

# การศึกษาประสิทธิภาพการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าแบบเดินตัดหลายครั้งบนวัสดุ เหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 61 โดยใช้ชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องจักร

## Studying Performance of Wire Electrical Discharge Machining for Multi-pass Cutting Strategy on the Tool Steel SKD 61 Using Recommended Parameters of Machine

กมลพงศ์ แจ่มกมล, ปิยะพงษ์ คำคุณ และ ศุภวัฒน์ ชูวาริ\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ถนนพหลโยธิน แขวงสามเสน กรุงเทพมหานคร 10120

Kamonpong Jamkamon, Piyapong Kumkoon and Suppawat Chuvaree\*

Department of mechanical and industrial engineering, Faculty of engineering,

Rajamangala University of Technology Krungthep, Thung Maha Mek, Sathorn, Bangkok, 10120, Thailand

\*Corresponding Author E-mail: suppawat.c@mail.rmutk.ac.th

Received: Mar 04, 2024; Revised: May 15, 2024; Accepted: Jul 10, 2024

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตัดโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับการเดินตัดแบบหลายครั้ง โดยใช้ชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องจักรสำหรับการทดลองตัดเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD 61 ที่มีความหนา 40 มิลลิเมตร ลวดอิเล็กโทรดทองเหลืองที่ใช้สำหรับการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร พารามิเตอร์แนะนำสำหรับการเดินตัดจำนวน 4 ครั้ง ประกอบด้วย การเดินตัดครั้งที่ 1 ถูกกำหนดให้เป็นการเดินตัดแบบเต็มหน้าลวดซึ่งจำเป็นต้องขจัดเนื้อวัสดุชิ้นงานออกในปริมาณมากโดยมีการปรับตั้งความเร็วในการเดินตัดที่ระดับ 2.60 มิลลิเมตร/นาที สำหรับการตัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 เป็นการเดินตัดขอบงานเพื่อขจัดเนื้อวัสดุชิ้นงานเพียงเล็กน้อยโดยมีการปรับตั้งความเร็วในการเดินตัดที่ระดับ 3.20, 3.60 และ 6.80 มิลลิเมตร/นาที ตามลำดับ ทั้งนี้ผลจากการทดลองพบว่า ความเร็วในการเดินตัดแบบเต็มหน้าลวดมีค่าต่ำกว่าที่คาดหมาย 18.01 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของความเร็วตัดสำหรับการเดินตัดขอบงานครั้งที่ 2, 3 และ 4 มีประสิทธิภาพสูงกว่าค่าความคาดหมาย 104.34, 128.89 และ 4.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ความหยาบผิวเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนเชิงมิติของขนาดชิ้นงานลดลงเมื่อจำนวนครั้งการตัดเพิ่มมากขึ้น ความแตกต่างระหว่างค่าที่คาดหวังและผลการทดลองจะมีประโยชน์อย่างมากในการตัดสินใจในการวางแผนการทำงานและการควบคุมคุณภาพสำหรับการตัดวัสดุชิ้นงานโดยกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า

**คำสำคัญ:** การเดินตัดแบบหลายครั้ง, การตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า, เหล็กกล้าเครื่องมือ

### Abstract

This research aims to study the machining efficiency of wire electrical discharge machining for multi-pass cutting. The recommended parameters of the machine are employed for cutting test tool steel grade SKD 61 with the thickness of 40 mm. The brass wire electrode with the diameter of 0.25 mm was used in the cutting test. The recommended parameters for multi-pass tool path cutting consisted of 4 operations. The 1<sup>st</sup> cut was defined as a full cut that required the removal of a large amount of workpiece material, with the cutting speed set at 2.60 mm/min. The 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>, and 4<sup>th</sup> cuts involve cutting on the edge of the workpiece to remove only

a small amount of work material, with the cutting speed set at 3.20, 3.60, and 6.80 mm/min, respectively. The experimental test showed that the machining performance of the cutting speed for the 1<sup>st</sup> cut was lower than the expected value by approximately 18.01 percent. The 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup>, and 4<sup>th</sup> cuts found that the cutting speed higher than expected value by approximately 104.34, 128.89 and 4.12 percentage for each cutting pass, respectively. In addition, the surface roughness and dimensional error of the machined part decrease as the number of cutting passes increases. The difference between the expected values and the experimental results is very useful in planning decisions and quality control for cutting workpieces by the process of wire electrical discharge machining.

**Keywords:** Multi-pass cutting, Wire electrical discharge machining, Tool steel

## 1. บทนำ

การตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า (Wire electrical discharge machining, WEDM) เป็นกระบวนการแปรรูปสมัยใหม่ที่เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนและยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล โดยการควบคุมพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและสถานะแวดล้อมที่หลากหลายเพื่อให้เกิดการสปาร์กระหว่างเส้นลวดอิเล็กโทรด (Wire electrode) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องมือในการแปรรูปกับพื้นผิววัสดุชิ้นงาน (Workpiece) ที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าภายใต้การปกคลุมด้วยของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric fluid) [1],[2] ปฏิกริยาทางไฟฟ้าจากการสปาร์จะทำให้เกิดความร้อนที่สูงเพียงพอต่อการระเหยของวัสดุเนื้องานและถูกจัดออกในรูปของก๊าซ ของเหลว และของแข็งในระดับอนุภาค (Debris particle) [3],[4] โดยมีของเหลวไดอิเล็กทริกซึ่งคอยทำหน้าที่ขจัดเศษเนื้อวัสดุชิ้นงานออกจากบริเวณพื้นผิวการแปรรูปและรักษาความเสถียรในการสปาร์ส่งผลให้ลวดอิเล็กโทรดที่เป็นเครื่องมือจะไม่สัมผัสกับชิ้นงานเป็นเหตุให้สมบัติทางกลโดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็ง (Hardness) และความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุชิ้นงานไม่ส่งผลต่อความสามารถในการแปรรูป อย่างไรก็ตามการสึกกร่อนบนพื้นผิวลวดอิเล็กโทรดเนื่องจากการสปาร์เป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ไม่ได้ทำให้ต้องมีการป้อนลวดตลอดเวลา ทั้งนี้ความเร็วในการป้อนจะขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของการสปาร์และขนาดความหนาของวัสดุชิ้นงาน นอกจากนี้ระดับความรุนแรงของการสปาร์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการตัดซึ่งนิยามประเมินในรูปของความเร็วในการตัด (Cutting speed) อัตราการขจัดเนื้องาน (Material removal rate) และกว้างของรอยตัด (Kerf) รวมทั้ง

ความสมบูรณ์ของพื้นผิวรอยตัด (Integrity) ซึ่งนิยามประเมินจากความหยาบผิว (Surface roughness) [3],[5],[6]

