



## การหาสภาวะที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

ศราวุธ จันทร์กลาง และ ประจักษ์ จัตกุล\*

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี  
นิวัฒน์ มูเก็ม

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล  
กรรณชัย กัลยาศิริ และ สรรพสิทธิ์ ลิ้มนรินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

\* ผู้มีพันธฺ์ประสานงาน โทรศัพท์ 03 9307 2614 อีเมล: prajak\_ja@mutto.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.10.008

รับเมื่อ 1 ธันวาคม 2566 แก้ไขเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2567 ตอรับเมื่อ 27 พฤษภาคม 2567 เผยแพร่ออนไลน์ 2 ตุลาคม 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและนำเสนอวิธีการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey Relational Analysis) เพื่อหาค่าเงื่อนไขหรือตัวแปรในการตัดที่เหมาะสมที่สุดที่มีต่อความหนาผิวและขนาดของชิ้นงาน สำหรับตัวแปรการตัดที่พิจารณาในการศึกษานี้ ได้แก่ ความเร็วในการตัดกระแสไฟฟ้าในการสปาร์คของอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน สำหรับผลตอบสนองที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ขนาดของชิ้นงานและความหนาผิวของชิ้นงาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เงื่อนไขการตัดที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์คือ ความเร็วในการตัดเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร/นาที กระแสไฟฟ้าในการสปาร์คของอิเล็กโทรดกับชิ้นงานเท่ากับ 2 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานเท่ากับ 770 ไมโครเมตร เมื่อใช้เงื่อนไขในการตัดที่ได้จากการศึกษานี้ไปทำการตัดชิ้นงานเพื่อยืนยันผลการศึกษพบว่า ค่าความหนาผิวและขนาดของชิ้นงานมีค่าที่เป็นไปตามที่กีดความเผื่อ (Tolerance) ตามที่ได้กำหนดไว้

**คำสำคัญ:** วิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ขนาดของชิ้นงาน ความหนาผิว

การอ้างอิงบทความ: ศราวุธ จันทร์กลาง, ประจักษ์ จัตกุล, นิวัฒน์ มูเก็ม, กรรณชัย กัลยาศิริ และ สรรพสิทธิ์ ลิ้มนรินทร์, “การหาสภาวะที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 3, หน้า 1-15, เลขที่บทความ 253-057460, ก.ค.-ก.ย. 2568.



## Optimization of Wire-EDM Process Parameters for K460 Tool Steel Using Gray Relation Analysis Methodology

Sarawut Junklang and Prajak Jattakul\*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Integrated Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus, Chanthaburi, Thailand

Niwat Mookam

Department of Industrial and Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus, Prachuap Khiri Khan, Thailand

Kannachai Kanlayasiri and Sunpasit Limnararat

Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 03 9307 2614, E-mail: prajak\_ja@rmutto.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.10.008

Received 1 November 2023; Revised 1 February 2024; Accepted 27 May 2024; Published online: 2 October 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research aimed to study and present a technique for optimizing the cutting conditions of K460 tool steel using wire electric discharge machining. Grey relational analysis was employed as the experimental strategy to assess its effects on surface roughness and dimensional accuracy. The cutting variables investigated in this study included cutting speed, peak current, and offset distance. The specific characteristics considered as multiple responses were dimensional accuracy and surface roughness. Results showed that the optimal cutting conditions were a cutting speed of 4.5 mm/min, a peak current of 2 A, and an offset distance of 770  $\mu\text{m}$ . Confirmation tests were conducted to validate the optimal cutting conditions, and all cut specimens met the specified criteria.

**Keywords:** Wire-EDM, Grey Relational Analysis, Dimensional Accuracy, Surface Roughness

Please cite this article as: S. Junklang, P. Jattakul, N. Mookam, K. Kanlayasiri, and S. Limnararat, "Optimization of wire-EDM process parameters for K460 tool steel using gray relation analysis methodology," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 3, pp. 1–15, ID. 253-057460, Jul.–Sep. 2025 (in Thai).

## 1. บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ เช่น ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนอากาศยาน และชิ้นส่วนในการผลิตแม่พิมพ์ ความถูกต้อง และความเที่ยงตรงของขนาด และความหยาบผิวของชิ้นส่วนที่ผลิตนั้น มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อคุณภาพในด้านการผลิต และการประกอบเป็นชิ้นงาน ซึ่งชิ้นส่วนที่ผ่านการผลิต และการประกอบเหล่านี้ จำนวนมากถูกผลิตขึ้นโดยใช้การฉีดด้วยแม่พิมพ์พลาสติก และการปั๊มขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์โลหะ ด้วยเหตุนี้ความเที่ยงตรงและความถูกต้องของชิ้นส่วนดังกล่าวจึงถูกกำหนดโดยคุณภาพของการฉีดและการปั๊มขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เป็นหลัก วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์มักจะเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปได้ยาก เช่น โลหะที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูง มีความต้านทานต่อการสึกหรอได้ดี และทนต่อแรงกระแทกได้ดี [1]–[4] ซึ่งการขึ้นรูปแบบทั่วไป หรือแบบดั้งเดิม (Conventional Machining) นั้นทำได้ยาก ดังนั้น จึงได้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตหรือการแปรรูปชิ้นงานด้วยวิธีใหม่ (Non-traditional Machining) เช่น Wire Electric Discharge Machining (Wire-EDM) ซึ่งเป็นวิธีการผลิตที่รู้จักกันดีในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ เพราะมีประสิทธิภาพในการตัดชิ้นงานที่มีคุณสมบัติในด้านความแข็งแรง ความแข็ง ความแกร่งที่มีค่าสูง ๆ และตัดชิ้นงานที่มีรูปแบบซับซ้อนได้ดี และได้ชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูง ดังนั้น จึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ในงานวิจัยของกรรณชัย และประจักษ์ [5] ได้ทำการศึกษาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือด้วย Wire-EDM เพื่อนำไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์เพื่อผลิตชิ้นส่วนนาฬิกาและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัย Mathew และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการตัดวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม AISI304 ด้วย Wire-EDM ในงานวิจัย Saedon และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ความหยาบผิวที่ดีที่สุดด้วยอัตราการตัดที่เหมาะสมและอัตราการตัดเนื้อวัสดุกับวัสดุไทเทเนียมผสมด้วย Wire-EDM ในงานวิจัยของ Mishra และ Routara [8] ได้ทำการศึกษาและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่มีต่ออัตราการ

ตัดเนื้อวัสดุและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดกับวัสดุเหล็กกล้าผสม EN-24 ด้วย EDM ในงานวิจัยของ นิวัฒน์ [9] ได้ทำการศึกษาและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัดวัสดุไทเทเนียมด้วย Wire-EDM ที่มีต่อความหยาบผิวและระยะเวลาการตัดเกิน และในงานวิจัยของ Varun และ Venkaiah [10] ได้ทำการศึกษาและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวัสดุโลหะผสม EN 353 ที่มีต่ออัตราการตัดเนื้อวัสดุ ความหยาบผิว และระยะเวลาการตัดเกิน

