

## การประยุกต์การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ในการตัดไทเทเนียม

นิวัฒน์ มูเก็ม\*

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีทางสถิติเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการตัดไทเทเนียมด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดเมื่อออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิและใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์แสดงผลตอบสนองที่เหมาะสมกับความหนาผิวและระยะเวลาการตัดเกิน สำหรับตัวแปรการตัดที่พิจารณาในการศึกษานี้ได้แก่ ระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์กและอัตราการป้อนลวด สถานะการตัดที่เหมาะสมกับคุณลักษณะการตัดพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ จากการทดลองพบว่า การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีการทางสถิติวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาแก้ปัญหาสถานการณ์ที่เหมาะสมในกรณีหลายผลตอบสนองได้

**คำสำคัญ :** วิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด, ไทเทเนียม, การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

## Using Grey Relational Analysis in Wire-Cutting of Titanium

Niwat Mookam<sup>\*</sup>

### Abstract

The paper presents the statistical method using for the optimization of titanium machining by wire electric discharge machining. Taguchi method was designed as experimental strategy, and Grey relational analysis show an response optimization on surface roughness and overcut. In this study, discharge pulse time, pulse-peak current, and wire feed rate were the cutting parameters. The optimal cutting conditions were determined from average grey relational grade of the machining characteristics. From the results grey relational analysis method was an effective optimal solving solution in case of multiple responses.

**Keywords :** Wire-EDM, Titanium, Grey Relational Analysis

---

Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kang Won Campus.

<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: niwat.moo@rmutr.ac.th Received 13 August 2013, Accepted 26 June 2014

## 1. บทนำ

ไทเทเนียมเป็นวัสดุพิเศษที่นิยมนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม เช่น ใช้ผลิตอุปกรณ์และชิ้นส่วนด้านอากาศยาน ทางทะเล เกี่ยวกับสารเคมีและทางการแพทย์ เป็นต้น เนื่องจากมีคุณลักษณะที่พิเศษด้านความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ด้านทานการกัดกร่อนและความล้าได้ดี อย่างไรก็ตามการนำไทเทเนียมมาตัดด้วยกระบวนการทางกลนั้นทำได้ยาก เนื่องจากไทเทเนียมมีความสามารถในการนำความร้อนและโมดูลัสของความยืดหยุ่นต่ำ การตัดด้วยกระบวนการทางกลทำให้ต้องใช้เครื่องมือตัด (Cutting tools) ที่มีความคมสูง ในขณะที่ทำการตัดจะเกิดความร้อนระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ส่งผลให้เครื่องมือตัดสึกหรอและไทเทเนียมยังทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจน ( $O_2$ ) ไนโตรเจน ( $N_2$ ) และไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ได้ง่าย ซึ่งการทำปฏิกิริยาของไทเทเนียมกับ  $O_2$ ,  $N_2$  และ  $H_2$  ยังส่งผลต่อคุณภาพพื้นผิว คุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค อย่างไรก็ตามได้มีการนำไทเทเนียมมาตัดโดยใช้กระบวนการทางความร้อน เช่น พลาสมา (Plasma) ซึ่งเป็นกระบวนการตัดที่สามารถตัดได้อย่างรวดเร็ว ช่วยลดค่าใช้จ่ายในด้านเครื่องมือตัดและสามารถตัดงานที่มีความซับซ้อนได้ดี แต่กระบวนการตัดจะเกิดช่องว่างจากการตัด (Kerf width) ที่กว้างทำให้เสียเนื้อวัสดุจากการตัดค่อนข้างมากตลอดจนเกิดบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) บริเวณกว้าง [1-2]

กระบวนการตัดวัสดุด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire-EDM) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งในกลุ่มการตัดเนื้อวัสดุแบบใหม่ (Non-traditional machining processes) [3] ที่นิยมใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน เช่น งานสร้างแม่พิมพ์ เนื่องจาก

