

การประยุกต์เทคนิคทากูชิและความสัมพันธ์แบบเกรย์เพื่อพยากรณ์  
ความเหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการกัดอาร์คด้วยเส้นลวดไฟฟ้า  
**APPLICATION OF TAGUCHI PRINCIPLES AND GREY RELATION  
ANALYSIS TO PREDICT THE SUITABILITY OF THE PARAMETERS IN  
WIRE ELECTRICAL DISCHARGE PROCESS**

ปัทิตตา นาควงษ์

อาจารย์, สาขาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา 96 ถนนปรีดีพนมยงค์ ตำบลประตูชัย  
อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000, patittar.n@gmail.com

Patittar Nakwong

Lecturer, Department of Industrial Management Engineering, Faculty of Science and  
Technology, Phranakhon si Ayutthaya Rajabhat University, 96 Predee Pranomyong Road,  
Tumbon Pratuchai Ayutthaya 13000, Thailand, patittar.n@gmail.com

**บทคัดย่อ**

การศึกษานี้ได้วิเคราะห์อัตราการกำจัดวัสดุ (MRR) และคุณภาพพื้นผิวชิ้นงาน (Ra) ของกระบวนการกัดอาร์คด้วยเส้นลวดไฟฟ้าบนเหล็กเกรดเอสเคดี 11 (SKD11) ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิเป็นแบบ L18 และวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ โดยมีปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัยได้แก่ ค่าปัจจัยประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้า และความเร็วในการเดินเส้นลวด วัดผลการทดลองเป็น อัตราการจัดเนื้องานและความเรียบผิวของชิ้นงานภายหลังกระบวนการกัดอาร์คด้วยเส้นลวดไฟฟ้า ซึ่งพบว่าการศึกษาในครั้งนี้ปัจจัยที่เหมาะสมในการตัดเฉือนเหล็กเกรดเอสเคดี 11 เป็นไปตามเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ที่สามารถทำให้อัตราการจัดเนื้องานเพิ่มขึ้น 180.18% และมีความเรียบผิวที่ลดลง 97.86% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทากูชิ พบว่าการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมในการหาปัจจัยในการทดลองอีกวิธีการหนึ่ง

**คำสำคัญ:** อัตราการจัดเนื้องาน, ความเรียบผิว, เอสเคดี 11, ทากูชิ, การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

## ABSTRACT

This study analyzes the material removal rate (MRR) and the workpiece surface quality (Ra) of the electric arc milling process on SKD 11 grade steel (SKD 11) by using Taguchi L18 orthogonal arrays and Grey relational analysis. There are 3 experimental factors including the efficiency factors, the current and the wire speed. The Experiment is measured by material removal rate and the surface roughness of the workpiece after wire electrical discharge process. The result is the optimal factor of machine cutting for SKD11 steel, which is determined following the conditions of grey relational analysis and then can be increased 180.18% in removal rate and decreased 97.86% in surface smoothness. A comparison is to the Taguchi method. It is found that the Grey relational analysis is demonstrated to be an appropriate method for determining the experimental factors.

**KEYWORDS:** MRR, Ra, SKD11, Taguchi, Grey relational analysis

## 1. บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในด้านอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ การบิน อวกาศ เครื่องมือทางการแพทย์ การขนส่งและภาคอุตสาหกรรมอื่น ๆ มีการเพิ่มความต้องการวัสดุใหม่ที่มีลักษณะที่ดี นอกเหนือจากลักษณะเฉพาะแล้ววัสดุสมัยใหม่ส่วนใหญ่ยังต้องการกระบวนการผลิตพิเศษเพื่อให้สามารถกัด กลึงและขึ้นรูปได้อย่างง่ายดาย วัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่จะตัดยากด้วยกระบวนการผลิตในลักษณะแบบเดิม ลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ตัดยากเหล่านี้ช่วยเพิ่มการใช้งานซึ่งกระตุ้นให้ผู้ผลิตสำรวจกระบวนการตัดเฉือนใหม่ ๆ ด้วยต้นทุนที่เหมาะสมและความแม่นยำสูง [1] เหล็กกล้าเครื่องมือเอสเคดี 11 (SKD11 หรือ ASTM D2) เป็นเหล็กเกรดชนิดหนึ่งที่ถูกพัฒนาให้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยคาร์บอนและโครเมียมซึ่งมีความแข็งค่อนข้างสูงและมีคาร์ไบด์ผสมโครเมียมที่มีโครเมียมขนาดใหญ่จำนวนมากในโครงสร้างขนาดเล็กของเอสเคดี 11 เหล็กกล้าเครื่องมือเอสเคดี 11 มีประสิทธิภาพในด้านทนต่อความต้านทานการสึกหรอและความเหนียวของเครื่องมือ มีราคาและรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของคุณสมบัติเชิงกลมากขึ้น ทำให้ขึ้นรูปได้ยากในงานอุตสาหกรรม [2, 3]