การแปรรูปชิ้นงาน แบบปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire-EDM) เป็นกระบวนการแปรรูปด้วยพลังงานความร้อน โดยการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าหรือการสปาร์ค ที่ออกมาเป็นช่วง ๆ ผ่านเส้นลวดไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ทำให้อุณหภูมิบนชิ้นงาน ณ จุดใดจุดหนึ่งสูงพอที่จะหลอมละลายชิ้นงาน [11], [12] ซึ่งในกระบวนการตัดด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นในของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric Fluid) ที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน ในกระบวนการแปรรูปด้วย Wire-EDM นั้น กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในช่องว่างระหว่างเส้นลวดที่เป็นอิเล็กโทรดและชิ้นงาน โดยเส้นลวดที่เป็นอิเล็กโทรดเชื่อมต่อกับขั้วลบ และชิ้นงานเชื่อมต่อกับขั้วบวกของวงจรไฟฟ้า เนื่องจากมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิจึงสูงถึงประมาณ 8,000 ถึง 12,000 องศาเซลเซียส ส่งผลให้บริเวณนั้นเกิดการละลายและกลายเป็นไอ [13], [14] และวัสดุจะถูกกำจัดออกไปในรูปของเศษผง ซึ่งจะถูกชะล้างออกไปโดยของเหลวไดอิเล็กทริก [15]

การแปรรูปชิ้นส่วนของแม่พิมพ์ด้วย Wire-EDM เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนมาก เนื่องจากการปล่อยกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รุนแรงในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้น จึงทำให้เกิดปัญหาในการควบคุมพารามิเตอร์ในการแปรรูป และการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการแปรรูปด้วย Wire-EDM [16]–[18] ความถูกต้องและเที่ยงตรงในส่วนของขนาดของแม่พิมพ์จะเป็นตัวกำหนดความแม่นยำด้านขนาดของชิ้นงานที่ถูกผลิตออกมาโดยตรง ในขณะที่ความหยาบผิวที่มีคุณภาพสูงจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานต่อการล้า และความต้านทานการกัดกร่อนของแม่พิมพ์ได้ [5], [19], [20] ซึ่งจากการศึกษา

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการศึกษาด้านอิทธิพลของตัวแปร การตัดด้วย Wire-EDM เช่น ความเร็วตัด กระแสไฟฟ้าในการ ตัด และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานในการตัดที่มีต่อ ขนาดของชิ้นงานและความหยาบผิวที่ชิ้นงาน เนื่องจากความ หยาบผิวและขนาดของชิ้นงานนั้น เป็นตัวกำหนดคุณภาพ ของชิ้นงานที่ผลิตและประกอบออกมาโดยตรง ถ้าค่าความ หยาบผิวหรือความละเอียดของผิวหน้าชิ้นงาน และขนาด ของชิ้นงานไม่ตรงตามที่กำหนดไว้ อาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์ เกิดความเสียหายขึ้นได้ [5] โดยวิธีต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการ เลือกตัวแปรหรือเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ลักษณะ เฉพาะของการตัดตามที่ต้องการ เช่น วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology) [21] วิธีการทาคุชิ (Taguchi Method) [22] เจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms) [20] ฟัชซีลอจิก (Fuzzy Logic) [23] และวิธีการ ที่เกิดขึ้นจากการผสมกันระหว่างวิธีการเหล่านี้ [24] และจาก การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้วิธีการวิเคราะห์ความ สัมพันธ์แบบเกรย์มาใช้ในการหาผลตอบที่เหมาะสม เช่น ใน งานวิจัยของ Lin และคณะ [25] ได้มีการใช้วิธีการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับ กระบวนการกลึงชิ้นงาน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า อายุการใช้ งานของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 1,059 วินาที เป็น 2,645 วินาที ค่าความหยาบผิวดีขึ้นโดยลดลงจาก 2.754 ไมโครเมตร เป็น 1.239 ไมโครเมตร ในงานวิจัยของ Tzeng และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาโดยใช้วิธีการทาคุชิและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ แบบเกรย์ ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการกลึง ชิ้นงาน จากการศึกษาพบว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการ ศึกษา คือ ความเร็วตัด (Cutting Speed) 155 เมตร/นาที อัตราป้อน (Feed Rate) 0.12 มิลลิเมตร/รอบ ความลึกของ การตัด (Cut Depth) 0.8 มิลลิเมตร และอัตราส่วนของไหล ในการตัดเฉือน (Cutting Fluid Ratio) 12 เปอร์เซ็นต์ และใน งานวิจัยของ Ranganathan และคณะ [27] พบว่า อายุการใช้ งานเครื่องมือตัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น 13.5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เงื่อนไขหรือสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์แบบเกรย์ในการกลึงวัสดุ SS316

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า วิธีการวิเคราะห์

ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการหาค่า ตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับปัญหาหรือกระบวนการที่มี ผลตอบสนองหลายอย่างได้ดี โดยมีจำนวนการทดลองน้อยกว่า วิธีที่จำเป็นต้องมีการทดลองซ้ำ เช่น วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง แพคทอเรียล และวิธีการทาคุชิ และยังสามารถคำนวณได้ง่าย ไม่ซับซ้อน โดยไม่จำเป็นต้องใช้โปรแกรมคำนวณ หรือวิเคราะห์ ทางสถิติหรือทางคณิตศาสตร์ เหมือนวิธีอื่น ๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงจะเป็นประโยชน์สำหรับองค์กรที่มีทรัพยากรจำกัด ดังนั้น จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้มีการนำวิธีการวิเคราะห์ความ สัมพันธ์แบบเกรย์มาใช้ในการศึกษานี้

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อนำเสนอวิธี การปรับปรุงกระบวนการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ด้วย วิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์แบบเกรย์ เพื่อหาค่าเงื่อนไขหรือตัวแปรใน การตัดที่เหมาะสมที่สุดที่มีต่อความหยาบผิวและขนาดของ ชิ้นงาน สำหรับตัวแปรการตัดที่ทำการศึกษาในการศึกษานี้ ได้แก่ ความเร็วในการตัด กระแสไฟฟ้าในการสปาร์คของ อิเล็กโทรดกับชิ้นงาน และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับ ชิ้นงาน ส่วนลักษณะเฉพาะของการตัดหรือผลตอบสนอง ที่ศึกษา ได้แก่ ขนาดของชิ้นงานและความหยาบของผิว ของชิ้นงาน และนำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์ความ สัมพันธ์แบบเกรย์ เพื่อให้ได้เงื่อนไขของการตัดที่เหมาะสม ที่สุด เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ที่เกี่ยวข้อง

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 สมมติฐานหรือแนวความคิดที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ หรือชิ้นส่วนนาฬิกา และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ความหยาบผิวและขนาดของแม่พิมพ์ เป็นตัวกำหนด คุณภาพของชิ้นส่วนที่ผลิต และประกอบออกมาโดยตรง ดังนั้น ความถูกต้องและความเที่ยงตรงของขนาดและความ หยาบผิวของแม่พิมพ์ จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อ คุณภาพในด้านการผลิตและการประกอบของชิ้นส่วนใน อุตสาหกรรมดังกล่าว ถ้าค่าความหยาบผิวหรือขนาดของ