จากการศึกษางานวิจัยของ Asgar และ Singholi [3] แสดงให้เห็นว่าระดับกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Peak current) เป็นพารามิเตอร์หลักที่ส่งผลต่อความรุนแรงในการสปาร์ โดยมีเวลาเปิด (Pulse on time) และเวลาปิด (Pulse off time) เป็นพารามิเตอร์เสริมการสปาร์ที่รุนแรงก่อให้เกิดอัตราการขจัดเนื้องานสูงแต่จะทำให้ความสมบูรณ์ของพื้นผิวชิ้นงานและความแม่นยำในการแปรรูปลดลงเนื่องจากการสึกกร่อนรวมทั้งการขาดของลวดอิเล็กโทรด (Wire breakage) ทั้งนี้การเพิ่มความเร็วในการป้อนลวด (Wire speed) อาจเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดแต่ก็ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนในการแปรรูปและการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงลวด (Wire tension) ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวรอยตัดและการขาดของลวดอิเล็กโทรด นอกจากนี้ Priyadarshini และคณะ [5] ทำการทดลองตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI P20 พบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมภายใต้ข้อกำหนดอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดและความกว้างรอยตัดต่ำสุดได้ปรากฏภายใต้ชุดพารามิเตอร์ควบคุมที่ต่างกัน และ Singh [7] ทำการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ควบคุมในการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI H13 สรุปได้ว่าพื้นผิวรอยตัดของชิ้นงานมีความสมบูรณ์เมื่อพารามิเตอร์ควบคุมมีความเร็วตัดที่ต่ำและเมื่อความเร็วตัดเพิ่มมากขึ้นความสมบูรณ์ของพื้นผิวชิ้นงานจะลดต่ำลงจากงานวิจัยเหล่านี้เห็นได้ชัดว่าระดับพารามิเตอร์ควบคุมในกระบวนการตัดจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพทำให้มีการทดลองอย่างกว้างขวางเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการตัดและปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวรอยตัดโดยการตัดแบบหลายครั้งโดยควบคุมระดับพารามิเตอร์ที่ต่างกัน (Multi-pass cutting strategy) [8–11]

ความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีทำให้เกิดการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการสำหรับภาคอุตสาหกรรมตามยุคสมัย ซึ่งในปัจจุบันนี้เครื่องจักรสมัยใหม่ได้มาพร้อมกับชุดพารามิเตอร์แนะนำสำหรับควบคุมระบบการตัดวัสดุชิ้นงานสำหรับการเดินตัดแบบหลายครั้ง และค่าคาดหวังที่คาดหวังจะได้รับทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ อาทิเช่น ความเร็วในการตัด (Cutting speed setup) และระยะเพื่อแนวการเดินตัด (Tool path compensated) รวมทั้งค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวรอยตัด (Roughness of machined surface) [12] พื้นฐานการตัดแบบหลายครั้งสำหรับการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าโดยการตัดครั้งแรกเป็นการตัดแบบหยาบ (Rough cutting) ที่มีการเดินตัดแบบเต็มหน้าลวดซึ่งมุ่งเน้นการควบคุมพารามิเตอร์เพื่อก่อให้เกิดความรุนแรงของการสปาร์กและอัตราการขจัดเนื้องานที่สูง โดยการเดินตัดในครั้งถัดไปจะเป็นการตัดขอบ (Trimming cutting edge) จัดได้ว่าเป็นการเดินตัดแบบกึ่งสำเร็จ (Semi-finish cutting) และการตัดรอบสุดท้ายจะเป็นการตัดแบบสำเร็จ (Finish cutting) [13] ทั้งนี้เนื้อวัสดุชิ้นงานที่ต้องขจัดออกสำหรับการเดินตัดขอบในแต่ละครั้งจะมีการควบคุมปริมาตรหรือพื้นผิวของการสปาร์กให้ลดต่ำลงเพื่อเพิ่มความเร็วในการเดินตัด รวมทั้งการควบคุมความรุนแรงของการสปาร์กโดยการปรับลดระดับค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาเปิดเพื่อลดความรุนแรงในการสึกกร่อนของบนพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานและลวดอิเล็กโทรดซึ่งจัดได้ว่าเป็นการปรับปรุงคุณภาพรอยตัดและลดความคลาดเคลื่อนในกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า

การควบคุมพารามิเตอร์และสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าสามารถกระทำได้ด้วยวิธีการที่หลากหลาย ซึ่งวิธีการโดยทั่วไปจะต้องมีการออกแบบการทดลองเพื่อควบคุมตัวแปรและบันทึกผลสำหรับการวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด [3],[14] การใช้ชุดพารามิเตอร์แนะนำในการตัดที่มาพร้อมกับเครื่องจักรมีข้อบ่งชี้สำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งมีการแบ่งตามกลุ่มวัสดุและความหนาของชิ้นงานควบคู่กับชนิดและขนาดของวัสดุลวดอิเล็กโทรด [12],[15] ทั้งนี้ในการตัดวัสดุชิ้นงานจะช่วยให้ทราบถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจริง โดยลดขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและทำให้ทราบถึงผลลัพธ์ของความ

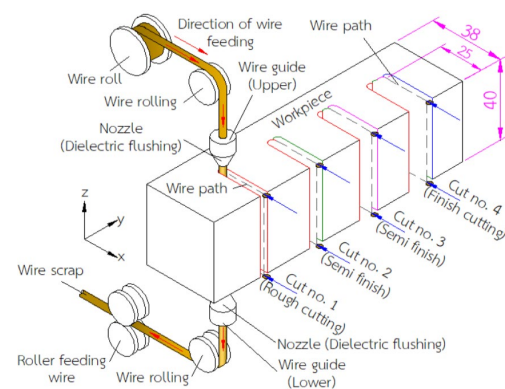
แตกต่างระหว่างค่าที่คาดหวังซึ่งมีการระบุในชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องจักร ซึ่งจะยังเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนควบคุมการผลิตและคุณภาพของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันงานวิจัยที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการตัดชิ้นงานด้วยพารามิเตอร์แนะนำยังคงมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของชุดพารามิเตอร์แนะนำสำหรับการตัดวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 61 โดยการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าสำหรับการเดินตัดแบบหลายครั้ง

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

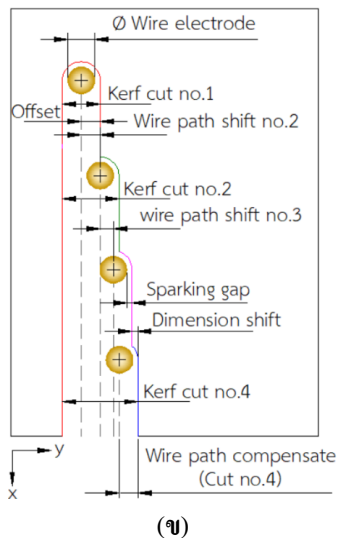
### 2.1 วิธีการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการทดลองตัดชิ้นงานสำหรับการเดินตัดแบบหลายครั้งโดยใช้ชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องจักรเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานจากการตัดงานจริงกับค่าคาดหวังที่ระบุ สำหรับการเดินตัดแต่ละครั้ง ทั้งนี้ประสิทธิภาพการทำงานประเมินจากความเร็วในการเดินตัด ความกว้างหรือระยะการชดเชยแนวการเดินตัดของลวดอิเล็กโทรด และความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวรอยตัด ตลอดจนความคลาดเคลื่อนเชิงมิติสำหรับการเดินตัดแบบหลายรอบ

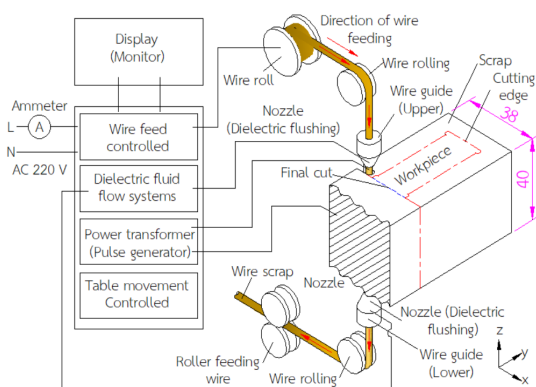
ทั้งนี้การศึกษาวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการทดลองตัดงานเพื่อประเมินความกว้างรอยตัด (Kerf) สำหรับการตัดแต่ละรอบดังแสดงแผนภาพการปฏิบัติงานในรูปที่ 1 โดยในส่วนหลังเป็นการทดลองตัดชิ้นงานเพื่อประเมินประสิทธิภาพการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าจากความเร็วในการเดินตัด ความคลาดเคลื่อนทางด้านมิติ และคุณภาพผิวงาน สำหรับการเดินตัดชิ้นงานแบบหลายครั้ง แสดงดังแผนภาพการปฏิบัติงานในรูปที่ 2



