนสูง
9	5,400	ซัลฟิวริกผสมทราย	คาร์บอนสูง

จากตางรางที่ 2 และ 3 จากตารางนี้แสดงการออกแบบการทดลองสำหรับศึกษาผลของความเร็วรอบและสภาวะที่มีต่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและคาร์บอนสูง โดยทำการทดลองทั้งหมด 9 รูปแบบ ด้วยการทดสอบที่ความเร็วรอบ 3 ระดับ ได้แก่ 1,800 3,600 และ 5,400 รอบต่อนาที และใน 3 สภาวะ ได้แก่ น้ำกลั่นผสมทราย กรดซัลฟิวริก และกรดซัลฟิวริกผสมทราย

4.3 การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน ตัวอย่างดังภาพที่ 2



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 2 (ก) แบบจำลองสามมิติ (ข) แบบร่างสองมิติ (ค) ชิ้นงานทดลองจริง

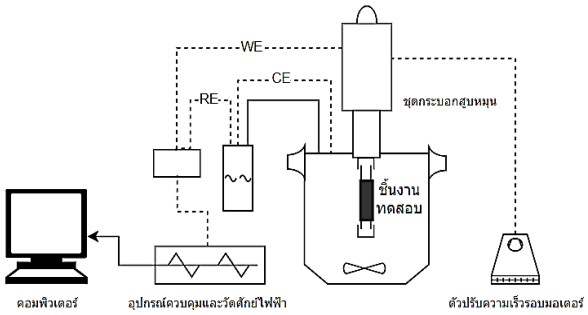
จากภาพที่ 2 แสดงการเตรียมชิ้นงานจากการตัดให้มีขนาด 25 มม. x 22 มม. x 17 มม. จากนั้นนำไปขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 ร่วมกับเครื่องขัดชิ้นงานทดสอบ โดยคุณสมบัติทางเคมีของเหล็ก ทั้ง 2 ชนิด ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอน

เหล็ก	องค์ประกอบทางเคมี (% น้ำหนัก)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
สูง	0.21	0.24	0.58	0.01	0.01	-	-	-
ต่ำ	0.47	0.24	0.67	0.01	0.01	-	-	-

จากตารางที่ 4 เป็นผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีการแผ่รังสีของอะตอม (Atomic emission spectroscopy)

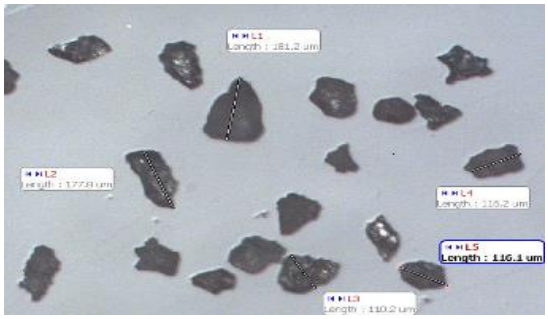
4.4 การเตรียมชุดทดสอบโรเทตติ่งไซลินเดอร์ แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบชุด RCE

ภาพที่ 4 เป็นแผนผังการทดสอบการกัดกร่อนแบบไฟฟ้าเคมีด้วยชุดโรเทตติ่งไซลินเดอร์อิเล็กโทรด แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ ได้แก่ ชิ้นงานทดสอบที่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode: WE) ขั้วไฟฟ้าเปรียบเทียบ (Reference Electrode: RE) ขั้วไฟฟ้าเสริม (Counter Electrode: CE) มอเตอร์สำหรับควบคุมความเร็วรอบ เครื่องโพเทน-ทิโอสแตท (Potentiostat) สำหรับควบคุมศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกและประมวลผลข้อมูล

4.5 ผลการทดสอบภายใต้สภาวะต่าง ๆ การทดสอบภายใต้สภาวะต่าง ๆ มีการใช้สารเคมี ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) น้ำกลั่น และทรายอนุภาคประมาณ 100 ไมครอน ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ภาพทรายสำหรับการทดสอบการสึกกร่อน