สามารถตัดวัสดุที่มีความแข็งสูงได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่าความแข็งของวัสดุ แต่วัสดุที่นำมาตัดจะต้องนำไฟฟ้า [3-5] ในกระบวนการตัดกระแสไฟฟ้าจะถูกปล่อยจากอิเล็กโทรดเส้นลวดที่มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาไปยังชิ้นงานโดยไม่มีการสัมผัสกับวัสดุชิ้นงานที่นำมาตัด และมีของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามของเหลวจะสูญเสียพลังงานและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายหรือกลายเป็นไอซึ่งจะถูกพัดพาออกไปจากบริเวณนั้นจึงทำให้เราสามารถตัดงานที่มีความซับซ้อนและมีความเที่ยงตรงสูงได้ดี [6] เหมาะกับการตัดวัสดุชนิดที่มีราคาสูงเนื่องจากเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุระหว่างการตัดน้อยมาก โดยทั่วไปแล้วกระบวนการตัดวัสดุด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนซึ่งจะต้องควบคุมตัวแปรการตัด (Cutting parameters) หลายตัวแปร ในการกำหนดค่าตัวแปรที่เหมาะสมกับการตัดจึงทำได้ยาก ดังนั้นในกระบวนการตัดวัสดุด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดโดยทั่วไปนอกจากความชำนาญของผู้ควบคุมเครื่องแล้วจะต้องอาศัยคู่มือการใช้เครื่องสำหรับปรับตั้งค่าให้เหมาะกับวัสดุที่นำมาตัด แต่ปัจจุบันวัสดุวิศวกรรมได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องซึ่งวัสดุบางชนิดก็ไม่มีคำแนะนำสำหรับการตัดด้วยวิธี Wire-EDM ดังนั้นวิธีการหาสภาวะที่เหมาะสมแบบต่างๆจึงได้ถูกนำมาใช้ในการเลือกตัวแปรเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะของการตัดตามที่ต้องการ วิธีการเหล่านั้นได้แก่ วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology) เจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithms) ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy logic) วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial

neural networks) วิธีทาคุชิ (Taguchi method) และวิธีที่เกิดขึ้นจากการผสมกันระหว่างวิธีการเหล่านี้ [7-11]

บทความฉบับนี้ได้ศึกษาตัวแปรเงื่อนไขที่เหมาะสมของการตัดไทเทเนียม Gr-2 ด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด จากตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์กและอัตราการป้อนลวด เพื่อหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมกับผลตอบสนองของการตัดไทเทเนียม ได้แก่ ค่าความหยาบผิวและระยะการตัดเกิน โดยพิจารณาจากวิธีของทาคุชิ (Taguchi Method) ร่วมกับเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

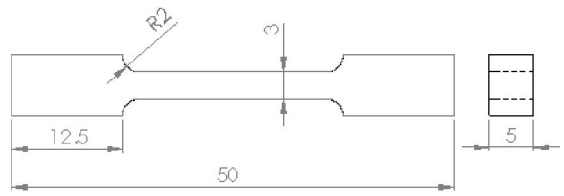
**2. วัสดุและวิธีการทดลอง**

ในการทดลองวัสดุชิ้นงานที่ใช้ คือไทเทเนียมมีสมบัติแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งมีการนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนประกอบของนาฬิกา เมื่อนำมาตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดหรือเครื่อง Wire-EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA20S Advance ใช้ลวดอเล็กโทรดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm ตัดชิ้นงานตัวอย่างหนา 5 mm ให้มีรูปร่างและขนาดตามรูปที่ 1 ออกแบบการทดลองแบบออร์ทอกอนัลอะเรย์ L9 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเลือกมาจากการสุ่มทดลองและสังเกตอเล็กโทรดที่สามารถตัดได้โดยไม่ต้องมีการขาดระหว่างการตัดชิ้นงานจึงกำหนดระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (Discharge pulse time; ON) กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์ก (Pulse peak current; IP) และอัตราการป้อนลวด (Wire feed rate; FA) โดยตัวแปรและระดับของตัวแปรแสดงในตารางที่ 2 แต่ผลการทดลองจะมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของการตัดหลังการตัดนำมาคำนวณหาระยะการตัดเกิน (Overcut) จาก