(ก)



รูปที่ 1 การทดลองตัดงานเพื่อประเมินความกว้างรอยตัด และแนวการเดินทางของลวดอิเล็กโทรด (ก) การทดลองตัดงานแต่ละรอบ (ข) ความกว้างรอยตัดและแนวเดินลวด



รูปที่ 2 การทดลองตัดงานแบบเดินหลายรอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงาน

## 2.2 เครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้กระทำการบนเครื่องจักรกลอัตโนมัติสำหรับการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น Mitsubishi รุ่น MV1200S ทั้งนี้ระยะการเดินตัดและเวลาที่ใช้จะถูกบันทึกจากหน้าจอแสดงสถานะของเครื่องจักรเพื่อใช้สำหรับการคำนวณและแสดงผลในรูปของค่าความเร็วตัด ในส่วนของความกว้างรอยตัดและค่าความคลาดเคลื่อนเชิงมิติของขนาดชิ้นงานถูกตรวจวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical measuring microscope, OMM) ที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น Olympus รุ่น STM6 ทั้งนี้วัสดุชิ้นงานสำหรับการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนเชิงมิติที่ระดับความลึกต่าง ๆ จะถูก

จัดเตรียมโดยการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า ในส่วนของความหยาบผิวและความสมบูรณ์ของพื้นผิวรอยตัดได้ทำการวัดและตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวแบบสัมผัส ชิ้นงานมีเครื่องหมายการค้าเป็น Mahr รุ่น MarSurfPS1 ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (Confocal laser scanning microscope, CLSM) ที่มีเครื่องหมายการค้าเป็น Olympus รุ่น LEXT OLS 5000 ตามลำดับ

## 2.3 วัสดุชิ้นงานและลวดอิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุชิ้นงานในการทดลองนี้เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับงานร้อน SKD 61 มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 [16] ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อนโดยมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 46–48 HRC ทั้งนี้ชิ้นงานสำหรับการทดลองถูกจัดเตรียมโดยการตัดโลหะด้วยไฟฟ้าให้มีขนาด กว้าง × หนา × ยาว เท่ากับ 35 × 40 × 75 มิลลิเมตร ตามลำดับ การจัดเตรียมชิ้นงานถูกควบคุมให้มีความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำกว่า 0.50 ไมโครเมตร โดยลวดอิเล็กโทรดสำหรับการทดลองเป็นลวดทองเหลือง (Cu : Zn, 60 : 40) แบบไม่เคลือบผิวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความคลาดเคลื่อนทางขนาดเป็น 0.25–0.002 มิลลิเมตร โดยการทดลองตัดชิ้นงานกระทำภายใต้การปกคลุมและการฉีดเศษอนุภาคเพื่อรักษาความเสถียรในการสปาร์คโดยของเหลวไดอิเล็กทริกที่เป็นน้ำกลั่น ทั้งนี้พื้นผิวชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดด้วยน้ำยาเคมีสำหรับขจัดคราบสนิมก่อนทำการตรวจสอบขนาดและคุณภาพพื้นผิววัสดุชิ้นงาน

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 61 โดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก

| Elements | Description |
|----------|-------------|
| C        | 0.32–0.45   |
| Si       | 0.80–1.25   |
| Mn       | 0.20–0.60   |
| Cr       | 4.75–5.50   |
| Mo       | 1.10–1.75   |
| V        | 0.80–1.20   |
| Fe       | Balance     |

## 2.4 สถานะแวดล้อมและเงื่อนไขการทดลอง

การเดินตัดชิ้นงานรวมทั้งพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทั้งสถานะแวดล้อมในการทดลองจะควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์โดยการสร้างใช้ชุดโปรแกรมคำสั่งเชิงตัวเลข (Computer numerical control, CNC) ด้วยชุดคำสั่งมาตรฐาน (G-Code, M-Code) ร่วมกับชุดพารามิเตอร์แนะนำสำหรับการตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (E-pack no.) สำหรับการเดินตัดแบบหลายครั้ง (Multi pass cutting) ซึ่งชุดพารามิเตอร์แนะนำที่ใช้เลือกพิจารณาจากวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือมีความหนา 40 มิลลิเมตร และลวดคัลเล็กโทรดที่ใช้เป็นทองเหลืองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ภายใต้เงื่อนไขการตัดชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นพัลส์ (Pulse) สำหรับรูปแบบมาตรฐานสำหรับการตัดจำนวน 4 ครั้ง โดยปรับตั้งหัวฉีดของเหลวไดอิเล็กทริก (Flushing nozzle) ห่างจากพื้นผิวชิ้นงาน 0.2 มิลลิเมตร ทั้งนี้ชุดพารามิเตอร์และระยะชดเชยแนวการเดินตัดแนะนำ (Wire path compensated) รวมทั้งค่าคาบหมายที่คาดว่าจะได้รับมาพร้อมกับเครื่องจักรแสดงในตารางที่ 2 และค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าจากการตรวจวัดด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL950 แสดงผลดังตารางที่ 3

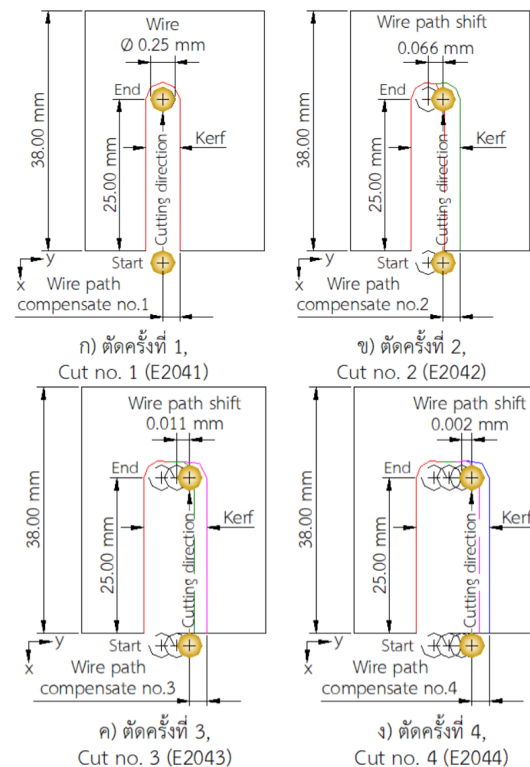
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์แนะนำและค่าคาบหมายที่คาดว่าจะได้รับ

| Cut no. | E-pack no. | Setup speed (mm/min) | Compensate tool path (mm) | Roughness Ra ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------|------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 1       | 2041       | 2.60                 | 0.211                     | 2.70                           |
| 2       | 2042       | 3.20                 | 0.145                     | 1.80                           |
| 3       | 2043       | 3.60                 | 0.134                     | 0.47                           |
| 4       | 2044       | 6.80                 | 0.132                     | 0.34                           |

ตารางที่ 3 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยออสซิลโลสโคป

| E-pack no. | Peak voltage (V) | Peak current (A) | Pulse on time ( $\mu\text{s}$ ) | Pulse off time ( $\mu\text{s}$ ) |
|------------|------------------|------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 2041       | 65               | 20               | 50                              | 50                               |
| 2042       | 115              | 1.35             | 33                              | 49                               |
| 2043       | 70               | 1.00             | 118                             | 12                               |
| 2044       | 50               | 0.78             | 297                             | 7                                |

