รายงานการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง

การศึกษาประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 ด้วยลวดไฟฟ้า

A Study of Performance in WEDM Processes on Tool Steel Material JIS -SKD 11

คณะผู้วิจัย

อาจารย์กมลพงค์ แจ่มกมล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2555

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการศึกษาประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 ด้วยลวดไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา พารามิเตอร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Voltage) ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Cycle) และความถี่ในการสปาร์ค (Frequency) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานจาก โดยประเมินจากความเร็วในการตัด (Cutting speed) และความกว้างของรอยตัด (Kerf) ตลอดจนประเมินคุณภาพงานจากความลาดเอียงของผิววัสดุชิ้นงาน (Slope) ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz) ซึ่งจากการทดลอง พบว่า

ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) ผกผันกับความหนาของวัสดุชิ้นงาน (วัสดุชิ้นงานมีความหนามากขึ้นความเร็วในการตัดจะลดลง) และส่งผลให้ความกว้างรอยตัดลดลงอยู่ในช่วง 345 ถึง 362 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับระดับความหนาของวัสดุชิ้นงาน อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วในการตัด ซึ่งเมื่อความหนาของวัสดุชิ้นงานมากขึ้นจะส่งผลต่อความหยาบผิววัสดุชิ้นงานน้อยมาก

ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Voltage) จากการทดลองพบว่า ความเร็วในการตัดแปรผันตามความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด และความกว้างรอยตัดผกผันกับความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด โดยมีความกว้างรอยตัดอยู่ในช่วง 347 ถึง 352 ไมโครเมตร ในส่วนของคุณภาพผิวงานทั้งความลาดเอียงและความหยาบผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด

ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) เป็นตัวแปรต้นที่เกิดจากการปรับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเปิด กับเวลาปิด จากการทดลอง พบว่า ความเร็วในการตัดแปรผันตามระดับปัจจัยประสิทธิภาพ ระดับปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่ำเหมาะสำหรับการตัดวัสดุบาง และระดับปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงเหมาะสำหรับการตัดวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา นอกจากนี้ระดับปัจจัยประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลกระทบต่อความกว้างรอยตัด ความลาดเอียงของพื้นผิว ตลอดจนความหยาบผิววัสดุชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ความถี่ (Frequency) ในการสปาร์คซึ่งเป็นตัวแปรต้นที่เกิดจากการปรับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเปิด กับเวลาปิด จากการทดลองพบว่า ความเร็วในการตัด ความกว้างรอยตัด ตลอดจนคุณภาพผิวงานในรูปของความลาดเอียง และความหยาบผิวแปรผกผันกับความถี่ของการสปาร์ค กล่าวคือ เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความเร็วในการตัดและผลกระทบอื่นๆ ที่ทำการประเมินผลมีค่าลดลง ทั้งนี้ความถี่ของการสปาร์คต่ำไม่เหมาะสำหรับการตัดวัสดุชิ้นงานที่บางเนื่องจากเกิดการขาดของเส้นลวดอิเล็กโตรด เช่นเดียวกันกับพารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : กัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าไฟฟ้า / เหล็กกล้าแม่พิมพ์ / WEDM / SKD 11

Abstract

The objective of this research is to study fundamental parameter effecting capability of Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) on tool mold steel by applying the JIS standard, too steel SKD 11, thickness of 5,10, 25 and 50 millimeters including Cu-Zn wire with a diameter of 250 micrometers. It depends on variable of parameter cutting speed, open circuit voltage, and frequency of spark. Evaluation of electrical discharge was conducted from cutting speed and kerf throughout Ra or Arithmetical Mean Roughness.

The result was found the cutting speed is decrease when thickness of tool steel SKD11 increase and has effect to kerf is decrease between 345 - 362 μm. The taper of cutting surface is increased flowing with cutting speed.

The Open Voltage have effect to cutting speed. When open voltage increases the cutting speed is increased but kerf of surface cutting are increase between 347-352 μm. The quality of cutting surface are increase flowing with open voltage.

The interval between individual pulses, the pulses interval, can also be change. the ratio of impulse duration to impulse interval corresponds to the duty factor. The result was found the duty factor have effect to the cutting speed. low duty factor was properly for thin workpiece and high duty factor for thick workpiece.

Frequency in electrical discharge machine mean relationship of total on-time and off-time per time units. The result was found. High frequency of spark was suitable for electrical discharge of slight base metal. Low frequency appropriated for electrical discharge of thick base metal. However, high frequency resulted in the decrease of cutting speed, kerf, and Arithmetical Mean Roughness.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำงานวิจัยเรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 ด้วยลวดไฟฟ้า สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการสบับสนุนทางด้านเงินทุนจากงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2555 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ตลอดจนได้รับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์จากสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ทางคณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้อาจเป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรม และผู้ที่สนใจบ้างไม่มากก็น้อย

กมลพงค์ แจ่มกมล
(หัวหน้าโครงการ)
20 กันยนยน 2555

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
ภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	1
1.3 สมมติฐานการศึกษา	1
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กรอบแนวความคิด	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
2.4 สรุป	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	34
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	34
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	34
3.3 สรุป	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	43
4.1 ผลการทดลอง	43
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	51
4.3 สรุป	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	72