ขนาดของลวดที่ใช้เป็นอเล็กโทรดซึ่งหาได้จากการนำชิ้นงานหลังการตัดไปวัดขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์ระดับมหภาค (Macroscopic) ยี่ห้อ JENCO รุ่น V203410 ผ่านโปรแกรม Edn-2 แสดงตัวอย่างการวัดดังรูปที่ 2 ส่วนความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการตัดตรวจสอบโดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PSI ซึ่งผลจากการวัดอยู่ในรูปแบบค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเชิงตัวเลข (Arithmetic mean roughness)

**ตารางที่ 1 สมบัติของไทเทเนียม**

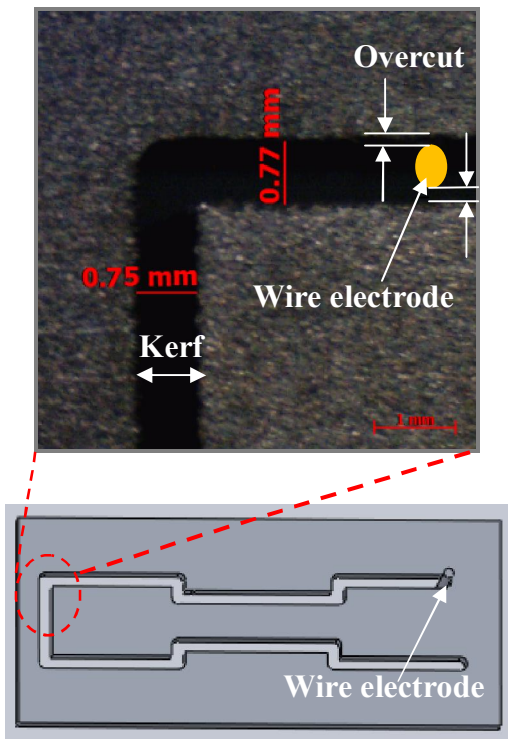
Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation (%)	Reduce of area (%)
385	310	33	48



**รูปที่ 1 ชิ้นงาน**

**ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับในการทดลอง**

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
ระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า (ON)	12	14	16
กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์ก (IP)	12	15	18
อัตราการป้อนลวด (FA)	2	3	4



รูปที่ 2 การวัดระยะการตัดเกิน

### 3. ผลการทดลอง

หลังการตัดได้ค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองจากการกำหนดตัวแปรที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3 นำมาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีของทาโกชิ วิธีนี้จะพิจารณาจากค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (The signal-to-noise ratio; S/N) จากกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (The smaller-the-better) สำหรับผลตอบสนองในกรณีตัวแปรที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้จากค่า S/N Ratio เฉลี่ยของระดับแต่ละปัจจัยที่มีค่ามากที่สุดจากตารางที่ 4 และ 5 ทำให้สามารถเลือกปัจจัยที่เหมาะสมของค่าความหยาบผิวได้จากการกำหนดระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 12  $\mu$ sec กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์คที่ 12 A และ

ตารางที่ 3 ผลตอบสนองจากตัวแปรที่แตกต่างกัน

Experiment number	ON ( $\mu$ sec)	IP (A)	FA (mm/sec.)	Ra ( $\mu$ m)	OV (mm)
1	12	12	2	3.949	0.510
2	12	15	3	4.078	0.520
3	12	18	4	4.241	0.510
4	14	12	3	4.214	0.550
5	14	15	4	4.183	0.530
6	14	18	2	4.291	0.520
7	16	12	4	4.150	0.540
8	16	15	2	4.135	0.490
9	16	18	3	4.168	0.570

ตารางที่ 4 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของระดับและปัจจัยต่างๆ ของความหยาบผิว