สำหรับการทดลองเดินตัดชิ้นงานตามชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องจักรเพื่อประเมินความกว้างรอยตัดแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งกำหนดให้ขอบงานตำแหน่งเริ่มต้นการตัดและทำการเดินตัดชิ้นงานขนานในแนวแกนเป็นระยะความยาว 25 มิลลิเมตร ด้วยชุดพารามิเตอร์แนะนำ โดยในการทดลองตัดงานจริงสำหรับการเดินตัดครั้งที่ 1 จึงเป็นการตัดแบบเต็มหน้าลวด ด้วยชุดพารามิเตอร์แนะนำ E2041 จากนั้นการตัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 จะเป็นการเดินตัดขอบงาน (Wire path shift) ครั้งละ 0.066, 0.011 และ 0.002 มิลลิเมตร ด้วยชุดพารามิเตอร์แนะนำ E2042, E2043 และ E2044 ตามลำดับ ทั้งนี้ชุดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นการปรับตั้งตามคำแนะนำของเครื่องจักรที่ใช้สำหรับการตัดวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าที่มีความหนา 40 มิลลิเมตร เท่านั้น

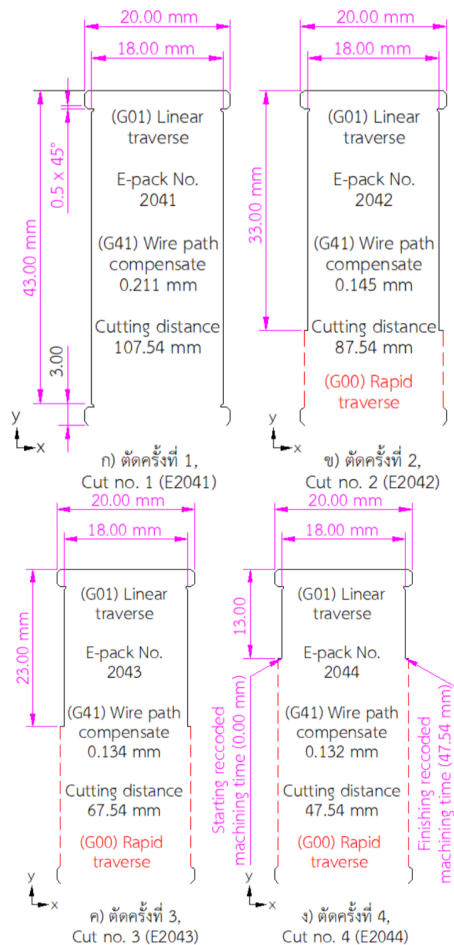


รูปที่ 3 การปรับตั้งระยะแนวการเดินของลวดคัลเล็กโทรด

สำหรับการทดลองตัดงานแบบหลายรอบ

ในส่วนของการทดลองเพื่อประเมินความเร็วในการเดินตัด ความคลาดเคลื่อนทางด้านมิติ และคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ยได้กำหนดแนวการเดินตัดชิ้นงานรวมทั้งพลังงานไฟฟ้าและลวดที่ใช้สำหรับการตัดในแต่ละขั้นตอนได้กำหนดแนวการเดินตัดชิ้นงานในแต่ละครั้งดัง

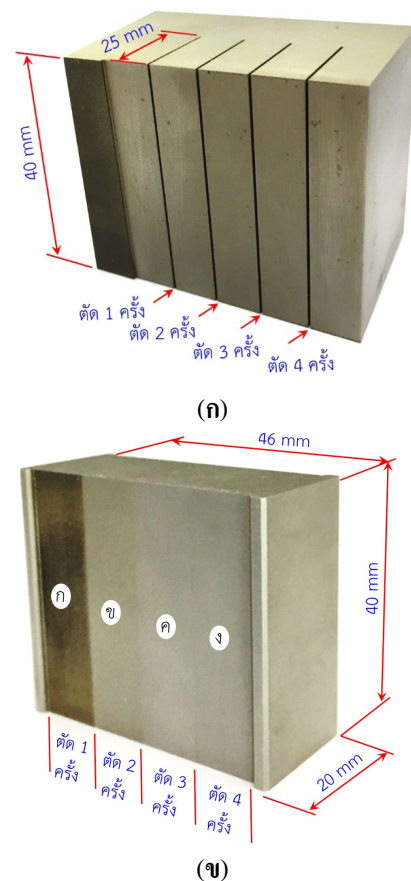
แสดงดังรูปที่ 4 ความเร็วในการตัดจะประเมินจากระยะทางการตัดเป็นมิลลิเมตรต่อหน่วยเวลาที่ที่ใช้ ทั้งนี้การบันทึกระยะเวลาการตัดและเวลาที่ใช้สำหรับการตัดทุกครั้งจะอ้างอิงตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดการบันทึกที่ระยะการตัด 47.54 มิลลิเมตร (อ้างอิงตำแหน่งจากรูปที่ 4(ง)) โดยประสิทธิภาพการทำงานจากการทดลองจะถูกเปรียบเทียบกับค่าคาดหวังซึ่งระบุในชุดพารามิเตอร์แนะนำ



รูปที่ 4 การทดลองตัดงานแบบหลายครั้งโดยการปรับระยะชดเชยแนวการเดินทางของลวดอิเล็กโทรด (Wire path compensate)

### 3. ผลการทดลอง

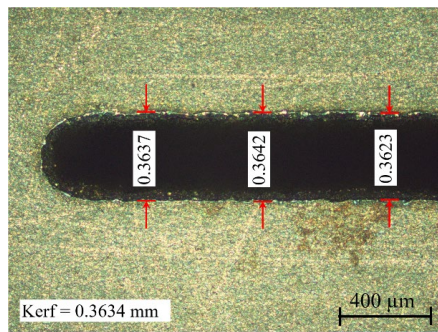
ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองตัดชิ้นงานเพื่อประเมินความกว้างของลวดอิเล็กโทรดทั้งนี้ชิ้นงานที่ผ่านการตัดแสดงดังรูปที่ 5(ก) และชิ้นงานที่ผ่านการตัดเพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนเชิงมิติและคุณภาพผิวงานแสดงดังรูปที่ 5(ข) โดยผลการทดลองและการอภิปรายผลได้แสดงดังต่อไปนี้



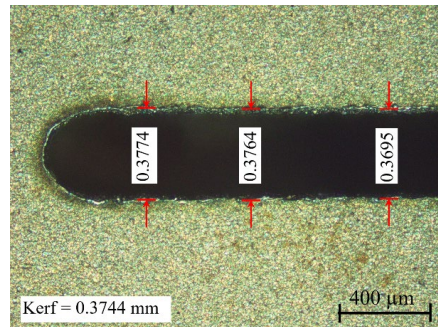
รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการตัดด้วยชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (ก) การทดลองตัดเพื่อประเมินความกว้างรอยตัด (ข) การทดลองตัดชิ้นงานแบบเดินตัดหลายครั้ง

#### 3.1 ความกว้างรอยตัด (Kerf)

ความกว้างรอยตัดได้ถูกวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ขนาดกำลังขยาย 5 เท่า สำหรับพื้นผิวรอยตัดด้านบนและด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 6-7 จากรูป จะเห็นได้ว่ารอยตัดด้านล่าง (รูปที่ 6(ก) และรูปที่ 7(ก)) มีขนาดความกว้างมากกว่ารอยตัดด้านบน (รูปที่ 6(ข) และรูปที่ 7(ข)) ซึ่งเป็นผลมาจากการสีกกร่อนของเส้นลวดทำให้พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดลดลงส่งผลให้ลวดอิเล็กโทรดเกิดการสั่นสะเทือนมากขึ้นเป็นเหตุให้ขนาดความกว้างรอยตัดด้านล่างมากกว่าด้านบนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Habib [17] ที่ได้อภิปรายผลการศึกษาก่อนการสั่นของลวดอิเล็กโทรดในการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าบนวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าเครื่องมือจะส่งผลให้รอยตัดมีขนาดความกว้างเพิ่มมากขึ้นและความสามารถในการแปรรูปจะลดลงเนื่องจากความไม่เสถียรของขนาดเส้นลวดอิเล็กโทรดที่เกิดการสีกกร่อน