การกัดอาร์คด้วยลวดไฟฟ้าเป็นการตัดชิ้นงานโดยใช้หลักการจ่ายประจุไฟฟ้าไปยังชิ้นงาน โดยที่เส้นลวดอิเล็กโตรดไม่สัมผัสกับชิ้นงาน เป็นกระบวนการหนึ่งในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความยากต่อการผลิต ซึ่งในการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้มีความสนใจในการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมต่ออัตราการขจัดเนื้องานและความเรียบผิวของชิ้นงาน ปัจจัยที่ทำการทดลองอันได้แก่ ปัจจัยประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้า และความเร็วในการเดินเส้นลวด [3] ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้การ

ทดลองมีค่าไม่เป็นไปตามที่เหมาะสม โดยจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า Nain et al. [4] ได้ทำการหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการตัดเฉือน ชุปเปอร์อัลลอยด์ Udimet-L605 โดยใช้ปัจจัยอันได้แก่ กระแสไฟฟ้า ความตึงเส้นลวด ระยะเวลาเปิด-ปิดของกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ ด้วยการออกแบบการทดลองทางสถิติ แบบ L27 ผลการทดลองพบว่าทุกปัจจัยมีความสัมพันธ์กันอย่างน้อยสำคัญ Lusi et al. [2] ได้ทำการศึกษาตัวแปร ได้แก่ กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารละลาย และความกว้างในการตัด ที่มีต่ออัตราการขจัดเนื้องานและความเรียบผิวของเหล็กเกรด เอสเคตี 11 ด้วยการออกแบบการทดลองทางสถิติ L9 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญพบว่า ความต่างศักย์ ความกว้างรอยตัดและความเข้มข้นของสารละลาย มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ 96.96% และเมื่อความต่างศักย์มากขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานมากขึ้น ในขณะที่ความเรียบผิวของเอสเคตี 11 ลดต่ำลง Sen et al. และ Gugulothu et al. [5, 6] ได้ใช้การวิเคราะห์ปัจจัยการทดลองเชิงสัมพันธ์ระหว่างวิธีทางสถิติและวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมของ กระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ การหมุนของอิเล็กโตรด ความดันในการพ่นเศษชิ้นงานของของเหลว ในกระบวนการอีทีเอ็ม เพื่อหาอัตราการขจัดเนื้องานและความเรียบผิวของโลหะผสมไทเทเนียม (Ti-6Al-4V) ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบเกรย์พบว่า ความต่างศักย์และความดันในการพ่นเศษชิ้นงานของของเหลว มีอิทธิพลหลักต่ออัตราการขจัดเนื้องานและความเรียบผิว นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าวิธี Gray-Taguchi เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการอีทีเอ็มของโลหะผสมไทเทเนียม อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่ทำการทดลองในลักษณะเดียวกัน เช่น การวิเคราะห์ปัจจัยการตัดเฉือนบนเหล็กเกรด P20, เหล็กเกรด Inconel 852, En 19, En41, SS317 ด้วยวิธี Gray-Taguchi [7-11] การหาปัจจัยในกระบวนการขึ้นรูปด้วยการตัดเฉือนด้วยไฟฟ้ามีการนำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลองมาเพื่อใช้ในการหาปัจจัยที่เหมาะสมมากมาย เช่น เทคนิคทางสถิติ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ วิธีการพื้นผิวตอบสนอง วิธีการเจเนติกอัลกอริทึม เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้มีการนำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลองมาเพื่อใช้ในการหาปัจจัยที่ตัดเฉือนชิ้นงานเหล็กเกรด เอสเคตี 11 อย่างเหมาะสม โดยการนำเอาเทคนิคทางสถิติ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ มาประยุกต์ใช้

## 2. วัสดุและวิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุทดลอง

การทดลองในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้วัสดุทดลองเป็นเหล็กเกรดเอสเคตี 11 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนและโครเมียมสูง นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติก อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น นำมาตัดภายใต้

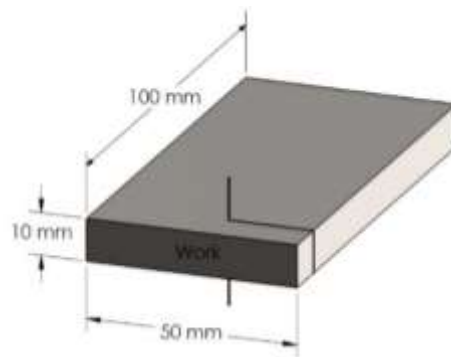
น้ำปราศจากไอออน เส้นลวดที่ใช้ในการตัดเป็นเส้นลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องกัดอาร์คไฟฟ้าด้วยเส้นลวดยี่ห้อ Js EDM รุ่น W-B4430 ดังรูปที่ 1 การติดตั้งชิ้นงานดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ขนาดชิ้นงานมีเส้นรอบรูป 30 มิลลิเมตร มีความหนา 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 เครื่องกัดอาร์คด้วยเส้นลวดไฟฟ้า