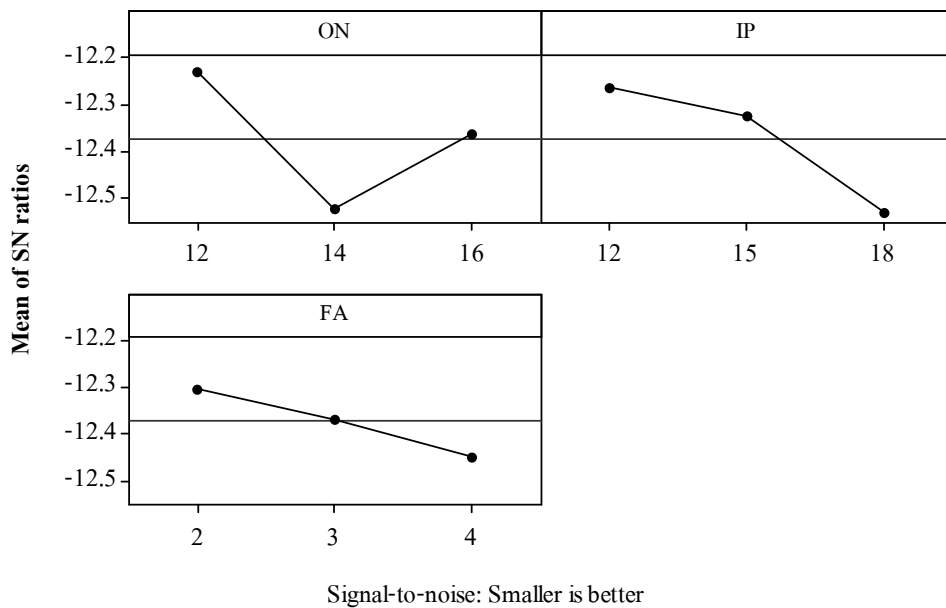
Machining parameters	Level		
	Level 1	Level 2	Level 3
ON	-12.23	-12.52	-12.36
IP	-12.26	-12.32	-12.53
FA	-12.30	-12.37	-12.45

อัตราการป้อนลวดที่ 2 mm/sec. ( $ON_1IP_1FA_1$ ) ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับระยะการตัดเกินจากการกำหนดระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 12  $\mu$ sec กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์คที่ 15 A และอัตราการป้อนลวดที่ 2 mm/sec. ( $ON_1IP_2FA_1$ ) หรือสามารถเลือกปัจจัยที่เหมาะสมได้จากกราฟผลกระทบทหลัก (Main effects) ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 สำหรับความหยาบผิวและระยะ

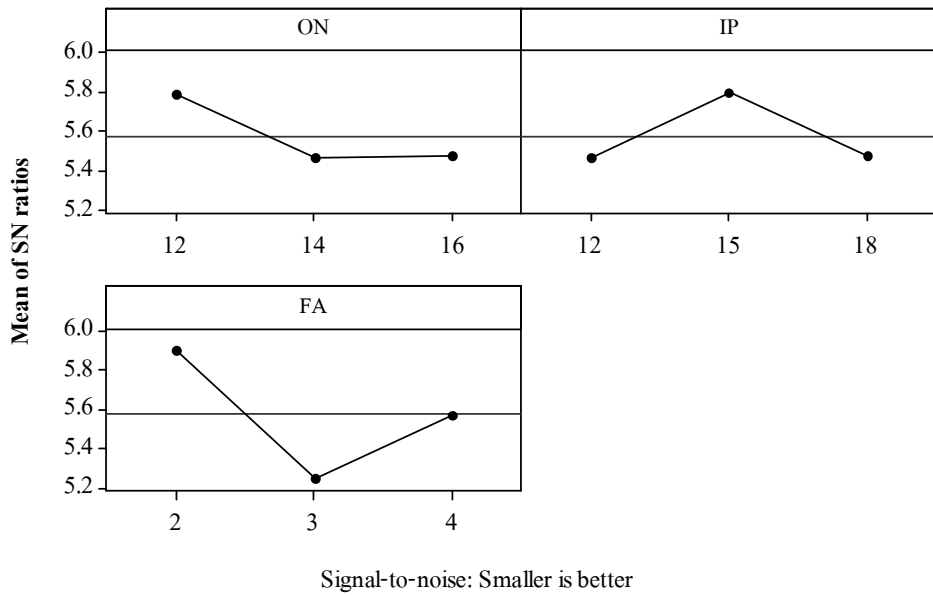
การตัดเกินตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเลือกระดับตัวแปรที่เหมาะสมในกรณีหลายผลตอบสนอง เช่น ในกรณีการตัดงานให้มีค่าความหยาบผิวและต้องการให้มีระยะการตัดเกินเกิดขึ้นน้อยๆพร้อมกันจึงไม่สามารถกำหนดระดับของตัวแปรที่เหมาะสมให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดเหมือนกันเนื่องจากทั้งค่าความหยาบผิวและระยะการตัดเกินจะมีผลกระทบร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยเกิดขึ้นในกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยของค่าความหยาบผิวและระยะการตัดเกินตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทุกปัจจัยมีผลกระทบร่วมกัน