ชิ้นส่วนไม่ตรงตามที่กำหนดไว้ อาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายขึ้นได้ [5] ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ มาช่วยในการหาผลตอบหรือสภาวะที่เหมาะสม ในการตัดชิ้นงานที่ใช้ทำเป็นแม่พิมพ์ด้วยเครื่อง Wire-EDM เพื่อสร้างแม่พิมพ์ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ ซึ่งจะช่วยลดของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตได้

## 2.2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 ผลิตโดย Bohler Steel ประเทศออสเตรีย ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับการชุบแข็งด้วยน้ำมัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยมาก และเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดใหม่ที่นิยมใช้ทำแม่พิมพ์สำหรับงานขึ้นรูปเย็น เครื่องมือตัด (ตายและฟันซ์) และเจาะรู รวมทั้งชิ้นส่วนของเครื่องจักร [5], [28] ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 แสดงดังตารางที่ 1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีขนาด (กว้าง×ยาว×หนา) 95×150×20 มิลลิเมตร โดยทำการเจียรในผิวเพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานที่มีความเรียบ และใช้เครื่อง CNC Wire Cut EDM ของ Agie Charmilles รุ่น Agie Cut Progress V2 ในการตัดชิ้นงาน โดยลวดที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน คือ Cobra Cut A ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.150 มิลลิเมตร ซึ่งมีส่วนผสมของทองแดง (Cu) และเคลือบด้วยสังกะสี (Zn) หลังจากนั้นทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาดของชิ้นงาน (Dimension) กว้าง × ยาว เท่ากับ 5.000 × 5.000 มิลลิเมตร โดยมีค่าความผิดพลาด  $\pm 0.002$  มิลลิเมตร สำหรับค่าความหยาบผิว (Surface Roughness;  $R_a$ ) ที่ต้องการเท่ากับ 0.300 ไมโครเมตร โดยมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.330 ไมโครเมตร หรือเลือกตัวแปรการตัด

ที่ให้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดสำหรับการศึกษานี้ โดยใช้ปัจจัยหรือตัวแปรในการตัด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 [28]

| ส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก; wt%) |      |      |      |      |      |        |
|---|------|------|------|------|------|--------|
| C   | Cr   | W    | Si   | Mn   | V    | Fe     |
| 0.95  | 0.55 | 0.55 | 0.25 | 1.10 | 0.10 | Remain |

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองเบื้องต้นโดยตัดชิ้นงานในการตัดละเอียดครั้งสุดท้าย (Finishing Cut) ที่ความเร็วในการตัดที่ต่ำกว่า 3.5 มิลลิเมตร/นาที (เครื่องสามารถปรับได้ที่ที่ตตินิยม 1 ตำแหน่ง) และระยะห่างของเส้นลวดกับชิ้นงานที่ต่ำกว่า 770 ไมโครเมตร โดยที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำสุด 1 แอมแปร์ พบว่า เกิดรอยเส้นลวดบนพื้นผิวของชิ้นงานจำนวนหลายจุด ส่งผลให้ความหยาบผิว และขนาดของชิ้นงานไม่ได้ตามแบบที่กำหนด ในกรณีของชิ้นงานที่ต้องนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนแม่พิมพ์ปั๊ม (Stamping Tool) เพื่อใช้ผลิตชิ้นส่วนนาฬิกา หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้น ชิ้นส่วนของแม่พิมพ์จะต้องมีความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงานตรงตามแบบที่กำหนด ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้เลือกค่าเงื่อนไขที่เป็นความเร็วในการตัดชิ้นงานต่ำสุด 3.5 มิลลิเมตร/นาที ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานต่ำสุด 770 ไมโครเมตร และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดต่ำสุด 1 แอมแปร์ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นระดับของปัจจัยในการตัดชิ้นงาน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงใช้เงื่อนไข หรือปัจจัย และระดับของปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 2 มาทำการทดลองตัดด้วย Wire Cut EDM แล้วนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดมาทำการวัดขนาด และความหยาบของผิวของชิ้นงาน โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัดขนาดชิ้นงาน

ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัยในการตัด

| ปัจจัย  | ระดับ/รหัส |     |      |
|---|------------|-----|------|
|   | 1/-1       | 2/0 | 3/+1 |
| ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (Cutting speed; มิลลิเมตร/นาที)       | 3.5        | 4.5 | 5.5  |
| กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Peak current; แอมแปร์)              | 1          | 2   | 3    |
| ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset distance; ไมโครเมตร) | 770        | 780 | 790  |

ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยในการตัดและผลตอบของความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงาน

| ลำดับการทดลอง | ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที) | กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (แอมแปร์) | ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (ไมโครเมตร) | ความหยาบผิว (ไมโครเมตร) | ขนาดของชิ้นงาน (มิลลิเมตร) |
|---------------|--|------------------------------------|--|-------------------------|----------------------------|
| 1             | -1                                       | 1                                  | 0  | 0.7680                  | 5.0032                     |
| 2             | -1                                       | -1                                 | 0  | 0.1990                  | 5.0022                     |
| 3             | 0  | 1                                  | -1   | 0.6980                  | 5.0006                     |
| 4             | 1  | 0                                  | 1  | 0.190                   | 5.0029                     |
| 5             | 1  | 0                                  | -1   | 0.1980                  | 5.0005                     |
| 6             | 0  | 1                                  | 1  | 0.7250                  | 5.0033                     |
| 7             | 0  | -1                                 | -1   | 0.1760                  | 5.0006                     |
| 8             | -1                                       | 0                                  | 1  | 0.2440                  | 5.0037                     |
| 9             | 0  | 0                                  | 0  | 0.1990                  | 5.0011                     |
| 10            | 0  | 0                                  | 0  | 0.1950                  | 5.0010                     |
| 11            | 1  | 1                                  | 0  | 0.6760                  | 5.0038                     |
| 12            | 0  | 0                                  | 0  | 0.2250                  | 5.0012                     |
| 13            | 1  | -1                                 | 0  | 0.2420                  | 5.0016                     |
| 14            | -1                                       | 0                                  | -1   | 0.2210                  | 4.9996                     |
| 15            | 0  | -1                                 | 1  | 0.2070                  | 5.0029                     |