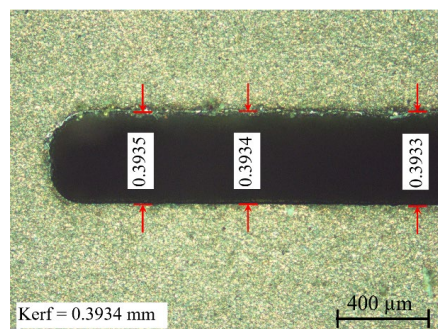


(ก)

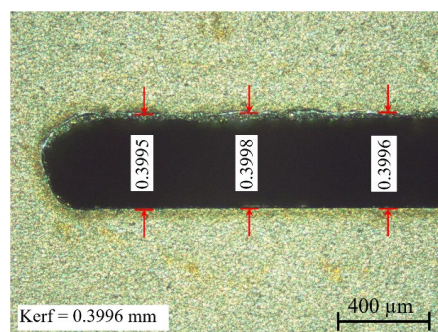


(ข)

รูปที่ 6 ขนาดความกว้างรอยตัดสำหรับการตัดครั้งที่ 1  
(ก) รอยตัดด้านบน (ข) รอยตัดด้านล่าง



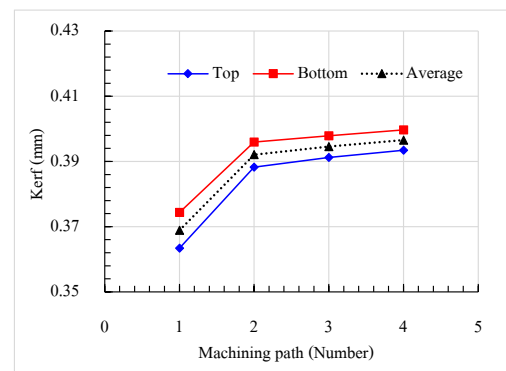
(ก)



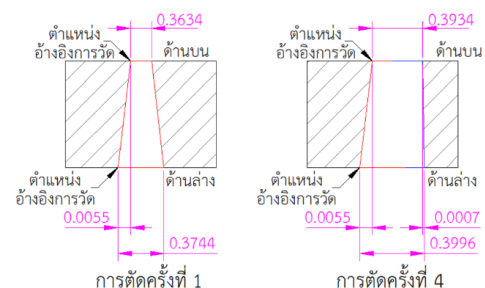
(ข)

รูปที่ 7 ขนาดความกว้างรอยตัดสำหรับการตัดครั้งที่ 4  
(ก) รอยตัดด้านบน (ข) รอยตัดด้านล่าง

จากผลการทดลองเดินตัดชิ้นงานแบบหลายครั้งแสดง  
ดังรูปที่ 8(ก) พบว่า ขนาดความกว้างรอยตัดจะเพิ่มขึ้นตาม  
จำนวนครั้งของการตัดซึ่งมีขนาดเฉลี่ยเป็น 0.3689, 0.3921,  
0.3946 และ 0.3965 มิลลิเมตร สำหรับการตัดแต่ละครั้ง  
ตามลำดับ อย่างไรก็ตามความแตกต่างของขนาดความกว้าง  
ของรอยตัดด้านบนกับรอยตัดด้านล่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อ  
จำนวนครั้งของการตัดเพิ่มมากขึ้น โดยความแตกต่างของ  
ขนาดรอยตัดแต่ละครั้งที่มีขนาด เป็น 0.0110, 0.0077,  
0.0064 และ 0.0062 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ขนาดความ  
กว้างรอยตัดเป็นการวัดที่อ้างอิงจากของรอยตัดครั้งที่ 1 เป็น  
หลัก และการเดินตัดครั้งถัดไปจะตัดขอบงานออกด้านหนึ่ง  
ทำให้ขอบงานในตำแหน่งอ้างอิงการวัด (ขอบรอยตัดครั้งที่  
1) มีความต่างเป็น 0.0055 มิลลิเมตร (0.0110/2) ดังแสดงใน  
รูปที่ 8(ข) ดังนั้นหากพิจารณาเงื่อนไขดังกล่าวแล้วจะทำให้  
สรุปได้ว่า จำนวนครั้งของการตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขอบ  
รอยตัดของชิ้นงานมีความคลาดเคลื่อนเชิงมิติ (ความลาด  
เอียง) ลดลง



(ก)

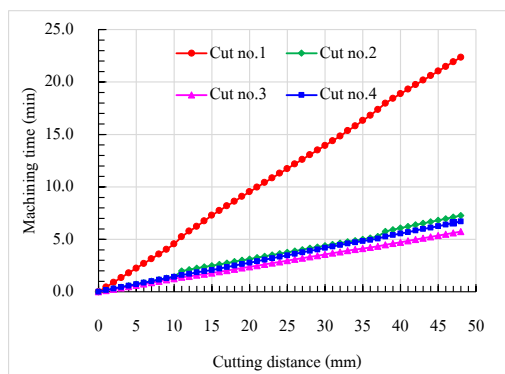


(ข)

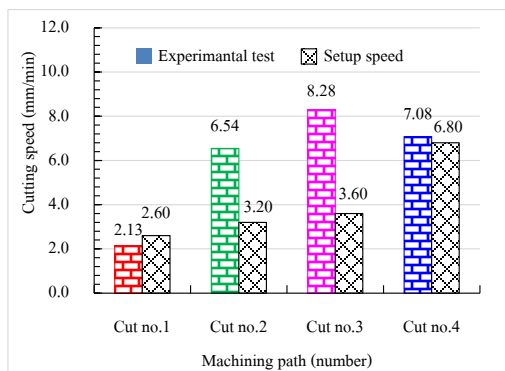
รูปที่ 8 ความกว้างรอยตัดจากการทดลองเดินตัดแต่ละครั้ง  
(ก) ผลการทดลองเดินตัดชิ้นงานแบบหลายครั้ง (ข)  
ตำแหน่งอ้างอิงการวัดความกว้างรอยตัด

### 3.2 ความเร็วในการเดินตัดและการป้อนลวด

การทดลองเดินตัดชิ้นงานโดยใช้ชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องจักรแสดงเวลาที่ใช้สำหรับการเดินตัดในแต่ละครั้งดังรูปที่ 9(ก) สังเกตเห็นได้ว่า เวลาที่ใช้ในการตัดจะเพิ่มขึ้นตามระยะความยาวของรอยตัด โดยการตัดครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นการตัดแบบเต็มหน้าลวดสำหรับระยะความยาวการเดินตัด 47.54 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการตัดสูงสุด 22.36 นาที โดยเวลาที่ใช้ในการตัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 จะลดลงเป็นอย่างมากเหลือเพียง 7.27, 5.74 และ 6.72 นาที คิดเป็นเวลาที่ลดลงเปรียบเทียบกับการตัดแบบเต็มหน้าลวดเป็น 67.5, 74.3 และ 66.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



(ก)