ตารางที่ 5 ค่า S/N Ratio เฉลี่ยของระดับและปัจจัยต่างๆของระยะตัดเกิน

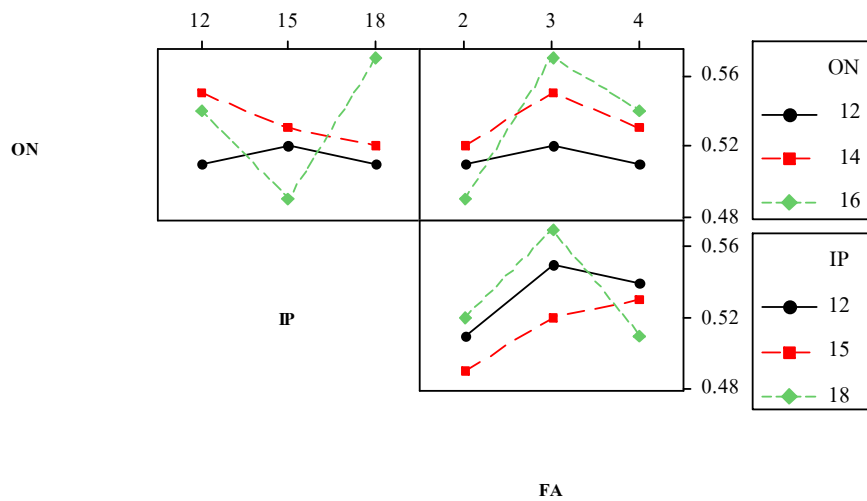
Machining parameters	Level 1	Level 2	Level 3
ON	5.792	5.462	5.477
IP	5.464	5.797	5.470
FA	5.908	5.252	5.572