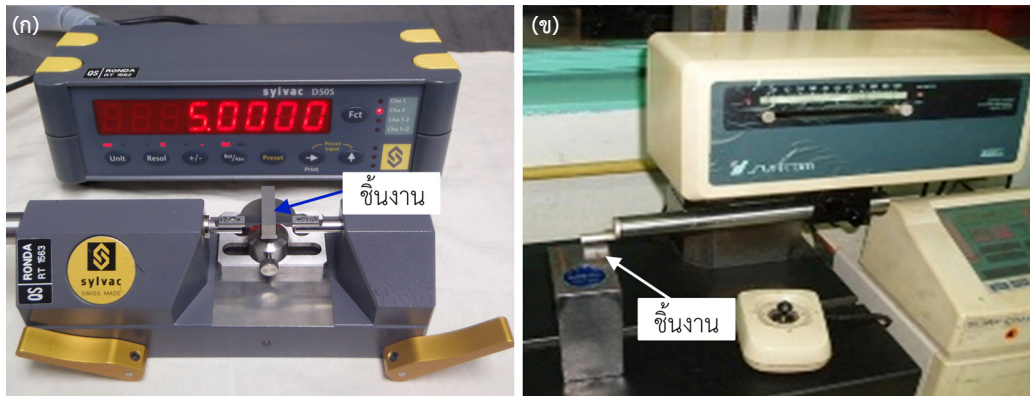
แบบดัดจัตตอล SYLVAC รุ่น D505 มีหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร และสามารถปรับความละเอียดหรือทศนิยมการวัดได้ 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) โดยลักษณะเฉพาะของการตัดที่ศึกษาที่เป็นขนาดของชิ้นงานนั้น ต้องการให้ได้ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด คือ กว้าง×ยาว เท่ากับ 5.000×5.000 มิลลิเมตร โดยมีค่าความผิดพลาด  $\pm 0.002$  มิลลิเมตร หรือให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด สำหรับค่าความหยาบผิวของชิ้นงานนั้นใช้เครื่องวัดความหยาบผิว TOKYO SEIMITSU รุ่น SURFCOM 480A ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) เพื่อทำการวัดค่าความหยาบผิว ( $Ra$ ) ที่ตำแหน่งผิวของชิ้นงานตามแนวการตัด โดยใช้ช่วงในการวัด (Stroke) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ความเร็วในการวัดเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร/วินาที และ Cut-off Length เท่ากับ 0.80 มิลลิเมตร สำหรับลักษณะเฉพาะของการตัดที่ศึกษาที่เป็นความหยาบผิวของชิ้นงานนั้น ต้องการให้ได้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด แล้วทำการบันทึกผลลงในตารางการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 สำหรับในการศึกษานี้ ได้ทำการเลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ

Box-Behnken ในการช่วยออกแบบการทดลองสำหรับตัวแปรสามตัวแปร และมีสามระดับในการทดลองในแต่ละหนึ่งตัวแปร ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ และโดยทั่วไปแล้ว การเพิ่มจำนวนในการทดลองจะให้ความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็เป็นการเพิ่มต้นทุนในการศึกษา

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสม สำหรับปัญหาหรือกระบวนการที่มีผลตอบสนองหลายอย่าง ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ เป็นการเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรแต่ละตัวที่ระดับต่าง ๆ โดยผ่านตัวแปรที่เรียกว่า เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey Relation Grade) ซึ่ง



รูปที่ 1 เครื่องมือวัดขนาดและค่าความหยาบผิว (ก) ดิจิตอลไมโครมิเตอร์ และ (ข) เครื่องวัดความหยาบผิว

ถ้าระดับใดของตัวแปรหนึ่ง ๆ ให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงค่าอ้างอิงมากมีค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์มาก โดยทำการเลือกใช้ระดับของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สูงสุด ซึ่งให้ผลตอบสนองที่ดีในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้น เริ่มต้นด้วยการแปลงผลตอบสนองที่อยู่ในรูปของข้อมูลดิบให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)}{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)} \quad (1)$$

$$x_i^*(k) = \frac{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)}{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)} \quad (2)$$

โดยที่  $x_i^*(k)$  คือ ผลตอบสนองที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิบของการทดลอง  $k$ ,  $x_i^{(0)}(k)$  คือ ผลตอบสนองที่อยู่ในรูปของข้อมูลดิบของการทดลอง  $k$ ,  $\min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$  คือ ผลตอบสนองที่อยู่ในรูปของข้อมูลดิบที่มีค่าน้อยที่สุดของการทดลอง  $k$ , และ  $\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$  คือ ผลตอบสนองที่อยู่ในรูปของข้อมูลดิบที่มีค่ามากที่สุดของการทดลอง  $k$

จากสมการที่ (1) เหมาะสำหรับการแปลงข้อมูลที่มีค่าผลตอบสนองที่มีค่ามาก แล้วให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด (The-larger-the-better) และจากสมการที่ (2) เหมาะสำหรับการแปลงข้อมูลที่มีค่าผลตอบสนองที่มีค่าน้อย แล้วให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด (The-smaller-the-better) สำหรับ

ในการศึกษานี้ผลตอบสนองในกรณีของความหยาบผิว เป็นผลตอบสนองในรูปแบบที่ยังมีค่าน้อยยิ่งดี และผลตอบสนองในกรณีของขนาดของชิ้นงาน กำหนดให้เป็นผลตอบสนองในรูปแบบเป้าหมาย (Target) โดยจะแปลงผลตอบสนองที่เป็นรูปแบบเป้าหมายให้อยู่ในรูปแบบยังมีค่าน้อยยิ่งดี ซึ่งให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด

หลังจากที่ได้แปลงผลตอบสนองให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 แล้วนำผลตอบสนองมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ โดยสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0_i}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (3)$$

เมื่อ  $\zeta(k)$  คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองที่  $i$  ของการทดลอง  $k$  และ  $\zeta$  คือสัมประสิทธิ์ความแตกต่าง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่  $\Delta_{\min}$ ,  $\Delta_{\max}$  และ  $\Delta_{0_i}(k)$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)–(6) ตามลำดับ

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} |x_0^*(k) - x_j^*(k)| \quad (4)$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} |x_0^*(k) - x_j^*(k)| \quad (5)$$

$$\Delta_{0_i}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (6)$$

เมื่อ  $\Delta_{0_i}(k)$  คือ ผลต่างระหว่างผลตอบสนองในกรณีอุดมคติ  $x_0^*(k)$  กับผลตอบสนองจากการทดลอง  $x_i^*(k)$  โดยที่เกรตความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (7)$$

เมื่อ  $\gamma_i$  คือ เกรตความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองที่  $i$  ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองที่  $i$  จำนวน  $n$  การทดลอง [29]–[33]

### 3.2 ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของการศึกษานี้ เริ่มต้นด้วยการแปลงข้อมูลดิบ ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยใช้สมการที่ (2) ในกรณีของผลตอบสนองที่เป็นความหยาบผิว ซึ่งลักษณะเฉพาะของการตัด คือ ความหยาบผิวของชิ้นงาน

ต้องการให้น้อยที่สุด ดังนั้นจึงได้กำหนดให้เป็นผลตอบสนองในรูปแบบที่ยังมีค่าน้อยยิ่งดี และผลตอบสนองที่เป็นขนาดของชิ้นงานซึ่งลักษณะเฉพาะของการตัด คือ ผลตอบสนองในรูปแบบเป้าหมาย โดยจะแปลงผลตอบสนองที่เป็นรูปแบบเป้าหมายให้มีค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด ดังนั้นจึงได้กำหนดให้เป็นผลตอบสนองในรูปแบบที่ยังมีค่าน้อยยิ่งดีเช่นเดียวกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าหลังจากที่ได้ทำการแปลงข้อมูลที่เป็นผลตอบสนองแล้วในกรณีของความหยาบผิวที่น้อยที่สุดจะแปลงค่าได้เท่ากับ 1 และค่าความผิดพลาดของขนาดของชิ้นงานที่น้อยที่สุดจะแปลงค่าได้เท่ากับ 1 เช่นเดียวกัน