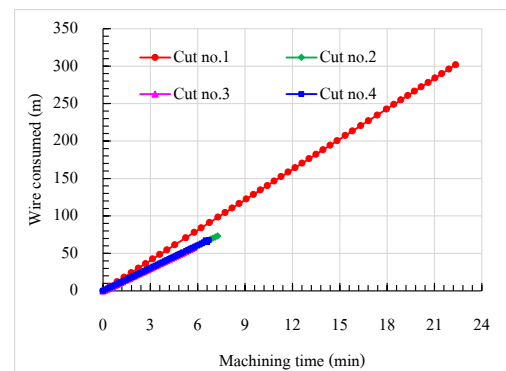
(ข)

**รูปที่ 9** การทดลองเดินตัดแต่ละครั้งโดยใช้ชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องจักร (ก) เวลาที่ใช้ในการเดินตัด (Machining time) (ข) ความเร็วในการเดินตัด (Cutting speed)

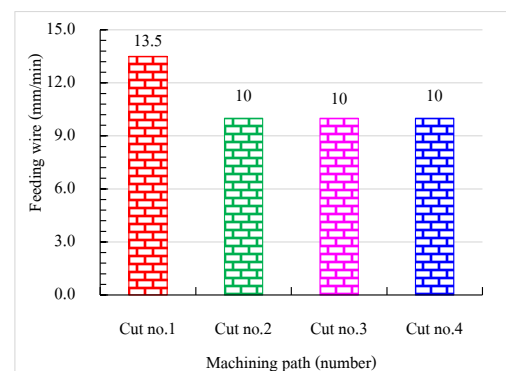
ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ต้องขจัดออกสำหรับการเดินตัดขอบในแต่ละรอบ (Wire path shift) ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบความเร็วจากการทดลองตัดงานกับค่าแนะนำของเครื่องจักรดังแสดงในรูปที่ 9(ข) พบว่า ความเร็ว

ในการเดินตัดสำหรับการตัดครั้งที่ 1 มีระดับประสิทธิภาพการทำงานต่ำกว่าค่าแนะนำโดยประมาณ 18.01 เปอร์เซ็นต์ ( $100 \times (2.60 - 2.13) / 2.60$ ) อย่างไรก็ตามความเร็วในการเดินตัดจากการทดลองเดินตัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 มีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าค่าแนะนำประมาณ 104.34, 128.89 และ 4.12 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

**รูปที่ 10(ก)** แสดงการสิ้นเปลืองลวดอิเล็กโทรดสำหรับการตัดชิ้นงานแต่ละครั้งโดยจำกัดระยะการเดินตัดอยู่ที่ 47.54 มิลลิเมตร พบว่า ปริมาณการสิ้นเปลืองลวดในการตัดแปรผันกับระยะเวลาที่ใช้ในการตัด โดยการสิ้นเปลืองลวดอิเล็กโทรดที่ใช้สำหรับการตัดแต่ละครั้งอยู่ที่ 302, 74, 58 และ 68 เมตร ตามลำดับ



(ก)



(ข)

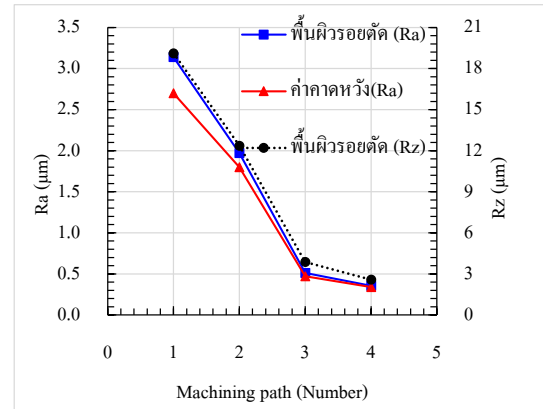
**รูปที่ 10** การสิ้นเปลืองลวดอิเล็กโทรด สำหรับการเดินตัดแต่ละครั้ง (ก) การสิ้นเปลืองลวดในการตัด (Wire consumed) (ข) ความเร็วในการป้อนลวด (Speed of wire feeding)

ทั้งนี้การสิ้นเปลืองลวดอิเล็กโทรดจะแปรผันตามปริมาณเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ต้องขจัดออกหรือพื้นผิวการสปาร์ค [18] ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมความเสถียรใน

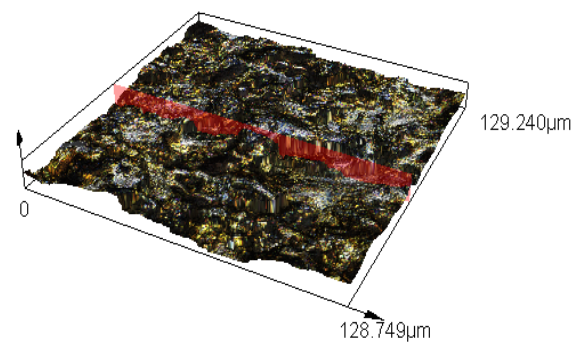
การสปาร์คชุดพารามิเตอร์แนะนำได้ปรับตั้งความเร็วในการเดินตัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะการเดินตัดขอบ (Wire path shift) หรือเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ต้องขจัดออกลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การเดินตัดแบบเต็มหน้าผาด (การตัดครั้งที่ 1) จะมีความเร็วในการป้อนลวดสูงเพื่อลดการสึกกร่อนของลวดอิเล็กโทรดในส่วนของการเดินตัดขอบ (การตัดครั้งที่ 2–4) จะใช้ความเร็วในการป้อนลวดที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10(ข) กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ปริมาณลวดที่ใช้สำหรับการตัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดครั้งที่ 1 จะลดลงโดยประมาณ 75, 81 และ 77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

### 3.3 คุณภาพพื้นผิวชิ้นงานและความคลาดเคลื่อนเชิงมิติ

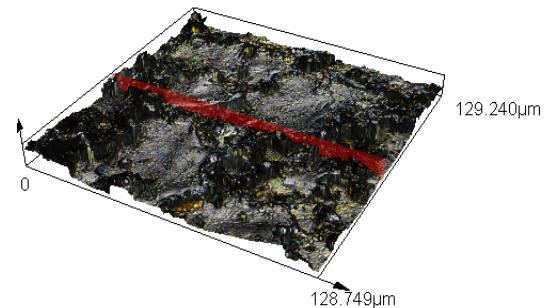
ความหยาบผิวรอยตัดจากการทดลองตัดชิ้นงาน สำหรับการเดินตัดแบบหลายครั้งแสดงดังรูปที่ 11 ผลจากการทดลอง พบว่า ความหยาบพื้นผิวรอยตัดทั้งความหยาบผิวเฉลี่ย ( $R_a$ ) และความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุด ( $R_z$ ) ลดลงเมื่อจำนวนครั้งของการเดินตัดเพิ่มขึ้น โดยความหยาบผิวเฉลี่ยสำหรับการเดินตัดแต่ละครั้งมีค่า 3.14, 1.95, 0.51 และ 0.35 ไมโครเมตร ตามลำดับ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ คุณภาพผิวงานเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งของการตัด โดยความหยาบผิวเฉลี่ยจะลดลงที่ระดับ 37.5, 83.0 และ 88.0 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การเดินตัดครั้งที่ 1 สำหรับการตัดแต่ละครั้ง ตามลำดับ ทั้งนี้ความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวรอยตัดจะมีความแตกต่างจากค่าคาดหวังน้อยมาก เมื่อจำนวนครั้งการตัดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นมากกว่าการตัดครั้งแรกอาจเกิดจากเศษอนุภาคเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ต้องขจัดออกปริมาณมากเกิดการหลอมละลายและเย็นตัวใหม่บนพื้นผิวรอยตัดส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานมีความหยาบสูง อย่างไรก็ตามการตัดครั้งถัดไปจะใช้ระดับกระแสไฟฟ้าที่ต่ำประกอบกับปริมาณเนื้องานที่ต้องขจัดออกมีน้อยทำให้ความหยาบผิวชิ้นงานลดต่ำลง ดังแสดงลักษณะพื้นผิวชิ้นงานสำหรับการเดินตัดแต่ละครั้งในรูปที่ 12 (อ้างอิงตำแหน่งของการถ่ายภาพ (ก), (ข), (ค) และ (ง)) จากรูปที่ 5(ข)