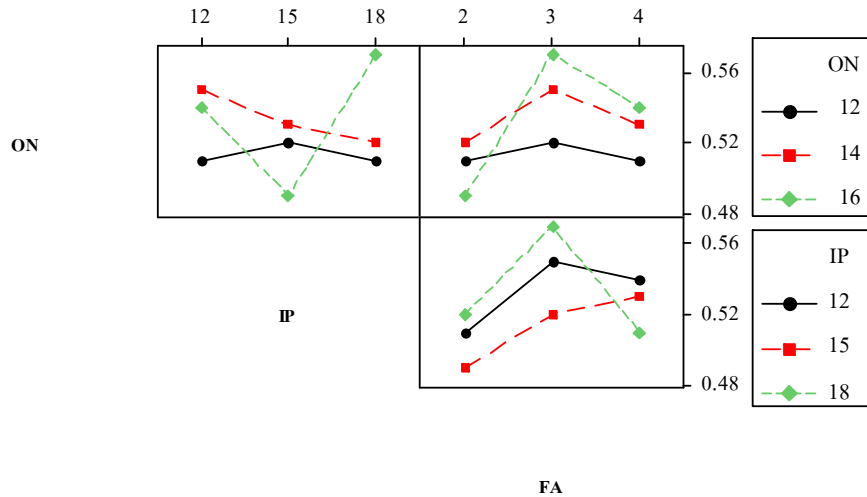
รูปที่ 3 ผลกระทบหลักของค่าความหยาบผิว



รูปที่ 4 ผลกระทบหลักของระยะตัดเกิน



รูปที่ 5 ผลกระทบร่วมของค่าความหยาบผิว



รูปที่ 6 ผลกระทบร่วมของระยะตัดเกิน

ดังนั้นในการแก้ปัญหาปัจจัยที่เหมาะสมกรณีปัญหาหลายผลตอบแทนจึงสามารถทำได้โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ วิธีนี้จะนำผลตอบแทนที่เป็นข้อมูลดิบจากการวัดจะต้องนำข้อมูลมาแปลงให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยใช้สมการที่ (1) หรือ (2) โดยสมการที่ (1) ใช้ในการแปลงข้อมูลเมื่อกระบวนการหรือการทดลองนั้นต้องการผลตอบแทนในรูปแบบที่ยิ่งมีค่ามากยิ่งขึ้น (The-larger-the-better) ส่วนสมการที่ (2) ใช้ในการแปลงข้อมูลเมื่อกระบวนการหรือการทดลองนั้นต้องการผลตอบแทนในรูปแบบที่ยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดี สำหรับในการศึกษานี้ผลตอบแทนในกรณีของความหยาบผิวของชิ้นงานและระยะการตัดเกินเป็นผลตอบแทนในรูปแบบที่ยิ่งมีค่าน้อยยิ่งดี ซึ่งผลการแปลงข้อมูลดิบแสดงดังตารางที่ 6

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

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

เมื่อ  $x_i^*(k)$  คือ ผลตอบแทนที่ได้จากการแปลงข้อมูลดิบที่  $i^{th}$  ของการทดลอง  $k$ ,  $x_i^{(0)}(k)$  คือ ผลตอบแทนที่อยู่ในรูปของข้อมูลดิบที่  $i^{th}$  ของการทดลอง  $k$ ,  $\min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$  คือ ผลตอบแทนที่อยู่ในรูปข้อมูลดิบที่มีค่าน้อยที่สุดของการทดลอง  $k$  และ  $\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$  คือ ผลตอบแทนที่อยู่ในรูปของข้อมูลดิบที่มีค่ามากที่สุดของการทดลอง  $k$



ตารางที่ 6 ผลการแปลงข้อมูลดิบ

Experiment number	ON	IP	FA	Ra	OV
				[0-1]	[0-1]
1	12	12	2	1.0000	0.7500
2	12	15	3	0.6228	0.6250
3	12	18	4	0.1712	0.7500
4	14	12	3	0.2251	0.2500
5	14	15	4	0.3158	0.5000
6	14	18	2	0.0000	0.6250
7	16	12	4	0.4123	0.3750
8	16	15	2	0.4561	1.0000
9	16	18	3	0.3596	0.0000

จากตารางที่ 6 ผลการแปลงข้อมูลดิบค่าสูงสุดจากการทดลองจะได้เท่ากับ 0 ในขณะที่ค่าต่ำสุดจะได้เท่ากับ 1 หลังจากแปลงค่าแล้วนำข้อมูลที่ถูกลบไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational coefficient) จากสมการที่ (3) โดยกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความแตกต่าง (Distinguishing coefficient) เท่ากับ 0.5 หรือเป็นการให้ความสำคัญกับผลตอบสนองทั้งค่าความหยาบผิวและระยะเวลาตัดเกินในระดับที่เท่าๆกัน

$$\zeta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi\Delta_{\max}} \quad (3)$$

เมื่อ  $\zeta_i(k)$  คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองที่  $i^{th}$  ของการทดลอง  $k$  และ  $\xi$  คือสัมประสิทธิ์ความแตกต่าง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่  $\Delta_{\min}$ ,  $\Delta_{\max}$  และ  $\Delta_{0i}(k)$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4), (5) และ (6) ตามลำดับ

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

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

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

เมื่อ  $\Delta_{0i}(k)$  คือ ผลต่างระหว่างผลตอบสนองในกรณีอุดมคติ  $x_0^*(k)$  กับผลตอบสนองจากการทดลอง  $x_i^*(k)$  โดยที่เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational grade) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แสดงได้ดังตารางที่ 7