เมื่อทำการแปลงค่าผลตอบสนองให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 แล้ว จากนั้นจึงทำการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ และเกรตความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนอง โดยใช้สมการที่ (3) และ (7) ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ผลตอบสนองของความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงาน

| ลำดับ | ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (มิลลิเมตร/นาที) | กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (แอมแปร์) | ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (ไมโครเมตร) | ความหยาบผิว (ไมโครเมตร) | ขนาดของชิ้นงาน (มิลลิเมตร) | ค่าผิดพลาดของขนาดชิ้นงาน (มิลลิเมตร) | ความหยาบผิว [0-1] | ขนาดของชิ้นงาน [0-1] | ความเบี่ยงเบนของความหยาบผิว | ความเบี่ยงเบนของขนาดของชิ้นงาน |
|-------|--|------------------------------------|--|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1     | -1                                       | 1                                  | 0  | 0.7680                  | 5.0032                     | 0.0032                               | 0.0000            | 0.1765               | 1.0000                      | 0.8235                         |
| 2     | -1                                       | -1                                 | 0  | 0.1990                  | 5.0022                     | 0.0022                               | 0.9611            | 0.4706               | 0.0389                      | 0.5294                         |
| 3     | 0  | 1                                  | -1   | 0.6980                  | 5.0006                     | 0.0006                               | 0.1182            | 0.9412               | 0.8818                      | 0.0588                         |
| 4     | 1  | 0                                  | 1  | 0.1900                  | 5.0029                     | 0.0029                               | 0.9764            | 0.2647               | 0.0236                      | 0.7353                         |
| 5     | 1  | 0                                  | -1   | 0.1980                  | 5.0005                     | 0.0005                               | 0.9628            | 0.9706               | 0.0372                      | 0.0294                         |
| 6     | 0  | 1                                  | 1  | 0.7250                  | 5.0033                     | 0.0033                               | 0.0726            | 0.1471               | 0.9274                      | 0.8529                         |
| 7     | 0  | -1                                 | -1   | 0.1760                  | 5.0006                     | 0.0006                               | 1.0000            | 0.9412               | 0.0000                      | 0.0588                         |
| 8     | -1                                       | 0                                  | 1  | 0.2440                  | 5.0037                     | 0.0037                               | 0.8851            | 0.0294               | 0.1149                      | 0.9706                         |
| 9     | 0  | 0                                  | 0  | 0.1990                  | 5.0011                     | 0.0011                               | 0.9611            | 0.7941               | 0.0389                      | 0.2059                         |
| 10    | 0  | 0                                  | 0  | 0.1950                  | 5.0010                     | 0.0010                               | 0.9679            | 0.8235               | 0.0321                      | 0.1765                         |
| 11    | 1  | 1                                  | 0  | 0.6760                  | 5.0038                     | 0.0038                               | 0.1554            | 0.0000               | 0.8446                      | 1.0000                         |
| 12    | 0  | 0                                  | 0  | 0.2250                  | 5.0012                     | 0.0012                               | 0.9172            | 0.7647               | 0.0828                      | 0.2353                         |
| 13    | 1  | -1                                 | 0  | 0.2420                  | 5.0016                     | 0.0016                               | 0.8885            | 0.6471               | 0.1115                      | 0.3529                         |
| 14    | -1                                       | 0                                  | -1   | 0.2210                  | 4.9996                     | 0.0004                               | 0.9240            | 1.0000               | 0.0760                      | 0.0000                         |
| 15    | 0  | -1                                 | 1  | 0.2070                  | 5.0029                     | 0.0029                               | 0.9476            | 0.2647               | 0.0524                      | 0.7353                         |



ในการศึกษานี้ ได้กำหนดสัมประสิทธิ์ความแตกต่าง (ξ) ของขนาดของชิ้นงาน และค่าความหยาบผิว เท่ากับ 0.5 เท่ากัน เนื่องจากค่าผลตอบสนองทั้งสองมีความสำคัญมาก เพราะจะมีผลกระทบต่อชิ้นงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง ๆ ที่ทำการผลิตออกมา และผลิตเป็นจำนวนมาก ๆ ซึ่งถ้าขนาดของชิ้นงานไม่ตรงตามที่กำหนด ทำให้เสียเวลาในการตัดชิ้นงานใหม่ และในส่วนของความหยาบผิวที่มากกว่าที่กำหนด ทำให้เกิดการสึกหรอของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการตัดเจาะชิ้นงานอย่างรวดเร็ว ส่งผลต่อการเกิดครีบน้ำเงินและทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สั้นลง จากตารางที่ 5 การทดลองที่มีเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สูงสุด คือ การทดลองที่ 7 ซึ่งมีค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์เท่ากับ 0.9474

สำหรับในการวิเคราะห์เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์จากการศึกษานี้พบว่า จำนวนการทดลองทั้งหมด 15 การทดลองพบว่า การทดลองที่ 7 เป็นการทดลองที่ให้ผลการตัดที่ดีที่สุด คือ ให้ค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สูงสุด เมื่อพิจารณาผลตอบสนองที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อย

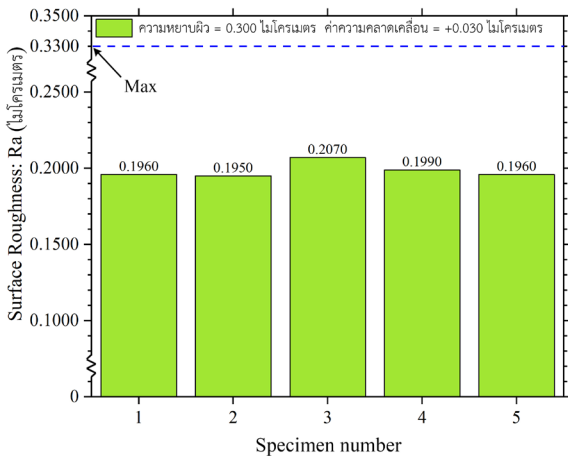
ที่สุด และให้ขนาดของชิ้นงานที่มีค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด โดยให้เงื่อนไขของการตัด คือ ความเร็วในการตัดชิ้นงานที่ 4.5 มิลลิเมตร/นาที กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 1 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานที่ 770 ไมโครเมตร แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขที่ให้ค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สูงสุด ในการศึกษานี้จะทำให้ได้เงื่อนไขในการตัดที่ไม่เหมาะสม

ดังนั้น ในการวิเคราะห์เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์เพื่อเลือกตัวแปรการตัดที่เหมาะสม ในการศึกษานี้จะต้องเลือกจากค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ในแต่ละระดับของตัวแปรในการตัด โดยทำการเลือกจากระดับที่มีค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สูงสุดในแต่ละตัวแปร ซึ่งในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ในแต่ละระดับของตัวแปรในการตัดนั้น สามารถทำได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของทุก ๆ การทดลองที่มีระดับนั้น ๆ ของตัวแปรการตัดชนิดนั้น โดยค่าที่เฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ในแต่ละระดับ