จากภาพที่ 3 ภาพทรายละเอียดที่ใช้ในการทดลอง โดยภาพซ้าย แสดงถึงทรายละเอียดที่เตรียมไว้สำหรับการทดลอง และภาพขวา แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของทรายละเอียด ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 100 ไมครอน โดยเริ่มจากนำชิ้นงานมาขัด ล้างชิ้นงานด้วยน้ำกลั่น แช่ชิ้นงานด้วยอะซิโตน เป่าให้แห้งด้วยลมร้อน ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง นำชิ้นงานมาประกอบเข้ากับชุดโรเทตติ่ง-ไซลินเดอร์อิเล็กโทรด นำภาชนะใส่สเลอรี่ (Slurry) ที่มีน้ำกลั่นผสมทรายละเอียด ทำการหมุนปั่นชิ้นงานด้วยความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที นำชิ้นงานออกจากเครื่องเมื่อทดลองครบครึ่งชั่วโมง นำชิ้นงานล้างด้วยน้ำกลั่นและอะซิโตน (Acetone) ทำให้แห้งและชั่งทำซ้ำอีก 2 ครั้ง ทำเช่นเดียวกันกับวิธีเดิมแต่เปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 3,600 รอบต่อนาที ทำเช่นเดียวกับวิธีเดิมแต่เปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 5,400 รอบต่อนาที

4.6 การชั่งน้ำหนักสูญเสีย

โดยใช้เครื่อง ชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลความ ละเอียด 0.0001 กรัม ในการวัดน้ำหนักที่สูญเสีย Matsumura และคณะ เสนอว่าความสูญเสียทั้งหมด (Wt) ของโลหะภายใต้การกระทำร่วมกันของการสึกกร่อนและการกัดกร่อนเป็นไปตามสมการ ดังนี้ [14]

$$\mathrm{Wt} = \mathrm{W}' + \mathrm{F}' \quad \text{.....(1)}$$

เมื่อ

W' คือ ปริมาณความสูญเสียเนื่องจากการสึกกร่อน
F' คือ ปริมาณความสูญเสียเนื่องจากการกัดกร่อน

4.7 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N ratio) หลังจากได้ข้อมูลการทดลองแล้ว จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของความเร็วรอบ สภาวะแวดล้อม และชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ที่มีต่ออัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อน โดยจะใช้ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 และวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน เป็นการวัดความเสถียรและความไวของระบบต่อปัจจัยรบกวน โดยมีสมการที่แตกต่างกันระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ ยิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) ยิ่งมากยิ่งดี (Larger-the-Better) [15] และค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Target-the-Better) [16] ในงานวิจัยนี้ เรามุ่งหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กกล้าคาร์บอนที่น้อยที่สุด ซึ่งเป็นกรณียิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-the-Better) สมการนี้ [17]

$$\text{S/N Ratio} = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad \text{.....(2)}$$

เมื่อ

y_i คือ ค่าผลลัพธ์จากการทดลองที่ i
n คือ จำนวนการทดลอง

5. ผลการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนโดยใช้การออกแบบการทดลองทากุชิ มีผลการวิจัยดังนี้

5.1 ผลการชั่งน้ำหนักสูญเสีย

โดยร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กกล้าคาร์บอนทั้ง 2 ชนิด แสดงดังตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 ร้อยละน้ำหนักสูญเสียเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

การทดลอง	ความเร็ว	สภาวะ	น้ำหนัก (%)
1	1,800	น้ำกลั่นผสมทราย	0.0680
2	1,800	ซัลฟิวริก	0.1150
3	1,800	ซัลฟิวริกผสมทราย	0.0640
4	3,600	น้ำกลั่นผสมทราย	0.0016
5	3,600	ซัลฟิวริก	0.0035
6	3,600	ซัลฟิวริกผสมทราย	0.0016
7	5,400	น้ำกลั่นผสมทราย	0.1280
8	5,400	ซัลฟิวริก	0.1680
9	5,400	ซัลฟิวริกผสมทราย	0.0860

จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยในสภาวะน้ำกลั่นผสมทรายการกัดกร่อนเกิดขึ้นจากการเสียดสีของอนุภาคทรายกับผิวโลหะ (Erosion) เป็นหลัก กลไกการกัดกร่อนแบบนี้