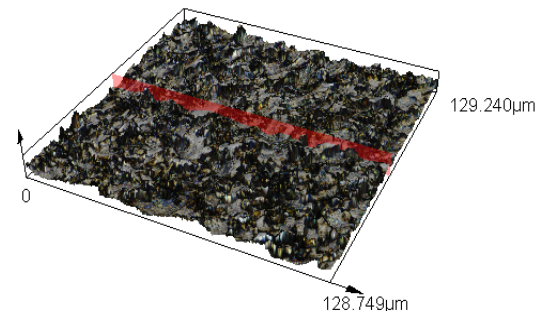
รูปที่ 11 ความหยาบผิวชิ้นงาน ( $R_a$ ) สำหรับการเดินตัดแต่ละครั้ง (Machining path)



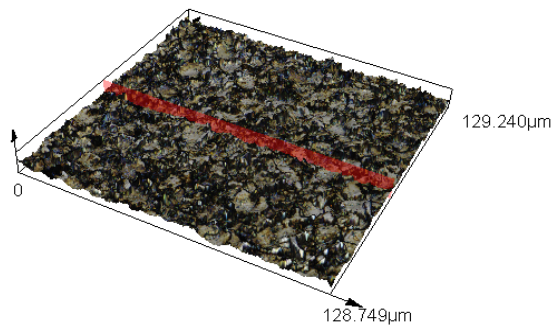
(ก) เดินตัดครั้งที่ 1 ( $R_a = 3.14 \mu m$ ,  $R_z = 19.12 \mu m$ )



(ข) เดินตัดครั้งที่ 2 ( $R_a = 1.97 \mu m$ ,  $R_z = 12.36 \mu m$ )



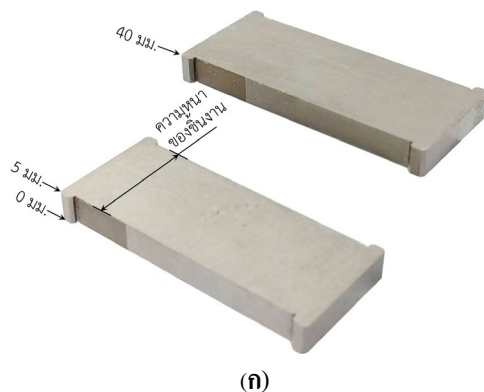
(ค) เดินตัดครั้งที่ 3 ( $R_a = 0.51 \mu m$ ,  $R_z = 3.87 \mu m$ )



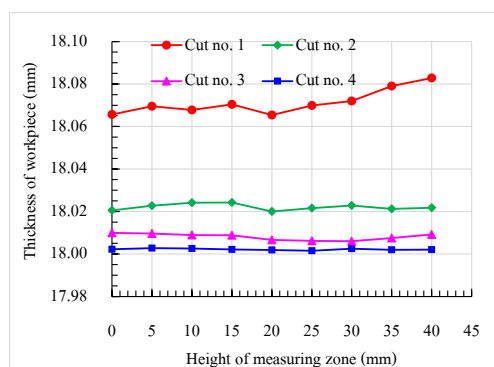
(ง) เติมน้ำครั้งที่ 4 ( $R_a = 0.35 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 2.58 \mu\text{m}$ )

รูปที่ 12 ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานสำหรับการเดินตัดครั้งที่

ในการตรวจสอบขนาดความหนาวัสดุชิ้นงานทดสอบที่มีความหนา 40 มิลลิเมตร ถูกตัดที่ระดับความลึกทุก ๆ 5 มิลลิเมตร ดังแสดงรูปที่ 13(ก) เพื่อวัดขนาดความหนาของชิ้นงานจากการเดินทดลองเดินตัดแบบหลายครั้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ทั้งนี้ผลการวัดขนาดความหนาของชิ้นงานตามระดับความสูงสำหรับการตัดในแต่ละครั้ง ดังแสดงรูปที่ 13(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 13 ขนาดความหนาของชิ้นงานตามระดับความสูงสำหรับการตัดแต่ละครั้ง (ก) ชิ้นงานที่ถูกจัดเตรียมสำหรับการวัดขนาดความหนา (ข) ขนาดของชิ้นงาน

ทั้งนี้ระดับความสูงที่ 0 คือ พื้นผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับโต๊ะงานของเครื่องตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า และระดับความสูง 40 มิลลิเมตรคือพื้นผิวชิ้นงานด้านบน (อ้างอิงระดับความสูงจากรูปที่ 5(ข))

จากผลการทดลองดังรูปที่ 13(ก) เห็นได้ว่าขนาดความหนาของชิ้นงานลดลงเมื่อจำนวนครั้งในการเดินตัดเพิ่มมากขึ้น การลดลงของขนาดชิ้นงานเป็นผลมาจากการปรับลดระยะการชดเชยแนวการเดินของลวดและการควบคุมพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าโดยชิ้นงานมีขนาดเฉลี่ยตลอดความสูงของชิ้นงานสำหรับการตัดในแต่ละครั้งอยู่ที่ 18.0714, 18.0221, 18.0081 และ 18.0022 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อประเมินความคลาดเคลื่อนเชิงมิติตามระดับความสูงของชิ้นงานดังรูปที่ 13(ข) พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการตัดครั้งที่ 1 จะมีความต่างของขนาดชิ้นงานสูงถึง 0.0175 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตาม สำหรับการตัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 ความต่างของขนาดชิ้นงานตลอดระยะความสูงมีค่าความแตกต่างลดลงโดยอยู่ที่ 0.0043, 0.0042 และ 0.0012 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ความแตกต่างทางมิติของขนาดชิ้นงานที่น้อยมากสามารถอธิบายได้จากปริมาณเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ต้องขจัดออกจากการเดินตัดขอบมีน้อยส่งผลให้เส้นลวดอิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอต่ำและมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นลวดน้อยมากทำให้การตัดโลหะด้วยไฟฟ้ามีความเสถียรเป็นอย่างมาก

## 4. อภิปรายผลและสรุป

### 4.1 อภิปราย

การตัดชิ้นงานด้วยกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าโดยใช้ชุดพารามิเตอร์แนะนำสำหรับการเดินตัดแบบหลายครั้ง จำเป็นต้องมีการเผื่อเนื้อวัสดุชิ้นงาน (Wire path shift) และชดเชยระยะการเดินตัดของเส้นลวด (Wire path compensate) ทั้งนี้เพื่อให้การตัดชิ้นงานมีประสิทธิภาพ การเดินตัดครั้งที่ 1 เป็นการเดินตัดแบบเต็มหน้าลวดซึ่งจำเป็นต้องขจัดเนื้อวัสดุชิ้นงานออกในปริมาณมากด้วยชุดพารามิเตอร์ควบคุมทางไฟฟ้าที่มีความรุนแรงของการกัดเซาะทำให้สามารถเดินตัดด้วยความเร็วที่ต่ำและพื้นผิวชิ้นงานจะมีความหยาบพื้นผิวของขนาดชิ้นงานมีมาก ทั้งนี้การเดินตัดครั้งที่ถัดไปเป็นการเดินตัดขอบที่มีการขจัดเนื้อวัสดุชิ้นงานลดลงโดยใช้ชุดพารามิเตอร์