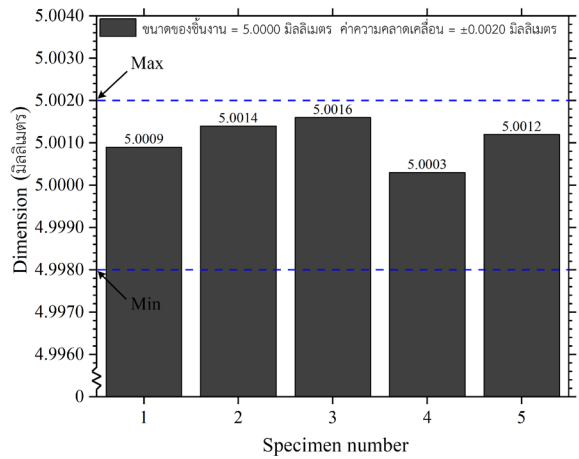
ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

| ลำดับการทดลอง | สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ |                | เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ |
|---------------|----------------------------------|----------------|--------------------------|
|               | ความหยาบผิว                      | ขนาดของชิ้นงาน |                          |
| 1             | 0.3333                           | 0.3778         | 0.3556                   |
| 2             | 0.9278                           | 0.4857         | 0.7068                   |
| 3             | 0.3618                           | 0.8948         | 0.6283                   |
| 4             | 0.9549                           | 0.4048         | 0.6798                   |
| 5             | 0.9308                           | 0.9445         | 0.9376                   |
| 6             | 0.3503                           | 0.3696         | 0.3599                   |
| 7             | <b>1.0000</b>                    | <b>0.8948</b>  | <b>0.9474</b>            |
| 8             | 0.8131                           | 0.3400         | 0.5766                   |
| 9             | 0.9278                           | 0.7083         | 0.8181                   |
| 10            | 0.9397                           | 0.7391         | 0.8394                   |
| 11            | 0.3719                           | 0.3333         | 0.3526                   |
| 12            | 0.8579                           | 0.6800         | 0.7690                   |
| 13            | 0.8177                           | 0.5862         | 0.7019                   |
| 14            | 0.8681                           | 1.0000         | 0.9340                   |
| 15            | 0.9051                           | 0.4048         | 0.6550                   |

หมายเหตุ: การทดลองที่ 7 ให้ค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สูงสุด



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 การทดลองเพื่อยืนยันผลเทียบกับค่าที่ต้องการ (ก) ค่าความหยาบผิว และ (ข) ขนาดของชิ้นงาน

ของตัวแปรในการตัดแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งพบว่า เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของเกรตความสัมพัทธ์แบบเกรย์ของแต่ละระดับและแต่ละตัวแปรในการตัดในการศึกษานี้ คือ ความเร็วในการตัดชิ้นงานที่ 4.5 มิลลิเมตร/นาที กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 2 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานที่ 770 ไมโครเมตร

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยของเกรตความสัมพัทธ์แบบเกรย์

| ตัวแปรการตัด    | ค่าเฉลี่ยของเกรตความสัมพัทธ์แบบเกรย์ของแต่ละระดับตัวแปรการตัด |         |         |
|-----------------|---|---------|---------|
|                 | ระดับ -1  | ระดับ 0 | ระดับ 1 |
| Cutting Speed   | 0.6432  | 0.7167  | 0.6680  |
| Peak Current    | 0.7528  | 0.7935  | 0.4241  |
| Offset Distance | 0.8618  | 0.6491  | 0.5678  |

หมายเหตุ: เลือกเงื่อนไข Cutting Speed ที่ ระดับ 0 เลือกเงื่อนไข Peak Current ที่ ระดับ 0 และ เลือกเงื่อนไข Offset Distance ที่ ระดับ -1

### 3.3 อิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีต่อผลตอบสนอง

เมื่อใช้เงื่อนไขในการตัดที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพัทธ์แบบเกรย์ ในการศึกษานี้ทำให้ได้ค่าผลตอบสนองที่เป็นค่าความหยาบผิวนั้น ได้ค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุด และให้ขนาดของชิ้นงานที่มีค่าความ

ผิดพลาดที่น้อยที่สุด โดยให้เงื่อนไขในการตัดคือความเร็วในการตัดชิ้นงานที่ 4.5 มิลลิเมตร/นาที กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดที่ 2 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานที่ 770 ไมโครเมตร ไปทำการทดสอบตัดเพื่อยืนยันผลการศึกษาก็ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 7 และจากผลการทดสอบการตัดเพื่อยืนยันผลในการศึกษานี้พบว่า ค่าความหยาบผิวที่ได้นั้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.1986 ไมโครเมตร โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0049 ไมโครเมตร และขนาดของชิ้นงานมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.0010 มิลลิเมตร มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0005 มิลลิเมตร ซึ่งกรณีนี้เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อยืนยันผลของค่าความหยาบผิวและขนาดชิ้นงานเทียบกับค่าที่ต้องการแล้ว สามารถแสดงดังรูปที่ 2 (ก)-(ข) จากรูปที่ 2 (ก)-(ข) แสดงให้เห็นว่าค่าความหยาบผิว และขนาดของชิ้นงานมีค่าที่สอดคล้องกับค่าความคลาดเคลื่อน (Tolerance) ตามที่กำหนด โดยค่าความหยาบผิวนั้นยังมีค่าที่น้อยที่สุดยิ่งดี โดยกำหนดค่าสูงสุดที่ 0.3300 ไมโครเมตร สำหรับขนาดชิ้นงานนั้นกำหนดค่าสูงสุดที่ 5.0020 มิลลิเมตร และค่าต่ำสุดที่ 4.9980 มิลลิเมตร

ในการศึกษานี้ ผลตอบสนองที่เป็นความหยาบผิวนั้น กำหนดค่าความหยาบผิวเป็นแบบยิ่งน้อยยิ่งดี โดยค่าความหยาบผิวที่ต้องการคือ  $0.3000^{+0.0300}$  ไมโครเมตร ซึ่งมีค่า

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองของค่าความหยาบผิวและขนาดของชิ้นงานด้วยวิธีความสัมพันธ์แบบเกรย์

| ลำดับการทดลอง                              | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|---------------------|
| ความหยาบผิว (Surface Roughness; ไมโครเมตร) | 0.1960 | 0.1950 | 0.2070 | 0.1990 | 0.1960 | 0.1986    | 0.0049              |
| ขนาดของชิ้นงาน (Dimension; มิลลิเมตร)      | 5.0009 | 5.0014 | 5.0016 | 5.0003 | 5.0012 | 5.0010    | 0.0005              |

สูงสุดที่ยอมรับได้ คือ 0.3300 ไมโครเมตร ดังนั้น จึงกำหนดให้  $R_a = 0.3300$  ไมโครเมตร

สำหรับขนาดของชิ้นงานนั้น มีค่าเท่ากับ  $5.0000^{+0.0020}$  มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่ำสุดยอมรับได้ เท่ากับ 4.9980 มิลลิเมตร และมีค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ เท่ากับ 5.0020 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้น จึงกำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อน  $D_0 = 0.0020$  มิลลิเมตร