ไม่ได้เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้ามากนัก แต่เป็นการสึกกร่อนเชิงกล สังเกตได้จากการสูญเสียน้ำหนักที่สูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น (การทดลองที่ 1, 4, และ 7) เนื่องจากแรงกระแทกของทรายที่รุนแรงขึ้น ในสภาวะสารละลายกรดซัลฟิวริกความเป็นกรดด่าง 4 การกัดกร่อน (Corrosion) กรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยากับเหล็กเกิดเป็นไอออนของเหล็กที่ละลายในสารละลาย และเกิดก๊าซไฮโดรเจน การสูญเสียน้ำหนักในสภาวะนี้สูงกว่าในน้ำกลั่นผสมทราย โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบต่ำ (การทดลองที่ 2) เนื่องจากการกัดกร่อนเคมีไฟฟ้ามีผลมากกว่าการสึกกร่อนเชิงกล อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น (การทดลองที่ 5 และ 8) การสึกกร่อนเชิงกลจากการไหลของสารละลาย ก็มีส่วนร่วมในการกัดกร่อนมากขึ้น ส่วนในสภาวะสารละลายกรดซัลฟิวริกความเป็นกรดด่าง 4 ผสมทราย เป็นการกัดกร่อนแบบผสมผสาน (Erosion-Corrosion) เกิดทั้งการสึกกร่อนเชิงกลจากทราย และการกัดกร่อนจากกรดซัลฟิวริก สังเกตได้จากการสูญเสียน้ำหนักที่สูงกว่าในน้ำกลั่นผสมทราย แต่ต่ำกว่าในกรดซัลฟิวริกอย่างเดียว (เปรียบเทียบการทดลองที่ 1, 2 และ 3 หรือ 4, 5 และ 6 หรือ 7, 8 และ 9) แสดงให้เห็นว่า ทั้งการสึกกร่อนและการกัดกร่อน มีส่วนร่วมในการสูญเสียน้ำหนัก สรุปได้ว่า น้ำกลั่นผสมทรายทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบสึกกร่อน (Erosion) กรดซัลฟิวริกค่าความเป็นกรดด่าง 4 ทำให้เกิดการกัดกร่อน (Corrosion) และกรดซัลฟิวริกความเป็นกรดด่าง 4 ผสมทรายทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบผสมผสาน (Erosion-corrosion) โดยมีข้อสังเกตว่า ผลของความเร็วรอบต่อการกัดกร่อน มีความชัดเจนในสภาวะที่มีทราย เนื่องจากการสึกกร่อนเชิงกล มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของการไหล และสารละลายกรดซัลฟิวริกมีผลต่อการกัดกร่อนมากกว่าน้ำกลั่น แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของปฏิกิริยากัดกร่อน ทั้งนี้ การกัดกร่อนแบบผสมผสานเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่พบได้บ่อยในสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งมักมีทั้งสารกัดกร่อนและอนุภาคของแข็ง

ตารางที่ 6 ร้อยละน้ำหนักสูญเสียเหล็กคาร์บอนสูง

การทดลอง	ความเร็ว	สภาวะ	น้ำหนัก (%)
1	1,800	น้ำกลั่นผสมทราย	0.0980
2	1,800	ซัลฟิวริก	0.0450
3	1,800	ซัลฟิวริกผสมทราย	0.0690
4	3,600	น้ำกลั่นผสมทราย	0.0027
5	3,600	ซัลฟิวริก	0.0010
6	3,600	ซัลฟิวริกผสมทราย	0.0020
7	5,400	น้ำกลั่นผสมทราย	0.1450
8	5,400	ซัลฟิวริก	0.0650
9	5,400	ซัลฟิวริกผสมทราย	0.0930

จากตารางที่ 6 พฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนสูงในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยการกัดกร่อนในสภาวะน้ำกลั่นผสมทรายเน้นไปที่การสึกหรอเชิงกลเป็นหลัก อนุภาคทรายเสียดสีกับผิวเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนัก สังเกตได้จากการทดลองที่ 1, 4, และ 7 ที่ความเร็วรอบสูงขึ้น การสูญเสียน้ำหนักก็สูงขึ้นตาม เนื่องจากแรงกระแทกจากทรายที่รุนแรงขึ้น ในสภาวะสารละลายกรดซัลฟิวริก ค่าความเป็นกรดด่าง 4 การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยกรดซัลฟิวริกทำปฏิกิริยากับเหล็ก ก่อให้เกิดไอออนเหล็กที่ละลายในสารละลาย และปล่อยก๊าซไฮโดรเจน สิ่งที่น่าสนใจ คือ เหล็กกล้าคาร์บอนสูงแสดงความต้านทานต่อการกัดกร่อนในกรดซัลฟิวริกได้ดีกว่า สังเกตได้จากการสูญเสียน้ำหนักที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับน้ำกลั่นผสมทราย (เปรียบเทียบการทดลองที่ 1 กับ 2, 4 กับ 5, และ 7 กับ 8) ส่วนสภาวะสารละลายกรดซัลฟิวริกค่าความเป็นกรดด่าง 4 ผสมทราย เป็นการกัดกร่อนแบบผสมผสาน เกิดทั้งการสึกหรอเชิงกลจากทราย และการกัดกร่อนเคมีไฟฟ้าจากกรดซัลฟิวริก การสูญเสียน้ำหนักจะอยู่ระหว่างน้ำกลั่นผสมทรายและกรดซัลฟิวริกอย่างเดียว (เปรียบเทียบการทดลองที่ 1, 2, และ 3 หรือ 4, 5, และ 6 หรือ 7, 8, และ 9) มีข้อสังเกตว่า เหล็กกล้าคาร์บอนสูง แสดงความต้านทานต่อการกัดกร่อนเคมีไฟฟ้าในกรดซัลฟิวริก ได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อาจเนื่องจากปริมาณคาร์บอนที่สูงขึ้น

ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้ ผลของความเร็วรอบ ยังคงมีความสำคัญในสภาวะที่มีทราย เนื่องจากการสึกหรอเชิงกล ขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหล และการกัดกร่อนแบบผสมผสาน เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่ซับซ้อน และต้องพิจารณาถึงทั้งปัจจัยเชิงกลและเคมีไฟฟ้า เหล็กกล้าคาร์บอนสูงแสดงพฤติกรรมการกัดกร่อนที่แตกต่างจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะกรดซัลฟิวริก ซึ่งมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูงกว่า อย่างไรก็ตาม การกัดกร่อนแบบสึกหรอ และแบบผสมผสาน ยังคงเป็นปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง โดยเฉพาะในสภาวะที่มีการไหล และมีอนุภาคของแข็ง เช่น ทราย

5.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความเร็วรอบ สภาวะแวดล้อม และชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ที่มีต่อร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของเหล็ก ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงในตารางที่ 6 และ 7 แยกตามชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอน โดยใช้ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

ปัจจัย	sum_sq	df	F	P-value
ความเร็วรอบ	0.024091	2	26.207351	0.005027
สภาวะ	0.003135	2	3.410670	0.136634
Error	0.001838	4		

α = 0.05

จากตารางที่ 6 พบว่าผลการวิเคราะห์ ANOVA สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างปัจจัยที่ศึกษา โดยเฉพาะ ความเร็วรอบที่มีค่า p-value เท่ากับ 0.005027 ซึ่งน้อยกว่า α = 0.05 แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มความเร็วรอบที่แตกต่างกัน นั่นหมายความว่าความเร็วรอบมีผลกระทบต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า F-statistic ที่สูงถึง 26.207351 ยืนยันถึงความแปรปรวนระหว่างกลุ่มความเร็วรอบที่มีมากกว่าความแปรปรวนภายในกลุ่ม ในขณะที่ สภาวะ มีค่า p-value เท่ากับ 0.136634 ซึ่งสูงกว่า α = 0.05 แสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มสภาวะที่แตกต่างกัน นั่นหมายความว่าสภาวะไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำอย่างมีนัยสำคัญค่า F-statistic ที่ได้คือ 3.410670 แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มสภาวะมีน้อยกว่าความแปรปรวนภายในกลุ่ม

ตารางที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง

ปัจจัย	sum_sq	df	F	P-value
ความเร็วรอบ	0.01547	2	18.907648	0.009151
สภาวะ	0.00307	2	3.751977	0.1209
Error	0.001636	4		

α = 0.05

จากตารางที่ 7 จากตาราง ANOVA ข้างต้น พบว่าความเร็วรอบ มีค่า p-value เท่ากับ 0.009151 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มความเร็วที่แตกต่างกัน นั่นหมายความว่าความเร็วมีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กกล้าคาร์บอนสูงอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า F-statistic ที่สูงถึง 18.907648 ยังยืนยันถึงความแปรปรวนระหว่างกลุ่มความเร็วที่มีมากกว่าความแปรปรวนภายในกลุ่มในทางกลับกัน สำหรับสภาวะ ค่า p-value เท่ากับ 0.120900 ซึ่งสูงกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มสภาวะที่แตกต่างกัน นั่นหมายความว่าสภาวะไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กกล้าคาร์บอนสูงอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า F-statistic ที่ได้คือ 3.751977 แสดงให้เห็นว่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มสภาวะมีน้อยกว่าความแปรปรวนภายในกลุ่ม

ผลจากทั้งตารางที่ 6 และ 7 การวิเคราะห์ ANOVA ชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลที่แตกต่างกันของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อ

อัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งสองชนิด โดยความเร็วรอบแสดงให้เห็นถึงนัยสำคัญทางสถิติที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนักของเหล็กกล้าทั้งชนิดคาร์บอนต่ำและสูง (p-value < 0.05) ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Asmara และคณะ [8] ซึ่งพบว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้นเช่นกัน ความสัมพันธ์เชิงบวกนี้สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการถ่ายโอนมวลที่เพิ่มขึ้นจากการไหลของของไหล