รูปที่ 2 การติดตั้งชิ้นงาน



รูปที่ 3 ขนาดของเหล็กเอสเคดี 11 ภายหลังการกัดอาร์คด้วยเส้นลวดไฟฟ้า

## 2.2 การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากการพัฒนาทางด้านวัสดุวิศวกรรมที่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสูงขึ้น ส่งผลให้การหาค่าของตัวแปรที่เหมาะสม ในกระบวนการตัดชิ้นงานด้วยเส้นลวดเป็นไปได้ยาก ทำให้เครื่องตัดชิ้นงานด้วยเส้นลวดไฟฟ้าไม่มีค่าของตัวแปรที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงได้หาวิธีการที่เหมาะสมของระดับตัวแปรโดยทำการทดลองเบื้องต้นจากค่าอ้างอิงของคู่มือที่มีความใกล้เคียงกับชนิดของชิ้นงานเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะของการตัดชิ้นงานตามต้องการ โดยมีค่าอ้างอิงของระดับความเร็วของเส้นลวดที่ 8 เมตรต่อนาที ระดับของกระแสไฟฟ้าในการตัดที่ 8 แอมแปร์ และค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor; DF) ในการทดลองการตัดชิ้นงานด้วยเส้นลวดได้ 2 ระดับคือค่าปัจจัยประสิทธิภาพ 35% และ 50% โดยคำนวณจากระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้า (on time) = 8 ไมโครวินาที ระยะเวลาคัดกระแสไฟฟ้า (off time) = 15 ไมโครวินาที ซึ่งสามารถคำนวณปัจจัยประสิทธิภาพได้จากสมการที่ 1 [12] หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ ร่วมกับการหาความสัมพันธ์แบบเกรย์ ทำการออกแบบการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง (L18) ซึ่งระดับต่าง ๆ ของตัวแปรที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 1

$$\text{Duty Factor} = \frac{\text{Pulse on time}}{\text{Pulse on time} + \text{Pulse off time}} \times 100\% \quad (1)$$

ตารางที่ 1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

| ตัวแปรในการทดลอง                    | หน่วย | ระดับ 1 | ระดับ 2 | ระดับ 3 |
|-------------------------------------|-------|---------|---------|---------|
| ปัจจัยประสิทธิภาพ (DF)              | %     | 35      | 50      | -       |
| กระแสไฟฟ้าในการตัดชิ้นงาน (IP)      | A     | 6       | 8       | 10      |
| ความเร็วเส้นลวดในการตัดชิ้นงาน (WS) | m/min | 6       | 8       | 12      |

### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในกระบวนการของการทดลองจากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง มีทั้งหมด 3 ปัจจัย แบ่งเป็น 2 ปัจจัย 3 ระดับและ 1 ปัจจัย 2 ระดับ ในการทดลองจะต้องใช้ชิ้นงาน วัสดุ และอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและลดระยะเวลาในการทดลอง ผู้วิจัยจึงได้นำเอาเทคนิคทฤษฎีเข้ามาประยุกต์ใช้ในการทดลองเพื่อทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบ Orthogonal Array L18 ดำเนินการทำการทดลองทั้งสิ้น 18 การทดลอง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการตอบสนองของตัวแปร

| Experiment number | DF (%) | IP (A) | WS (m/min) | MRR (m <sup>3</sup> /min) | SR (μm) |
|-------------------|--------|--------|------------|---------------------------|---------|
| 1                 | 35     | 6      | 6          | 0.2830                    | 1.5300  |
| 2                 | 35     | 6      | 8          | 0.2820                    | 1.4600  |
| 3                 | 35     | 6      | 12         | 0.2850                    | 1.5300  |
| 4                 | 35     | 8      | 6          | 0.2880                    | 1.6000  |
| 5                 | 35     | 8      | 8          | 0.2960                    | 1.6700  |
| 6                 | 35     | 8      | 12         | 0.2990                    | 1.5600  |
| 7                 | 35     | 10     | 6          | 0.2910                    | 1.8100  |
| 8                 | 35     | 10     | 8          | 0.2980                    | 1.7800  |
| 9                 | 35     | 10     | 12         | 0.2960                    | 1.8000  |
| 10                | 50     | 6      | 6          | 0.2840                    | 1.2100  |
| 11                | 50     | 6      | 8          | 0.2870                    | 1.3800  |
| 12                | 50     | 6      | 12         | 0.2850                    | 1.2000  |
| 13                | 50     | 8      | 6          | 0.2920                    | 1.6200  |
| 14                | 50     | 8      | 8          | 0.2950                    | 1.5200  |
| 15                | 50     | 8      | 12         | 0.2970                    | 1.5800  |
| 16                | 50     | 10     | 6          | 0.3190                    | 1.7000  |
| 17                | 50     | 10     | 8          | 0.3170                    | 1.6300  |
| 18                | 50     | 10     | 12         | 0.3200                    | 1.6500  |

ผลจากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิ สามารถดำเนินการตัดชิ้นงานและภายหลังกระบวนการกัดอาร์คขึ้นงานด้วยเส้นลวดไฟฟ้า จากตัวแปรในการทดลองที่แตกต่างกันนี้แล้วสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรที่มีต่ออัตราการขจัดเนื้องานและความเรียบผิวของชิ้นงานต่อไป

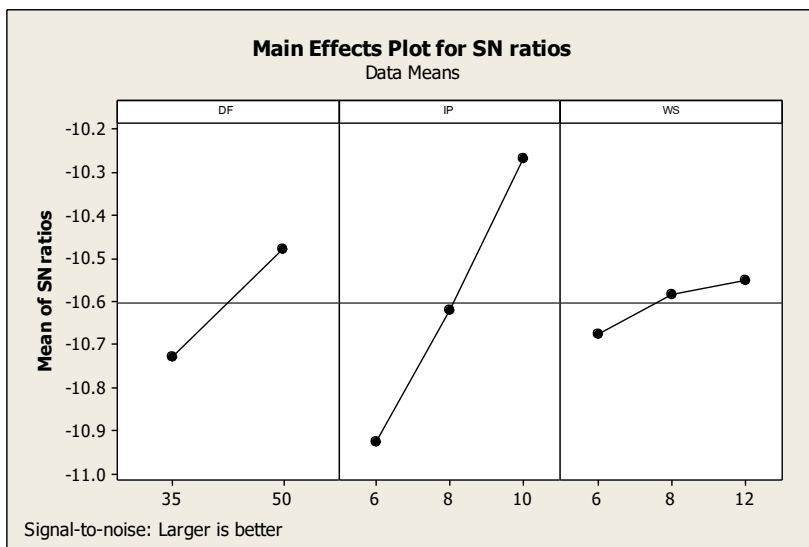
### 3.1 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรด้วยวิธีทากูชิ

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองการกัดอาร์คขึ้นงานด้วยเส้นลวดไฟฟ้านี้ ผู้วิจัยได้นำเอาค่าอัตราการขจัดเนื้องาน มาทำการวิเคราะห์ปัจจัยรบกวน (S/N ratio) โดยพิจารณาที่ “ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger is better)” คือค่าที่ดีที่สุด ดังสมการที่ 2 และสำหรับค่าความเรียบผิว พิจารณาที่ “ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller is better)” คือค่าที่ดีที่สุด ดังสมการที่ 3 [1]

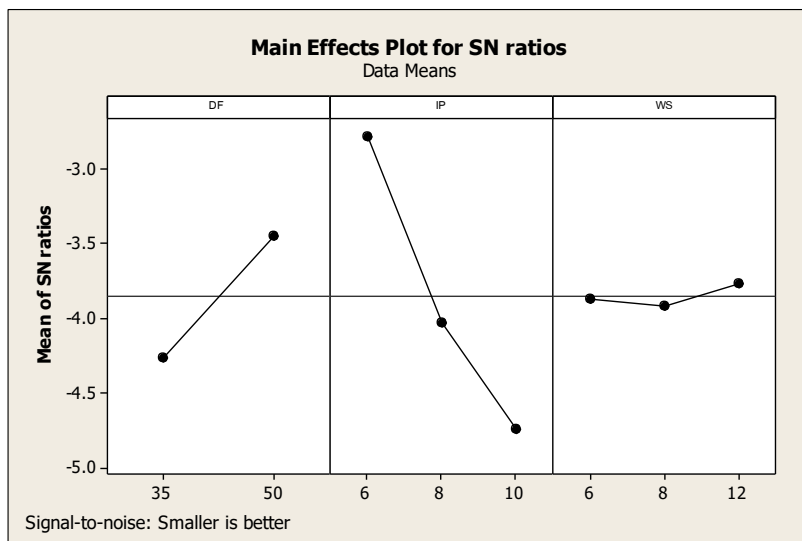
$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \sum_{i=1}^n \frac{y^2}{n} \right] \quad (2)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \sum_{i=1}^n \frac{y^2}{n} \right] \quad (3)$$

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทากูชิ สามารถสร้างกราฟเพื่อพิจารณาปัจจัยรบกวนที่ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและความเรียบผิวได้ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 ผลกระทบของปัจจัยหลักของอัตราการขจัดเนื้องาน