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

เมื่อ  $\gamma_i$  คือ เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองที่  $i^{th}$  ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองที่  $i^{th}$  จำนวน  $n$  การทดลอง

ในการเลือกตัวแปรการตัดที่เหมาะสมด้วยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้นจะทำการเลือกจากค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Average grey relational grade) สำหรับแต่ละระดับของตัวแปรการตัด โดยจะเลือกตัวแปรจากระดับที่มีค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สูงสุดของตัวแปรนั้นๆ [12-13] โดยค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แสดงในตารางที่ 8 จึงได้เงื่อนไขของการตัดที่เหมาะสม คือ การกำหนด ON ที่ระดับ 1 (12  $\mu$ sec) IP ที่ระดับ 2 (15 A) และ FA ที่ระดับ 1 (2 mm/sec.)

**ตารางที่ 7** สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แต่ละการทดลอง

Experiment number	Grey relational coefficient		Grey relational grade
	Ra	OV	
	1	1.0000	0.6667
2	0.5700	0.5714	0.5707
3	0.3763	0.6667	0.5215
4	0.3922	0.4000	0.3961
5	0.4222	0.5000	0.4611
6	0.3333	0.5714	0.4524
7	0.4597	0.4444	0.4521
8	0.4790	1.0000	0.7395
9	0.4385	0.3333	0.3859

**ตารางที่ 8** ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

Machining parameters	Average grey relational grade		
	Level 1	Level 2	Level 3
ON	<b>0.6418</b>	0.4365	0.5258
IP	0.5605	<b>0.5904</b>	0.4533
FA	<b>0.6751</b>	0.4509	0.4782

เมื่อนำตัวแปรที่เหมาะสมกับการตัดไปทำนายด้วยวิธีทาคูชิสามารถเขียนเป็นสมการได้ คือ

$$y_{Ra} = 4156.560 \times 10^{-3} - 5.602 \times 10^{-3}(x_1) - 1.637 \times 10^{-3}(x_2) - 15.780 \times 10^{-3}(x_3) \quad (8)$$

$$y_{OV} = 526.6670 \times 10^{-3} - 1.111 \times 10^{-3}(x_1) - 0.889 \times 10^{-3}(x_2) - 10.000 \times 10^{-3}(x_3) \quad (9)$$

โดยที่  $y_{Ra}$  และ  $y_{OV}$  คือ ผลตอบสนองของค่าความหยาบผิวและระยะเวลาการตัดเกิน ตามลำดับ เมื่อ  $x_1$  คือ ระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 12  $\mu\text{sec}$ ,  $x_2$  คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์กที่ 15 A และ  $x_3$  คือ อัตราการป้อนลวดที่ 2 mm/sec. อย่างไรก็ตามสำหรับในกระบวนการตัดด้วยการปล่อยประจุไฟฟ้า (Electric discharge processes) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสปาร์กเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวและระยะเวลาการตัดเกินของชิ้นงาน [14] จากสมการที่ (8) และ (9) ค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรของระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์กมีผลในแง่ลบ ดังนั้นการเพิ่มค่าตัวแปรในสมการจึงทำให้ความหยาบผิวและระยะเวลาการตัดเกินของชิ้นงานลดลง ซึ่งผลจากการทำนายการตัดชิ้นงานจะมีค่าความหยาบผิวเท่ากับ 4.033  $\mu\text{m}$  โดยสมการทำนายมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 80.70 % ขณะที่ระยะเวลาการตัดเกินจะเท่ากับ 0.480 mm. สมการทำนายมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ เท่ากับ 87.00 % และเมื่อนำเงื่อนไขที่เหมาะสมไปทำการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่า ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานและระยะเวลาการตัดเกินจะเท่ากับ 4.012  $\mu\text{m}$  และ 0.470 mm. ตามลำดับ ซึ่งจากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์นั้นสามารถใช้เลือกตัวแปรการตัดได้ดีกว่าวิธีทาคูชิเนื่องจากสามารถใช้เลือกตัวแปรในกรณีหลายผลตอบสนองได้ [15] แต่อย่างไรก็ตามวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ไม่สามารถทำให้ทราบถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทดลอง

#### 4. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอวิธีการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมของการตัดไทเทเนียมด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดโดยใช้วิธีของทาгуชิและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์จากตัวแปร คือระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์ก และอัตราการป้อนลวด ซึ่งผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้พิจารณาตัวแปรที่เหมาะสมกับกรณีปัญหาของผลตอบสนองได้แก่ ค่าความหยาบผิวและระยะเวลาตัดเกินได้ดี โดยผลมีค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์เท่ากับ 0.6418, 0.5904 และ 0.6751 ตามลำดับ สำหรับตัวแปรเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมได้จากการกำหนดระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 12  $\mu\text{sec}$  กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการ สปาร์กที่ 15 A และอัตราการป้อนลวดที่ 2 mm/sec ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์จึงเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเลือกตัวแปรที่เหมาะสมในกรณีปัญหาแบบหลายผลตอบสนองได้ โดยมีจำนวนการทดลองน้อยกว่าวิธีที่จำเป็นต้องมีการทดลองซ้ำ เช่น วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดความหยาบผิว

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. K. Pandey and A. K. Dubey, “Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet”, *Optics & Laser Technology* 44, 2012, pp. 1858-1865.
- [2] E. Gariboldi and B. Previtali, “High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium”, *Journal of Materials Processing Technology* 160, 2005, pp. 77-89.
- [3] N. M. Abbas, D. G. Solomon, and M. F. Bahari, “A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 2007, pp. 1214-1228.
- [4] J.A. Sanchez, J.L. Rodil, A. Herrero, L.N. Lopez de Lacalle and A. Lamikiz, “On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting”, *Journal of Materials Processing Technology* 182, 2007, pp. 574-579.
- [5] N. Tosun, C. Cogun and G. Tosun, “A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method”, *Journal of Materials Processing Technology* 152, 2004, pp. 316-322.
- [6] S. Sarkar, S. Mitra and B. Bhattacharyya, “Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of  $\gamma$ -titanium aluminide alloy”, *Journal of Materials Processing Technology* 159, 2005, pp. 286-294.

- [7] P. Shandilya, P.K. Jain and N.K. Jain, “Parametric Optimization During Wire Electrical Discharge Machining using Response Surface Methodology”, *Procedia Engineering* 38, 2012, pp. 2371-2377.
- [8] R. Mukherjee, S. Chakraborty and S. Samanta, “Selection of wire electrical discharge machining process parameters using non-traditional optimization algorithms”, *Applied Soft Computing* 12, 2012, pp. 2506-2516.
- [9] C.T. Lin, I.F. Chung and S.Y. Huang, “Improvement of machining accuracy by fuzzy logic at corner parts for wire-EDM”, *Fuzzy Sets and Systems* 122, 2001, pp. 499-511.
- [10] N. Tosun, C. Cogun and G. Tosun, “A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method”, *Journal of Materials Processing Technology* 152, 204, pp. 316-322.
- [11] U. Caydas, A. Hasçalık and S. Ekici, “An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model for wire-EDM”, *Expert Systems with Applications* 36, 2009, pp. 6135-6139.
- [12] J.L. Lin and C.L. Lin, “The use of grey-fuzzy logic for the optimization of the manufacturing process”, *Journal of Materials Processing Technology* 160, 2005, pp. 9–14.
- [13] P. Narender Singh, K. Raghukandan and B.C. Pai, “Optimization by Grey relational analysis of EDM parameters on machining Al-10%SiCp composites”, *Journal of Materials Processing Technology* 155–156, 2004, pp. 1658–1661.
- [14] M.P. Goover, “Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems”, 4<sup>th</sup> Edition, JOHN WILEY & SONS, INC. 2010.
- [15] H. Hasani, S.A. Tabatabaei and G. Amiri, “Grey Relational Analysis to Determine the Optimum Process Parameters for Open-End Spinning Yarns”, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 7, 2012, pp. 81-86.