ดังนั้น สมมติฐานของผลตอบสนองที่เป็นความหยาบผิว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ตั้งสมมติฐานของการศึกษาเป็น

$$H_0: \mu = R_a$$

$$H_1: \mu < R_a$$

โดยที่  $H_0$  คือ สมมติฐานหลัก  $H_1$  คือ สมมติฐานรอง  $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองที่เป็นความหยาบผิว และ  $R_a$  คือ ค่าความหยาบผิวสูงสุดที่ยอมรับได้ตามที่กำหนด

สำหรับสมมติฐานของผลตอบสนองที่เป็นขนาดของชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถตั้งสมมติฐานของการศึกษาเป็น

$$H_0: \mu = D_0$$

$$H_1: \mu < D_0$$

โดยที่  $H_0$  คือ สมมติฐานหลัก  $H_1$  คือ สมมติฐานรอง  $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองที่เป็นขนาดของชิ้นงาน และ  $D_0$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานตามที่กำหนด

จากการทดสอบสมมติฐานของผลตอบสนองที่เป็นความหยาบผิวพบว่า ค่า  $p$ -value ที่ได้จากการทดสอบ

สมมติฐานมีค่าเท่ากับ  $p < 0.001$  ซึ่งน้อยกว่า  $\alpha$  ดังนั้น จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก และยอมรับสมมติฐานรองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือค่าเฉลี่ยของค่าความหยาบผิวมีค่าต่ำกว่าค่าความหยาบผิวสูงสุดที่ยอมรับได้ตามที่กำหนด

สำหรับการทดสอบสมมติฐานขนาดของชิ้นงาน ค่า  $p$ -value ที่ได้จากการทดสอบสมมติฐานมีค่าเท่ากับ 0.008 ซึ่งน้อยกว่า  $\alpha$  ดังนั้น จึงปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานรองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงาน มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของขนาดชิ้นงานที่ยอมรับได้ตามที่กำหนด

จากผลของการศึกษานี้ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าในการตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหยาบผิวของชิ้นงานมีค่าที่เพิ่มขึ้น เพราะพลังงานในการสปาร์คเพิ่ม ทำให้เป็นหลุมลึกเกิดขึ้นบนผิวหน้าของชิ้นงาน ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น [34]–[36] ส่วนระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานและความเร็วในการตัดชิ้นงาน สำหรับในการศึกษานี้พบว่า มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่ค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตามมีการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานในการตัดที่เพิ่มขึ้นพบว่า ขนาดของชิ้นงานที่ได้มีขนาดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานมีค่าสูง ส่งผลให้เกิดพลังงานในการสปาร์คหรือเกิดการกัดเซาะที่ห่างจากชิ้นงานออกไป จึงทำให้ขนาดของชิ้นงานมีขนาดที่เพิ่มขึ้น ส่วนอิทธิพลของความเร็วในการตัดกับกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น สำหรับในการศึกษานี้พบว่า ส่งผลต่อขนาดของชิ้นงานเพียงเล็กน้อย [35]–[38]

จากผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้น เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถ

นำไปประยุกต์ใช้สำหรับเลือกตัวแปรที่เหมาะสมในกรณีที่มีหลายผลตอบสนองได้ วิธีการนี้สามารถคำนวณได้ง่าย ไม่ซับซ้อน และไม่ต้องใช้ซอฟต์แวร์พิเศษ แต่ได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ ตอบสนองต่อข้อกำหนด (Specifications) ของลูกค้าได้ สำหรับข้อดีอีกประการหนึ่งของวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ คือ สามารถใช้วิเคราะห์ผลการทดลองหรือวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรเพื่อหาผลตอบที่ดีที่สุดได้ [39], [40] แต่อย่างไรก็ตามวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้นไม่สามารถอธิบายถึงอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทดลองได้

สำหรับแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต ของการศึกษานี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของตัวแปรในการตัดที่มีต่อความแข็งระดับจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 หรือเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดอื่น ๆ โดยกระบวนการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด ซึ่งเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือชนิดพิเศษที่นำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ได้

#### 4. สรุป

จากการศึกษานี้ได้นำเสนอวิธีการหาค่าตัวแปรการตัดที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ K460 โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ สำหรับตัวแปรการตัดที่พิจารณาในการศึกษานี้ ได้แก่ ความเร็วในการตัดชิ้นงาน (Cutting Speed) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัด (Peak Current) และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน (Offset Distance) ส่วนลักษณะเฉพาะของการตัดที่ศึกษา ได้แก่ ความหนาผิวและขนาดของชิ้นงาน ซึ่งความหนาผิวของชิ้นงานต้องการให้น้อยที่สุด และขนาดของชิ้นงานต้องการให้ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุดหรือมีความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ คือ ความเร็วในการตัดชิ้นงานเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร/นาที กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดเท่ากับ 2 แอมแปร์ และระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงาน

เท่ากับ 770 ไมโครเมตร เมื่อใช้เงื่อนไขในการตัดที่ได้จากการศึกษานี้ ไปทำการตัดชิ้นงานเพื่อยืนยันผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยของความหนาผิวและขนาดของชิ้นงานอยู่ที่ 0.1986 ไมโครเมตร และ 5.0010 มิลลิเมตร ตามลำดับ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท รอนต้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่อง Wire-EDM พร้อมทั้ง บริษัท ยันมาร์ เอส พี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวัดค่าความหนาผิวของชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Aswin and R. G. Mote, "Numerical study of transient thermal profile and thermally deformed tip shape in wire EDM of narrow angles," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 81, pp. 638–654, 2022.
- [2] U. Maradia, E. Filisetti, M. Wiessner, S. Schneider, and M. Boccadoro, "The influence of energy input characteristics on surface integrity in wire EDM," in *Procedia CIRP*, 2020, vol. 95, pp. 268–272.
- [3] M. Subrahmanyam and T. Nancharaiah, "Optimization of process parameters in wire-cut EDM of Inconel 625 using taguchi's approach," in *Materials Today: Proceedings*, 2020, pp. 642–646.
- [4] M. Arunadevi and C. P. S. Prakash, "Predictive analysis and multi objective optimization of wire-EDM process using ANN," in *Materials Today: Proceedings*, 2020, pp. 6012–6016.
- [5] K. Kanlayasiri and P. Jattakul, "Simultaneous optimization of dimensional accuracy and surface roughness for finishing cut of wire-EDMed