รูปที่ 5 ผลกระทบของปัจจัยหลักของค่าความเรียบผิว

จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อพิจารณาปัจจัยตอบสนองที่ส่งผลต่อค่าอัตราการขจัดเนื้องานมากที่สุด เห็นได้ว่าระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดอัตราการขจัดเนื้องานมากที่สุดคือ ปัจจัยประสิทธิภาพ (DF) ที่ 50% กระแสไฟฟ้า (IP) ที่ 10 แอมแปร์ และความเร็วในการเดินเส้นลวด (WS) ที่ 12 เมตรต่อนาที ซึ่งจะให้ผลอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดที่ 0.3200 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที และจากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อพิจารณาปัจจัยตอบสนองที่ส่งผลต่อความเรียบผิวที่มีค่าน้อยที่สุด เห็นได้ว่าปัจจัยนั้นได้แก่ ปัจจัยประสิทธิภาพ (DF) ที่ 35% กระแสไฟฟ้า (IP) ที่ 10 แอมแปร์ และความเร็วในการเดินเส้นลวด (WS) ที่ 8 เมตรต่อนาที มีค่าความเรียบผิวอยู่ที่ 1.7800 ไมโครเมตร หรือหากพิจารณาปัจจัยที่เหมาะสมในการกัดอาร์คเพื่อให้มีความเรียบผิวต่ำที่สุดอาจจะเลือกปัจจัยจากตารางที่ 2 คือ ปัจจัยประสิทธิภาพ (DF) ที่ 50 % กระแสไฟฟ้า (IP) ที่ 6 แอมแปร์ และความเร็วในการเดินเส้นลวด (WS) ที่ 12 เมตรต่อนาที จะมีค่าความเรียบผิวต่ำที่สุดอยู่ที่ 1.2000 ไมโครเมตร

### 3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย (ANOVA)

เมื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัยในการทดลองด้วยเทคนิคทากูชิ สามารถทำการเปรียบเทียบผลของการกัดอาร์คชิ้นงานเอสเคดี 11 ได้ และสามารถนำเอาผลจากการวิเคราะห์มาใช้ในการกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีในการกัดอาร์คชิ้นงานและเพื่อเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยการทดลองที่ส่งผลต่อกระบวนการกัดอาร์คชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรในขั้นตอนถัดไป ผลการวิเคราะห์ปัจจัยการทดลองระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าอัตราการขจัดเนื้องานและค่าความ

เรียบผิวได้จากสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ด้วยสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การตัดสีนใจ ( $R^2$ ) มีค่าระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 71.4% และ 82.81% ตามลำดับ

$$MRR = 0.2200 + 0.0006DF + 0.0056IP + 0.0006WS \quad (4)$$

$$Ra = 1.3040 - 0.0092DF + 0.0858IP + 0.0034WS \quad (5)$$

ตารางที่ 3 Analysis of Variance MRR

| Source                                    | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F       | P                   |
|-------------------------------------------|----|--------|--------|--------|---------|---------------------|
| Regression                                | 3  | 0.0019 | 0.0019 | 0.0006 | 15.1760 | 0.0001              |
| DF                                        | 1  | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 8.0899  | 0.0129 <sup>*</sup> |
| IP                                        | 1  | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 | 36.3506 | 0.0000 <sup>*</sup> |
| WS                                        | 1  | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0874  | 0.3147              |
| Error                                     | 14 | 0.0005 | 0.0005 | 0.0000 |         |                     |
| Total                                     | 17 | 0.0025 |        |        |         |                     |
| S = 0.0064 R-Sq = 76.5% R-Sq(adj) = 71.4% |    |        |        |        |         |                     |

ตารางที่ 4 Analysis of Variance of Ra

| Source                                      | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F       | P                   |
|---------------------------------------------|----|--------|--------|--------|---------|---------------------|
| Regression                                  | 3  | 0.4417 | 0.4417 | 0.4417 | 27.9618 | 0.0000              |
| DF                                          | 1  | 0.0868 | 0.0868 | 0.0868 | 16.6484 | 0.0117 <sup>*</sup> |
| IP                                          | 1  | 0.3536 | 0.3536 | 0.3536 | 67.1561 | 0.0000 <sup>*</sup> |
| WS                                          | 1  | 0.0012 | 0.0012 | 0.0012 | 0.2448  | 0.6284              |
| Error                                       | 14 | 0.0737 | 0.0737 | 0.0052 |         |                     |
| Total                                       | 17 | 0.5154 |        |        |         |                     |
| S = 0.0725 R-Sq = 85.70% R-Sq(adj) = 82.63% |    |        |        |        |         |                     |

ผลจากการใช้เลือกใช้ตัวแปรที่เหมาะสมจากการใช้เทคนิคทากูชิ พบว่าค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (DF) และกระแสไฟฟ้า (IP) มีผลกระทบต่อการตัดเฉือนชิ้นงานเอสเคดี 11 อย่างมีนัยสำคัญ และ

ทำให้เห็นว่าในบางครั้งการพิจารณาตัวแปรที่เหมาะสมในการพิจารณาอัตราการขจัดเนื้องานที่มากที่สุดและความเรียบผิวที่น้อยที่สุดอาจพบปัญหาที่ทำให้ไม่สามารถกำหนดระดับของตัวแปรที่มีความแม่นยำในการทดลองได้ ดังเช่นการพิจารณาปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความเรียบผิวในการกัดอาร์คเหล็กเอสเคตี 11 ในการทดลองนี้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการหาค่าตัวแปรที่มีความเหมาะสมเพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลกระทบของตัวแปรด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ในหัวข้อถัดไป