5.3 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N ratio)

โดยร้อยละการสูญเสียน้ำหนักและความเสถียรของระบบต่อปัจจัยรบกวนของเหล็กคาร์บอนต่ำและเหล็กคาร์บอนต่ำ แสดงดังตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 การสูญเสียน้ำหนักและความเสถียรของเหล็กคาร์บอนต่ำ

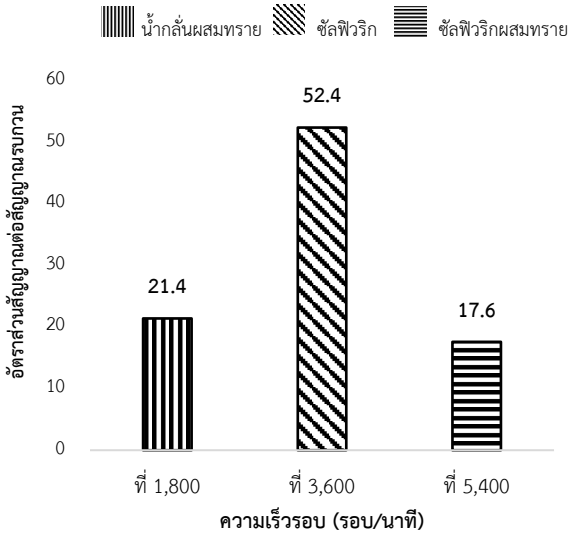
ความเร็วรอบ (RPM)	สภาวะ	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักสูญเสีย (%)	S/N ratio
1,800	น้ำกลั่นทราย	0.08230	21.4
3,600	ซัลฟิวริก	0.00223	52.4
5,400	ซัลฟิวริกทราย	0.12700	17.6

จากตารางที่ 6 แสดงค่าเฉลี่ยร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสีย และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสถียรของกระบวนการ ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำภายใต้ความเร็วรอบและสภาวะที่แตกต่างกัน พบว่าที่ความเร็วรอบ 3,600 รอบต่อนาที ในกรดซัลฟิวริก ให้ค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด และมีความเสถียรของกระบวนการสูงที่สุด ในขณะที่ความเร็วรอบ 5,400 รอบต่อนาที ในกรดซัลฟิวริกผสมทราย ให้ค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด และมีความเสถียรของกระบวนการต่ำที่สุด

ตารางที่ 9 การสูญเสียน้ำหนักและความเสถียรของเหล็กคาร์บอนสูง

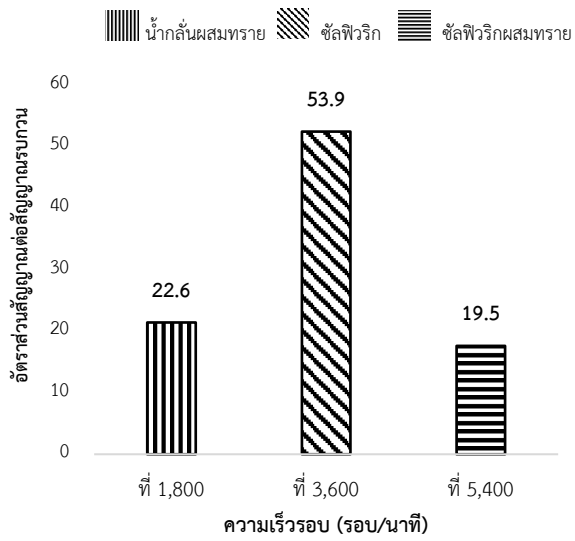
ความเร็ว (RPM)	สภาวะ	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักสูญเสีย (%)	S/N ratio
1,800	น้ำกลั่นทราย	0.07070	22.6
3,600	ซัลฟิวริก	0.00190	53.9
5,400	ซัลฟิวริกทราย	0.10100	19.5

จากตารางที่ 9 ผลการทดลองแสดงให้เห็นแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยที่ความเร็วรอบ 3,600 รอบต่อนาที ในกรดซัลฟิวริก ให้ค่าเฉลี่ยร้อยละการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด และมีความเสถียรของกระบวนการสูงที่สุดเช่นเดียวกัน ความเร็วรอบ 5,400 รอบต่อนาที ในกรดซัลฟิวริกผสมทราย ให้ค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด และมีความเสถียรของกระบวนการต่ำที่สุด