ควบคุมทางไฟฟ้าที่มีการกัดเซาะต่ำทำให้ความเร็วในการเดินตัดเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความหนาผิวเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนเชิงมิติของขนาดชิ้นงานลดลงเนื่องจากเนื้อวัสดุชิ้นงานที่ต้องขจัดออกมีปริมาณน้อยภายใต้สภาวะการกัดกร่อนด้วยพลังงานทางความร้อนที่เกิดจากการใช้ระดับกระแสไฟฟ้าที่ต่ำรวมทั้งการใช้ความเร็วในการป้อนลวดที่สูงขึ้นจะช่วยผลกระทบของการสึกหรอของลวดอิเล็กโทรดที่มีต่อคุณภาพพื้นผิวรอยตัด

#### 4.2 สรุปผลการทดลอง

ประสิทธิภาพการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้าจากการประเมินความเร็วตัดสำหรับการเดินตัดครั้งที่ 1 ซึ่งเป็นการเดินตัดเต็มหน้าลวดจะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำกว่าค่าความคาดหมายอยู่ 18.01 เปอร์เซ็นต์ แต่การเดินตัดขอบสำหรับการตัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าค่าแนะนำอยู่ที่ 104.34, 128.89 และ 4.12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เวลาที่ใช้ในการตัด และปริมาณลวดที่ใช้ รวมทั้งความหนาผิวเฉลี่ยของรอยตัดสำหรับการตัดครั้งที่ 2, 3, และ 4 จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดครั้งที่ 1 คิดเป็น 67.5, 74.3 และ 66.9 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเวลาที่ใช้ในการตัด และ 75, 81 และ 77 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปริมาณลวดที่ใช้ และ 37.5, 83 และ 88 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความหนาผิวเฉลี่ย

การตัดโลหะโดยการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าแบบเดินตัดหลายครั้งโดยใช้ชุดพารามิเตอร์แนะนำทำให้ความหนาผิวเฉลี่ยของพื้นผิวรอยตัดลดลงอยู่ที่ระดับ 3.14, 1.95, 0.51 และ 0.35 ไมโครเมตร เมื่อจำนวนครั้งของการตัดเพิ่มมากขึ้น ตามลำดับ นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนเชิงมิติจะลดต่ำลงด้วยเช่นกัน

ชุดพารามิเตอร์แนะนำของเครื่องจักรช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถปรับตั้งเครื่องจักรให้เหมาะสมกับเงื่อนไขการใช้งาน อย่างไรก็ตามค่าความคาดหวังตามข้อเสนอแนะกับผลลัพธ์จากการทำงานจริงอาจมีความแตกต่างกันเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ การทดลองเพื่อประเมินของความต่างสามารถใช้ในการคาดการณ์ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการทำงานและควบคุมคุณภาพในการตัดวัสดุชิ้นงานโดยกระบวนการตัดโลหะด้วยลวดไฟฟ้า

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] S. K. Chaubey, S. Singh and A. Singh, "Some investigations into machining of AISI D2 tool steel using wire electro discharge machining (WEDM) process," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 11, pp. 24347–24357, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.230.
- [2] K. Jamkamon and P. Kumkoon, "Designing and manufacturing clamping accessory for multi-stage cutting process on the wire electrical discharge machine," *UTK RESEARCH JOURNAL*, vol. 15, no. 2, pp. 95–105, 2022.
- [3] M. E. Asgar and A. K. S. Singholi, "Parameter study and optimization of WEDM process: A Review," *IOP conference series: Materials science and engineering*, vol. 404, no. 1, 2018, Art. no. 012007, doi: 10.1088/1757-899X/404/1/012007.
- [4] K. Jamkamon and S. Chuvaree, "A Study of Electrical Discharge Machining Performance by Applied Rotating Electrode with Dielectric Flushing through the Axis of Electrode," *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 16–30, 2022.
- [5] M. Priyadarshini, C. K. Biswas and A. Behera, "Grey-Taguchi optimization of Wire-EDM parameters for P20 tool steel," in *Proc. 5<sup>th</sup> International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*, Rome, Italy, Feb. 16–19, 2019, pp. 5–8, doi: 10.1145/3314493.331450.
- [6] L. Straka and G. Dittrich, "Influence of tool steel properties on surface quality after electrical discharge machining by wire electrode," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 5, pp. 1617–1632, 2020, doi: 10.1007/s00170-019-04708-9.

- [7] K. Singh, K. Goyal and D. K. Goyal, "Effects of process parameters on material removal rate and surface roughness in WEDM of H-13 Die tool steel," *Advanced Engineering Forum*, vol. 28, pp. 55–66, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/AEF.28.55.
- [8] M. B. Thakor and M. N. Joshi, "Surface Topology Evaluation of P20 Steel by Multipass Cutting Strategy in Wire EDM," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 7, no. 4, pp. 72–76, 2017, doi: 10.9790/9622-0704057276.
- [9] J. T. Huang, Y. S. Liao and W. J. Hsue, "Determination of finish-cutting operation number and machining-parameters setting in wire electrical discharge machining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 87 no.1–3, pp. 69–81, 1999, doi: 10.1016/S0924-0136(98)00334-3.
- [10] R. Chalisgaonkar and J. Kumar, "Multi-response optimization and modeling of trim cut WEDM operation of commercially pure titanium (CPTi) considering multiple user's preferences," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 125–134, 2015, doi: 10.1016/j.jestech.2014.10.006.
- [11] G. Selvakumar, K. G. Thirupathi Kuttalingam and S. Ram Prakash, "Investigation on machining and surface characteristics of AA5083 for cryogenic applications by adopting trim cut in WEDM," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, no. 5, 2018, Art. no. 267, doi: 10.1007/s40430-018-1192-7.
- [12] T. Suresh, K. Jayakumar, G. Selvakumar and S. Ramprakash, "Experimental Investigation on Improvement of Machinability of SS 304 Through Multipass Cutting in WEDM," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 48, pp. 11577–11590, 2023, doi: 10.1007/s13369-022-07508-8.
- [13] T. Jadam, S. Datta and M. Masanta, "Study of surface integrity and machining performance during main/rough cut and trim/finish cut mode of WEDM on Ti-6Al-4V: effects of wire material," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 41, 2019, Art. no. 151, doi: 10.1007/s40430-019-1656-4.
- [14] A. S. Balan and A. Giridharan, "A progress review in wire electrical discharge machining process," *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 4097–4124, 2017, doi: 10.15282/ijame.14.2.2017.1.0330.
- [15] K. Jamkamon, D. Elaganon and S. Piyapan, "A Studying Recommended Parameters (E-Pack) in the Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) on the Machining Performance for Cutting Hot Working Steel SKD 61," in *The Conference of Industrial Engineering Network 2021 (IE Network 2021)*, Songkhla, Thailand, May. 5–7, 2021, pp. 183–188.
- [16] B. Li, S. Zhang, Z. Yan and J. Zhang, "Effect of edge hone radius on chip formation and its microstructural characterization in hard milling of AISI H13 steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, pp. 305–318, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1933-x.
- [17] S. Habib, "Optimization of machining parameters and wire vibration in wire electrical discharge machining process," *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, vol. 3, 2017, Art. no. 3, doi: 10.1186/s40759-017-0017-1.
- [18] G. Zhang, W. Li, Y. Zhang, Y. Huang, Z. Zhang and Z. Chen, "Analysis and reduction of process energy consumption and thermal deformation in a micro-structure wire electrode electric discharge machining thin-wall component" *Journal of Cleaner Production*, vol. 244, 2020, Art. no. 118763, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118763.