### 3.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรด้วยความสัมพันธ์แบบเกรย์

กระบวนการการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์เชิงสัมพันธ์แบบเกรย์จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลดิบที่อยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 เรียกอีกอย่างว่าการสร้างความสัมพันธ์แบบเกรย์ โดยการทำให้ข้อมูลเป็นมาตรฐาน ดังสมการที่ 6 และสมการที่ 7 สำหรับคุณลักษณะของอัตราการขจัดเนื้องานที่ต้องวิเคราะห์ผลการตอบสนองแบบยิ่งยวดยิ่งดีจะใช้สมการที่ 6 และคุณลักษณะของความเรียบผิวจะวิเคราะห์ที่ผลการตอบสนองแบบยิ่งน้อยยิ่งดี ดังสมการที่ 7 [9, 11, 13]

$$HB \ x_i^*(k) = \frac{x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)}{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)} \quad (6)$$

$$LB \ x_i^*(k) = \frac{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)}{x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)} \quad (7)$$

โดยที่  $x_i^*(k)$  เป็นค่าปกติของข้อมูลดิบ  $x_i^{(0)}(k)$  คือค่าของการทดลองและ  $\min x_i^{(0)}(k)$  และ  $\max x_i^{(0)}(k)$  คือค่าทดลองต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ

ผลการตอบสนองของข้อมูลดิบ หลังจากการแปลงค่าข้อมูล ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ดังตารางที่ 5 สามารถนำไปเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational coefficient) เมื่อ  $\xi$  คือ สัมประสิทธิ์ความแตกต่าง โดยหาสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์จากผลการตอบสนอง ในช่วง 0 ถึง 1 ได้จากสมการที่ 7, 8 และ 9

$$\xi = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (8)$$

$$\Delta_{oi}(k) = |x_0^*(k) - x_i(k)| \quad (9)$$

ตารางที่ 5 ผลการแปลงค่าข้อมูล

| Experiment number | DF (%) | IP (A) | WS (m/min) | MRR (m <sup>3</sup> /min) | SR (μm) | MRR [0-1] | SR [0-1] |
|-------------------|--------|--------|------------|---------------------------|---------|-----------|----------|
| 1                 | 35     | 6      | 6          | 0.2830                    | 1.5300  | 0.0260    | 0.4590   |
| 2                 | 35     | 6      | 8          | 0.2820                    | 1.4600  | 0.0000    | 0.5740   |
| 3                 | 35     | 6      | 12         | 0.2850                    | 1.5300  | 0.0790    | 0.4590   |
| 4                 | 35     | 8      | 6          | 0.2880                    | 1.6000  | 0.1580    | 0.3440   |
| 5                 | 35     | 8      | 8          | 0.2960                    | 1.6700  | 0.3680    | 0.2300   |
| 6                 | 35     | 8      | 12         | 0.2990                    | 1.5600  | 0.4470    | 0.4100   |
| 7                 | 35     | 10     | 6          | 0.2910                    | 1.8100  | 0.2370    | 0.0490   |
| 8                 | 35     | 10     | 8          | 0.2980                    | 1.7800  | 0.4210    | 0.0160   |
| 9                 | 35     | 10     | 12         | 0.2960                    | 1.8000  | 0.3680    | 0.0000   |
| 10                | 50     | 6      | 6          | 0.2840                    | 1.2100  | 0.0530    | 0.9840   |
| 11                | 50     | 6      | 8          | 0.2870                    | 1.3800  | 0.1320    | 0.7050   |
| 12                | 50     | 6      | 12         | 0.2850                    | 1.2000  | 0.0790    | 1.0000   |
| 13                | 50     | 8      | 6          | 0.2920                    | 1.6200  | 0.2630    | 0.3110   |
| 14                | 50     | 8      | 8          | 0.2950                    | 1.5200  | 0.3420    | 0.4750   |
| 15                | 50     | 8      | 12         | 0.2970                    | 1.5800  | 0.3950    | 0.3770   |
| 16                | 50     | 10     | 6          | 0.3190                    | 1.7000  | 0.9740    | 0.1800   |
| 17                | 50     | 10     | 8          | 0.3170                    | 1.6300  | 0.9210    | 0.2950   |
| 18                | 50     | 10     | 12         | 0.3200                    | 1.6500  | 1.0000    | 0.2620   |