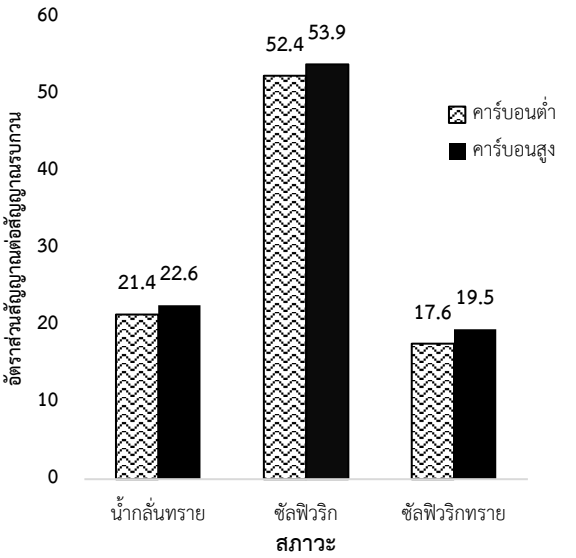
ภาพที่ 5 ระดับปัจจัยกับอัตราสัญญาณสิ่งรบกวนเหล็กคาร์บอนต่ำ

จากภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีค่าสูงที่สุดที่ความเร็วรอบ 3,600 รอบต่อนาที ในสภาวะกรดซัลฟิวริก รองลงมา คือ ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาทีในสภาวะน้ำกลั่นผสมทราย



ภาพที่ 6 ระดับปัจจัยกับอัตราสัญญาณสิ่งรบกวนเหล็กคาร์บอนสูง

จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ของเหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีค่าสูงที่สุดที่ความเร็วรอบ 3,600 รอบต่อนาที ในสภาวะกรดซัลฟิวริกเช่นเดียวกัน รองลงมาคือ ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที ในสภาวะน้ำกลั่นผสมทราย



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบระดับปัจจัยกับอัตราสัญญาณสิ่งรบกวนที่แบ่งตามประเภทชนิดเหล็กกล้าคาร์บอน

จากภาพที่ 7 เปรียบเทียบอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ในสภาวะต่าง ๆ พบว่าโดยรวมเหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงกว่าเล็กน้อยในทุกสภาวะ และทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงที่สุดในสภาวะกรดซัลฟิวริก รองลงมาคือ สภาวะน้ำกลั่นผสมทราย

6. สรุปและอภิปรายผล

ศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1018) และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (AISI 1060) ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน 3 สภาวะ ได้แก่ น้ำกลั่นผสมทราย, สารละลายกรดซัลฟิวริกความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 และสารละลายกรดซัลฟิวริกความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 ผสมทราย โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทากุชิ ร่วมกับชุดทดสอบโรเทตติ้งไซลินเดอร์อิเล็กโทรด ที่ความเร็วรอบ 1,800 3,600 และ 5,400 รอบต่อนาที เพื่อจำลองสภาวะการไหล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งสองชนิดแสดงความต้านทานต่อการกัดกร่อน-สึกกร่อนที่ดีในทุกสภาวะแวดล้อมที่ทำการทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะสารละลายกรดซัลฟิวริกความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 ที่ไม่มีทรายผสม ซึ่งเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งสองชนิดมีค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสูงกว่าเล็กน้อย (53.9) เมื่อเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (52.4) ซึ่งบ่งชี้ถึงความทนทานต่อการกัดกร่อน-สึกกร่อนที่ดีกว่าเล็กน้อย ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับทฤษฎีการกัดกร่อนแบบไหลวน (Flow-induced corrosion) [18] ที่อธิบายว่าความเร็วของของไหลมีผลต่ออัตราการกัดกร่อน จากผลการวิเคราะห์ ANOVA ยิ่งยืนยันความสัมพันธ์นี้ โดยแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญของความเร็วรอบต่ออัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อนทั้งในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและสูง

การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบส่งผลให้เกิดการไหลที่ปั่นป่วนมากขึ้น ซึ่งเร่งการถ่ายโอนมวลของสารกัดกร่อนไปยังพื้นผิวโลหะและการกำจัดผลิตภัณฑ์กัดกร่อนออกจากพื้นผิว ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนโดยรวมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ผลการวิจัยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Asmara และคณะ [8], Evans และคณะ [9], Musabikha และคณะ [10] ที่พบว่าอัตราการไหลที่สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของวัสดุสูงขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ Eduok และ Szpunar [12] ยังรายงานว่าเหล็กกล้าคาร์บอนมีความไวต่อการกัดกร่อนในสภาวะ CO2 ซึ่งเป็นสภาวะที่มีความเป็นกรด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในบทความนี้ที่พบว่าเหล็กกล้าคาร์บอนทนทานต่อการกัดกร่อน-สึกกร่อนได้ดีในสภาวะกรดซัลฟิวริก ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 4 Wood and Cook [11] ยังเน้นย้ำถึงบทบาทของอนุภาคแขวนลอย เช่น ทราย ในการกัดกร่อน-สึกกร่อน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในบทความนี้ที่พบว่าการผสมทรายในน้ำกลั่นและสารละลายกรดซัลฟิวริกส่งผลให้อัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อนสูงขึ้น งานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Asmara และคณะ [8] แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคทากุชิในการออกแบบการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบและสภาวะแวดล้อมต่อการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นหลัก การทดลองนี้จำกัดอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งอาจไม่สะท้อนสภาวะการใช้งานจริงในบางอุตสาหกรรม ในอนาคตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยอื่นๆ เช่น ชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอน การเคลือบผิว อุณหภูมิ รวมถึงทดสอบในสภาวะแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับสภาวะการใช้งานจริงมากขึ้น เช่น สภาวะที่มี CO2, H2S นอกจากนี้ การนำเทคนิคการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical simulation) มาใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนในสภาวะที่ซับซ้อนมากขึ้นจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งชนิดคาร์บอนต่ำและคาร์บอนสูงมีศักยภาพในการใช้งาน ในกระบวนการหรืออุตสาหกรรมที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูง ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบท่อส่งในอุตสาหกรรมเคมีที่ต้องเผชิญกับสภาวะกรดและการไหลที่รุนแรง การประยุกต์ใช้เทคนิคทากุชิช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด

7. ข้อเสนอแนะการนำไปใช้งาน

7.1 ข้อค้นพบสำคัญ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งชนิดคาร์บอนต่ำและสูง ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบทากุชิและชุดทดสอบโรเทตติ้งไซลินเดอร์อิเล็กโทรด เพื่อจำลองสภาวะการไหล ผลการวิจัยเผยให้เห็นข้อค้นพบที่น่าสนใจหลายประการ ประการแรก ความเร็วรอบของของไหลมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่ออัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนโดยความเร็วที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนมากขึ้น สอดคล้องกับทฤษฎีการกัดกร่อนแบบไหลวน (Flow induced corrosion) ซึ่งอธิบายว่าการไหลที่เร็วขึ้นทำให้เกิดการปั่นป่วนและการเสียดสีกับพื้นผิวโลหะ เร่งกระบวนการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อน แม้ว่าจะมีการทดสอบในสารละลายกรดซัลฟิวริก น้ำกลั่นผสมทราย และสารละลายกรดซัลฟิวริกผสมทราย แต่อัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อนไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่น่าสนใจ คือ ผลการวิจัยพบว่าเหล็กกล้าคาร์บอนสูงแสดงความทนทานต่อการกัดกร่อน-สึกกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเล็กน้อย แม้ว่าความแตกต่างจะไม่มากนัก แต่ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเหล็กกล้า

คาร์บอนสูงในการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังยืนยันถึงประสิทธิภาพของเทคนิคทากุชิในการออกแบบการทดลอง ซึ่งช่วยลดจำนวนการทดลองที่ต้องทำแต่ยังคงให้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ และช่วยให้สามารถหาค่าที่เหมาะสมเพื่อลดอัตราการกัดกร่อน-สึกกร่อนได้ ข้อค้นพบเหล่านี้มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการเลือกใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนที่เหมาะสมกับการใช้งาน และต่อการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ที่ทนทานต่อการกัดกร่อน-สึกกร่อน เช่น ระบบท่อส่งในอุตสาหกรรมเคมีหรืออุปกรณ์ทาง

7.2 ข้อเสนอแนะ

นอกจากนี้ควรมีการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนในช่วง 50-100 องศาเซลเซียส เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อีกทั้งยังสามารถใช้ผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน-สึกกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน เช่น การพัฒนาสารเคลือบผิวชนิดใหม่ ที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน-สึกกร่อนในสภาวะที่รุนแรงมากขึ้น หรือการพัฒนาเทคนิคการเคลือบผิว ที่สามารถสร้างชั้นเคลือบผิวที่มีความหนาสม่ำเสมอ และยึดเกาะกับผิวโลหะได้ดี การนำข้อเสนอแนะเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้จะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือเป็นอย่างสูง ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ผลงานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ และการพัฒนาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Huang, Y. *et al.* 2021. “Optimization of weld strength for laser welding of steel to PMMA using Taguchi design method,” *Optics & Laser Technology*. 136(1): pp. 1–11.