- K460 tool steel,” *Precision Engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 556–561, 2013.
- [6] B. Mathew, Benkim, and J. Babu, “Multiple process parameter optimization of WEDM on AISI304 using taguchi grey relational analysis,” in *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 5, pp. 1613–1622.
- [7] J. B. Saedon, N. Jaafar, M. A. Yahaya, N. Saad, and M. S. Kasim, “Multi-objective optimization of titanium alloy through orthogonal array and grey relational analysis in WEDM,” in *Procedia Technology*, 2014, vol. 15, pp. 832–840.
- [8] B. P. Mishra and B. C. Routara, “An experimental investigation and optimisation of performance characteristics in EDM of EN-24 alloy steel using taguchi method and grey relational analysis,” in *Materials Today: Proceedings*, 2017, pp. 7438–7447.
- [9] N. Mookam, “Using grey relational analysis in wire-cutting of titanium,” *The Journal of Industrial Technology*, vol. 10, pp. 48–59, 2014 (in Thai).
- [10] A. Varun and N. Venkaiah, “Simultaneous optimization of WEDM responses using grey relational analysis coupled with genetic algorithm while machining EN 353,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, pp. 675–690, 2015.
- [11] A. Raj, J. P. Misra, D. Khanduja, K. K. Saxena, and V. Malik, “Design, modeling and parametric optimization of WEDM of Inconel 690 using RSM-GRA approach,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 18, pp. 2107–2117, 2022.
- [12] K. Mandal, S. Sarkar, S. Mitra, and D. Bose, “Parametric analysis and GRA approach in WEDM of Al 7075 alloy,” in *Materials Today: Proceedings*, 2020, pp. 660–664.
- [13] T. Thankachan, K. Soorya Prakash, R. Malini, S. Ramu, P. Sundararaj, S. Rajandran, D. Rammasamy, and S. Jothi, “Prediction of surface roughness and material removal rate in wire electrical discharge machining on aluminum based alloys/composites using taguchi coupled grey relational analysis and artificial neural networks,” *Applied Surface Science*, vol. 472, pp. 22–35, 2019.
- [14] M. M. Dhobe, I. K. Chopde, and C. L. Gogte, “Investigations on surface characteristics of heat treated tool steel after wire electro-discharge machining,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 28, no. 10, pp. 1143–1146, 2013.
- [15] N. Kumar and J. Kumar, “Experimental investigation of productivity and surface integrity features in trim cut WEDM operation of hybrid metal matrix composite,” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 7, no. 3, pp. 426–437, 2024.
- [16] S. Ujjaini Kumar, N. Manikandan, J. S. Binoj, P. Thejasree, S. Shajahan, and D. Arulkirubakaran, “Multi objective optimization of wire-electrical discharge machining of stellite using Taguchi – Grey approach,” in *Materials Today: Proceedings*, vol. 39, 2021, pp. 216–222.
- [17] S. A. Sonawane and M. L. Kulkarni, “Optimization of machining parameters of WEDM for Nimonic-75 alloy using principal component analysis integrated with Taguchi method,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 30, pp. 250–258, 2018.



- [18] V. Kavimani, K. S. Prakash, T. Thankachan, S. Nagaraja, A. K. Jeevanantham, and J. P. Jhon, "WEDM parameter optimization for silicon@r-GO/magnesium composite using taguchi based GRA coupled PCA," *Silicon*, vol. 12, pp. 1161–1175, 2020.
- [19] S. Chakraborty, S. Mitra, and D. Bose, "An investigation on dimensional accuracy and surface topography in powder mixed WEDM using RSM and GRA-PCA," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, pp. 1524–1530.
- [20] S. Zahoor, H. Ahsan Azam, M. Pervez Mughal, N. Ahmed, M. Rehman, and A. Hussain, "WEDM of complex profile of IN718: multi-objective GA-based optimization of surface roughness, dimensional deviation, and cutting speed," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, pp. 2289–2307, 2021.
- [21] A. Chaudhary, S. Sharma, and A. Verma, "Optimization of WEDM process parameters for machining of heat treated ASSAB'88 tool steel using response surface methodology (RSM)," in *Materials Today: Proceedings*, vol. 20, 2022, pp. 917–922.
- [22] B. Kumar Lodhi and S. Agarwal, "Optimization of wire off set in WEDM process by Taguchi method," in *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, 2020, pp. 2366–2371.
- [23] D. Devarasiddappa and M. Chandrasekaran, "Fuzzy logic modelling of sustainable performance measure (MRR) during WEDM of Ti/6Al/4V alloy," in *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, 2021, pp. 3373–3378.
- [24] N. Sharma, R. Khanna, and R. D. Gupta, "WEDM process variables investigation for HSLA by response surface methodology and genetic algorithm," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 171–177, 2015.
- [25] C. L. Lin, "Use of the taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristic," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 19, no. 2, pp. 209–220, 2004.
- [26] C. J. Tzeng, Y. H. Lin, Y. K. Yang, and M. C. Jeng, "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 6, pp. 2753–2759, 2009.
- [27] S. Ranganathan and T. Senthilvelan, "Multi-response optimization of machining parameters in hot turning using grey analysis," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 56, pp. 455–462, 2011.
- [28] BÖHLER K460. (2023). Cold work steels [Online]. Available: <https://www.voestalpine.com/bohler-edelstahl/de/>
- [29] F. Xu, S. Zhang, K. Wu, and Z. Dong, "Multi-response optimization design of tailor-welded blank (TWB) thin-walled structures using Taguchi-based Gray relational analysis," *Thin-Walled Structures*, vol. 131, pp. 286–296, 2018.
- [30] O. Zerti, M. A. Yallese, A. Zerti, S. Belhadi, and F. Girardin, "Simultaneous improvement of surface quality and productivity using Grey relational analysis based Taguchi design for turning couple (AISI D3 steel/ mixed ceramic tool (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiC))," *International Journal of*

- Industrial Engineering Computations*, vol. 9, no. 2, pp. 173–194, 2018.
- [31] A. Dey, S. Debnath, and K. M. Pandey, “Optimization of electrical discharge machining process parameters for Al6061/cenosphere composite using grey-based hybrid approach,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 27, pp. 998–1010, 2017.
- [32] S. V. Alagarsamy, M. Ravichandran, and M. Meignanamoorthy, “Multi-objective optimisation of dry sliding wear control parameters for stir casted AA7075- TiO<sub>2</sub> composites using taguchi-grey relational approach,” *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 20, pp. 1453–1462, 2022.
- [33] K. Kanlayasiri, “Improvement of Rotary Electrode EDM process using grey relational analysis,” *Thaksin University Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 64–72, 2009 (in Thai).
- [34] N. Mookam, P. Jattakul, and K. Kanlayasiri, “Machinability of tool steels machined by electric-discharge machining,” *SNRU Journal of Science and Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 25–31, 2022 (in Thai).
- [35] T. Nakagawa, M. Sampei, and A. Hirata, “High accuracy control with lateral dimension estimator for wire EDM,” in *Procedia CIRP*, 2020, pp. 255–261.
- [36] R. Singh, R. P. Singh, M. Tyagi, and R. Kataria, “Investigation of dimensional deviation in wire EDM of M42 HSS using cryogenically treated brass wire,” in *Materials Today: Proceedings*, 2019, pp. 679–685.
- [37] A. Alias, B. Abdullah, and N. M. Abbas, “Influence of machine feed rate in WEDM of titanium Ti-6Al-4V with constant current (6A) using brass wire,” in *Procedia Engineering*, 2012, pp. 1806–1811.
- [38] K. P. Somashekhar, N. Ramachandran, and J. Mathew, “Material removal characteristics of microslot (kerf) geometry in  $\mu$ -WEDM on aluminum,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, pp. 611–626, 2010.
- [39] S. Chakraborty, H. N. Datta, and S. Chakraborty, “Grey relational analysis-based optimization of machining processes: A comprehensive review,” *Process Integration and Optimization for Sustainability*, vol. 7, pp. 609–639, 2023.
- [40] N. Pragadish and M. Pradeep Kumar, “Optimization of dry EDM process parameters using Grey relational analysis,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, pp. 4383–4390, 2016.