จากสมการที่ 9 เมื่อ  $\Delta_{0i}(k)$  คือ ผลต่างของผลการตอบสนองของข้อมูลในอุดมคติ ( $x_0^*(k)$ ) กับข้อมูลการทดลอง ( $x_i(k)$ ) สามารถคำนวณเกรดสัมพัทธ์แบบเกรย์ (GRG) ได้จากสมการที่ 10 ผลการคำนวณแสดงเกรดของความสัมพันธ์และผลรวมเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์เชิงสัมพันธ์แบบเกรย์ ซึ่งดังตารางที่ 6 และตารางที่ 7

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (10)$$

ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แต่ละการทดลอง

| Experiment number | Grey relation coefficient |        | Grey relation grade | Rank |
|-------------------|---------------------------|--------|---------------------|------|
|                   | MRR                       | Ra     | GRG                 |      |
| 1                 | 0.3390                    | 0.4800 | 0.4100              | 14   |
| 2                 | 0.3330                    | 0.5400 | 0.4370              | 10   |
| 3                 | 0.3520                    | 0.4800 | 0.4160              | 12   |
| 4                 | 0.3730                    | 0.4330 | 0.4030              | 15   |
| 5                 | 0.4420                    | 0.3940 | 0.4180              | 11   |
| 6                 | 0.4750                    | 0.4590 | 0.4670              | 7    |
| 7                 | 0.3960                    | 0.3450 | 0.3700              | 18   |
| 8                 | 0.4630                    | 0.3370 | 0.4000              | 16   |
| 9                 | 0.4420                    | 0.3330 | 0.3880              | 17   |
| 10                | 0.3450                    | 0.9680 | 0.6570              | 4    |
| 11                | 0.3650                    | 0.6290 | 0.4970              | 6    |
| 12                | 0.3520                    | 1.0000 | 0.6760              | 2    |
| 13                | 0.4040                    | 0.4210 | 0.4120              | 13   |
| 14                | 0.4320                    | 0.4880 | 0.4600              | 8    |
| 15                | 0.4520                    | 0.4450 | 0.4490              | 9    |
| 16                | 0.9500                    | 0.3790 | 0.6640              | 3    |
| 17                | 0.8640                    | 0.4150 | 0.6390              | 5    |
| 18                | 1.0000                    | 0.4040 | 0.7020              | 1    |

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์แบบเกรย์

| Parameter                           | Average grey relation grade |         |         |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------|---------|
|                                     | ระดับ 1                     | ระดับ 2 | ระดับ 3 |
| ปัจจัยประสิทธิภาพ (DF)              | 0.4120                      | 0.5730  | -       |
| กระแสไฟฟ้าในการตัดชิ้นงาน (IP)      | 0.5140                      | 0.4350  | 0.5270  |
| ความเร็วเส้นลวดในการตัดชิ้นงาน (WS) | 0.4860                      | 0.4760  | 0.5170  |

ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของปัจจัยจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้น จะทำการเลือกผลจากค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์ (Average grey relation grade) ค่ามากที่สุดในแต่ละระดับของตัวแปรนั้น ๆ ดังนั้นจากตารางที่ 7 จึงได้เงื่อนไขในการกัตอาร์คขึ้นงานที่เหมาะสม คือ กำหนดค่าปัจจัยประสิทธิภาพ (DF) ที่ระดับ 2 (50%) กระแสไฟฟ้า (IP) ที่ระดับ 3 (10 แอมแปร์) และความเร็วในการเดินเส้นลวด (WS) ที่ระดับ 3 (12 เมตรต่อนาที) เมื่อได้ ตัวแปรที่เหมาะสมในการกัตอาร์คขึ้นงานเรียบร้อยแล้ว สามารถนำค่าปัจจัยดังกล่าวไปทำการทดลองและทำนายผลการตัดขึ้นงานได้จากสมการทางทฤษฎีข้างต้น เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ แสดงดังตารางที่ 8

**ตารางที่ 8 ผลการทดลองด้วยการทำนายทางทฤษฎีและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์**

| Methodology     | Response | Factor                                          | Optimal value |
|-----------------|----------|-------------------------------------------------|---------------|
| Taguchi         | MRR      | DF <sub>2</sub> IP <sub>3</sub> WS <sub>3</sub> | 0.3200        |
|                 | Ra       | DF <sub>1</sub> IP <sub>2</sub> WS <sub>3</sub> | 1.7800        |
| Grey relational | MRR      | DF <sub>2</sub> IP <sub>3</sub> WS <sub>3</sub> | 0.5830        |
|                 | Ra       |                                                 | 1.7420        |