[2] Minh, P. S., Dang, H.-S., and Ha, N. C. 2023. “Optimization of 3D cooling channels in plastic injection molds by Taguchi-integrated principal component analysis (PCA),” *Polymers*. 15(5): pp. 1–23.

[3] Aman, A., Bhardwaj, R., Gahlot, P., and Phanden, R. K. 2023. “Selection of cutting tool for desired surface finish in milling Machine using Taguchi optimization methodology,” *Materialstoday: Proceedings*. 78: pp. 444–448.

[4] Doubi, Y. *et al.* 2022. “Optimization with Taguchi Approach to Prepare Pure TiO2 Thin Films for Future Gas Sensor Application,” *J. Electron. Mater.* 51(7): pp. 3671–3683.

[5] Lv, B. and Cai, J. 2023. “Simulation and analysis of geometric parameters based on Taguchi method in YY microfluidic device for circulating tumor cell separation by alternating current dielectrophoretic,” *Journal of Chromatography.* A1693: pp. 463894.

[6] Mansour, N. M., El-Sherbiny, D. T., Ibrahim, F. A., and El-Subbagh, H. I. 2022. “Taguchi Approach for Optimization of a Green Quantitative 1H-NMR Practice for Characterization of Levetiracetam and Brivaracetam in Pharmaceuticals,” *Journal of AOAC International*. 105(6): pp. 1516–1527.

[7] Romdhane, I. B., Jemmali, A., Kaziz, S., Echouchene, F., Alshahrani, T., and Belmabrouk, H. 2023. "Taguchi method: artificial neural network approach for the optimization of high-efficiency microfluidic biosensor for COVID-19," *The European Physical Journal Plus*. 138(4): pp. 138–359.

[8] Asmara, Y. P., Raman, J. G., Suparjo, Herlina, F., and Wei, Y. C. 2024. "Empirical Study of the Effect of Nano coolant Particles on Corrosion Rate of 316 Stainless Steel," *International Journal of Corrosion*. 2024: pp. 1–8.

[9] Evans, K. J., Vera, J., and Mendez, C. 2024. "Effect of Dissolved Oxygen on Carbon Steel Corrosion and Particulate Formation. Part 1: Rotating Cylinder Electrode Experiments," In *Proceedings of the AMPP Annual Conference + Expo.* 3-7 March 2024. New Orleans, U.S. state of Louisiana, pp. C2024-20718.

[10] Musabikha, S. et al. 2024. "The effects of flow rate on impedance measurements of marine coatings using a rotating cylinder electrode," *J Coat Technol Res*. pp. 1–12.

[11] Wood, R. J. and Cook, A. D., 2022. "Erosion-Corrosion in Pipe Flows of Particle-Laden Liquids," *in Advances in Slurry Technology*, *Intech Open.* [Online]. Available: https://www.intechopen.com/chapters/83676. Accessed: 12 July 2024.

[12] Eduok, U. and Szpunar, J. 2020. "Corrosion Inhibitors for Sweet Oilfield Environment (CO_2 Corrosion)," in *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry*. 1st ed., V. S. Saji and S. A. Umoren, Eds. Wiley, pp. 177–227.

[13] He, D. D., Jiang, X. X., Li, S. Z., and Guan, H. R. 2005. "Erosion-corrosion of stainless steels in aqueous slurries-a quantitative estimation of synergistic effects," *Corrosion*. 61(1): pp. 30–36.

[14] Matsumura, M. 1994. "Erosion-Corrosion of Metallic Materials in Slurries," *Corrosion Reviews*. 12(3–4): pp. 321–340.

[15] Yelamasetti, B., G, V. R., Manikyam, S., and Saxena, K. K. 2022. "Multi-response Taguchi grey relational analysis of mechanical properties and weld bead dimensions of dissimilar joint of AA6082 and AA7075," *Advances in Materials and Processing Technologies*. 8(sup3): pp. 1474–1484.

[16] Caputo, A. C., Federici, A., Pelagagge, P. M., and Salini, P. 2022. "On the design of shell-and-tube heat exchangers under uncertain operating conditions," *Applied Thermal Engineering*. 212: pp.118541: 1–18.

[17] Hussain, Z. 2021. "Comparative Study on Improving the Ball Mill Process Parameters Influencing on the Synthesis of Ultrafine Silica Sand: A Taguchi Coupled Optimization Technique," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 22(4): pp. 679–688.

[18] da Silva, C. A., Pereira, H. B., Taqueda, M. E. S., and Panossian, Z. 2021. “Prediction models for multiphase-flow-induced corrosion of API X80 steel in CO2/H2S environment,” *Materials and Corrosion*. 72(11): pp. 1796–1807.