#### 4. สรุป

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษการเลือกใช้ตัวแปรที่เหมาะสมในการตัดขึ้นงานเอสเคดี 11 จากการกัตอาร์คด้วยเส้นลวดไฟฟ้าโดยใช้วิธีการของทฤษฎีและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ผลจากการออกแบบการทดลองแบบ L18 ให้สามารถนำค่าการทดลองมาทำการพยากรณ์ผลการทดลองและหาตัวแปรที่เหมาะสมในการกัตอาร์คด้วยเส้นลวดได้ โดยพบว่าการใช้วิธีการทางทฤษฎีให้อัตราการจัดเนื้องานที่ 0.3200 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และมีความเรียบผิวที่ 1.7800 ไมโครเมตร จากกระบวนการทางทฤษฎีสามารถนำไปสร้างสมการการทำนายของอัตราการจัดเนื้องานและความเรียบผิวโดยมีค่าความเชื่อมั่นอยู่ที่ 71.4% และ 82.63% ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ สามารถนำปัจจัยไปให้อัตราการจัดเนื้องานได้ 0.5830 ลูกบาศก์เมตรต่อนาทีและมีความเรียบผิวที่ 1.7420 ไมโครเมตร จากผลการเปรียบเทียบวิธีการทางทฤษฎีและวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ทำให้ทราบได้ว่า การใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถปรับปรุงอัตราการจัดเนื้องานของเหล็กเอสเคดี 11 ได้เพิ่มขึ้น 182.18% และ ให้ความเรียบผิวลดลง 97.86% ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงสามารถนำเอา

วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ไปใช้ในการตัวแปรที่เหมาะสมในการกัตอาร์คขึ้นงานด้วยเส้นลวดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิศวกรรมการจัดการ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือสำหรับทำงานวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

### References

- [1] Modi M, Agarwal G, Chaugaonkar SD, Bhatia U, Patil V. Effect of machine feed rate on Kerf-Width, material removal rate, and surface roughness in machining of Al/SiC composite material with wire electrical discharge machine. *Strojnicky casopis - Journal of Mechanical Engineering* 2020;70(1):81-8.
- [2] Lusi N, Pamuji DR, Afandi A, Prayogo GS. Optimization design of electrochemical machining process of SKD11 tool steel using Weighted Principal Component Analysis (WPCA). *The 2nd International Conference on Science and Innovation Engineering*; 2019 Nov 9-10; Malacca, Malaysia. IOP Publishing; 2020.
- [3] Chen X, Wang Z, Wang Y, Chi G. Investigation on MRR and Machining Gap of Micro Reciprocated Wire-EDM for SKD11. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2019;21(1):11-22.
- [4] Nain SS, Garg D, Kumar S. Investigation for obtaining the optimal solution for improving the performance of WEDM of super alloy Udimet-L605 using particle swarm optimization. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2018; 21:261-73.
- [5] Sen R, Choudhuri B, Barma JD, Chakraborti P. An investigation on the effect of different coated electrodes on the surface quality of WEDM by varying discharge energy level. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2020;106(7-8):3285-99.
- [6] Gugulothu B, Rao GKM, Bezabih M. Grey relational analysis for multi-response optimization of process parameters in green electrical discharge machining of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Today: Proceedings* 2020 Jul 30. [Epub ahead of print]

- [7] Singh V, Bhandari R, Yadav VK. An experimental investigation on machining parameters of AISI D2 steel using WEDM. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2016;93(1-4):203-14.
- [8] Priyadarshini M, Biswas CK, Behera A. Grey-Taguchi optimization of Wire-EDM parameters for P20 tool steel. Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering – ICMRE'19; 2019 Feb; Rome, Italy. New York, United States: Association for Computing Machinery; 2019. p. 5-8.
- [9] Kumar P, Meenu, Kumar V. Optimization of process parameters for WEDM of Inconel 825 using grey relational analysis. Decision Science Letters 2018;7(4):405-16.
- [10] Reddy YCS, Reddy TP, Reddy MCS. Optimization of WEDM process parameters on SS317 using Grey Relational Analysis. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) 2017;4(8):1212-6.
- [11] Vikasa, Shashikant, A.K.Roy, Kumar K. Effect and optimization of machine process parameters on MRR for EN19 & EN41 materials using Taguchi. 2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering (ICIAME 2014); 2014 Mar 7-8; Gujarat, India. New York, United States: Procedia Technology p.204-10
- [12] Gaitonde VN, Manjaiah M, Maradi S, Karnik SR, Petkar PM, Davim JP. Multiresponse optimization in wire electric discharge machining (WEDM) of HCHCr steel by integrating response surface methodology (RSM) with differential evolution (DE). In: Davim JP, editor. Computational Methods and Production Engineering: Woodhead Publishing; 2017. p. 199-221.
- [13] Panda A, Sahoo AK, Rout AK. Multi-attribute decision making parametric optimization and modeling in hard turning using ceramic insert through grey relational analysis: A case study. Decision Science Letters 2016;5:581-92.

### ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.ปัทิตา นาควงษ์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ พระนครศรีอยุธยา 96 ต.ประตูชัย ถ.ปรีดีพนมยงค์ อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา Email: patittar.n@gmail.com, patittar.n@aru.ac.th  
ปริญญาเอก (ปร.ด.) วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2562  
งานวิจัยที่สนใจ: Materials and Manufacturing Engineering Statistics, DOE

---

#### Article History:

Received: October 9, 2020

Revised: November 11, 2020

Accepted: November 25, 2020