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง 73

ภาคผนวก

ก. ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดขณะตัดวัสดุชิ้นงาน 75

ข. อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรด (เปอร์เซ็นต์) 79

ค. ลักษณะการสึกกร่อนบนพื้นผิววัสดุลวดอิเล็กโตรด 84

ตารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติพื้นฐานของลวดตัวนำ	9
2.2	ชนิดของลวดตัวนำแบ่งตามกรรมวิธีการผลิต	10
2.3	ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุชิ้นงานชนิดต่างๆ	11
2.4	ขนาดความหนาของชิ้นงานสัมพันธ์กับขนาดเส้นลวดทองเหลือง	11
2.5	ขนาดลวดที่มีผลต่อการสปาร์คทำให้เกิดเป็นมุมที่มีปลายโค้งมน	12
2.6	การปรับวงจรกำลังต่ำ	14
2.7	การปรับระดับเวลาเปิดตามขนาดความโตของเส้นลวด	14
2.8	ความเร็วในการป้อนลวดตามระดับพารามิเตอร์	17
2.9	ความตึงจากแรงดึงลวดตามระดับพารามิเตอร์	18
2.10	ความตึงจากแรงดึงลวดตามขนาดความโตของเส้นลวด	19
2.11	การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการตัด	27
2.12	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัดแบบหยาบและละเอียด	30
2.13	สภาวะแวดล้อมของการตัด	30
3.1	การกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นในการทดลอง	35
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SDK 11	35
3.3	สมบัติของน้ำกลั่นที่ใช้ในการทดลอง	36
3.4	พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลองปรับปัจจัยประสิทธิภาพการทำงาน	37
3.5	พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลองปรับความถี่ในการสปาร์ค	38
4.1	พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความเร็วในการตัด	43
4.2	พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อกว้างรอยตัด	44
4.3	พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน	44
4.4	พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra	44
4.5	พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz	45
4.6	พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความเร็วในการตัด	45
4.7	พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อกว้างรอยตัด	46
4.8	พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน	46
4.9	พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra	46
4.10	พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz	47
4.11	พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความเร็วในการตัด	47

ตารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.12 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อกว้างรอยตัด 48

4.13 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน 48

4.14 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra 48

4.15 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz 49

4.16 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อความเร็วในการตัด 49

4.17 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อกว้างรอยตัด 50

4.18 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน 50

4.19 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra 50

4.20 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz 51

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กรอบแนวความคิดในการทำวิจัย	4
2.2	ลักษณะและหลักการตัดอาร์คด้วยลวดไฟฟ้า	5
2.3	ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ	6
2.4	การเกิดความกว้างของรอยตัดจากเส้นลวด (Kerf)	7
2.5	การคำนวณการเกิดผนังเอียงของชิ้นงาน	7
2.6	การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)	8
2.7	การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz)	8
2.8	ลักษณะความโค้งมนของมุมและแนวการตัดด้วยลวดไฟฟ้า	12
2.9	ลักษณะความคาดเคลื่อนทางด้านพิกัดรูปทรง	12
2.10	ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน	13
2.11	เวลาเปิดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน	14
2.12	เวลาปิดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน	15
2.13	เวลาอาร์คที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน	15
2.14	เวลาหยุดอาร์คที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน	16
2.15	การขับป้อนความต่างศักย์ที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน	16
2.16	ความคลาดเคลื่อนของอัตราการขับป้อนที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและผิวชิ้นงาน [5]	17
2.17	ความเร็วในการป้อนลวดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน	18
2.18	ความตึงจากแรงดึงลวดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน	19
2.19	การไหลของเหลวที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน	19
2.20	วงจรกำลังในการควบคุมการตัดด้วยลวดไฟฟ้า	20
2.21	รูปคลื่นแบบปกติที่สัมพันธ์กันระหว่างการตัดด้วยลวดไฟฟ้า	20
2.22	ความสัมพันธ์อัตราส่วนแรงดันต่ออัตราการขจัดเนื้องานและพารามิเตอร์ในการแปรรูปที่มีผลความสมบูรณ์ของรูปคลื่น	21
2.23	(a) ลักษณะรูปคลื่นปกติ (Normal), (b) ลักษณะรูปคลื่นผิดปกติ (Abnormal)	22
2.24	อุปกรณ์ในการทดลองโดยใช้โต๊ะการทำงานแบบจำลองที่สร้างจากอะคลิลิค	23
2.25	การกระจายตัวของพื้นที่การสปาร์ค และปริมาณความหนาแน่นของแต่ละส่วน	24
2.26	การเปลี่ยนดัชนีการกระจายของพื้นที่การสปาร์คต่อแรงดันไฟฟ้า (Servo Voltage)	24
2.27	ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อดัชนีการกระจายตัว	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.28	อัตราการกระจายตัวของพื้นที่การสปาร์ค	25
2.29	แสดงการสั่นสะเทือนของเส้นลวดที่ใช้ในการตัด	25
2.30	ความตึงของเส้นลวดที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนและความกว้างของรอยตัด	26
2.31	ความตึงของเส้นลวดที่มีผลต่อความเร็วในการตัด	26
2.32	แสดงวงจรควบคุมกำลังแบบ Full-bridge ของการตัดด้วยลวดไฟฟ้า	27
2.33	กระแสสูงสุดในการตัดที่มีผลต่อการหลอมละลายและเย็นตัวใหม่ (a กระแส 0.7A, b กระแส 1.2A และ c กระแส 2.3A) บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้า SKD 11	27
2.34	ลักษณะพื้นผิวที่ผ่านการปรับปรุงโดยปรับตั้งพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.11	28
2.35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในการตัดด้วยลวดไฟฟ้ากับอัตราการขจัดเนื้องาน	28
2.36	แสดงความสัมพันธ์ของความถี่ในการสปาร์คและความเร็วในการป้อนที่มีผลต่ออัตราขจัดเนื้องาน	29
2.37	การตัดวัสดุชิ้นงานด้วยลวดไฟฟ้า (a) การตัดหยาบ (b) การตัดละเอียด	30
2.38	ระนาบและระยะห่างที่เกิดจากการตัดด้วยลวดไฟฟ้าแบบหยาบ	31
2.39	ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยการสร้างสมการทดถอยแบบอัลกอลิทึม	31
2.40	ลักษณะพื้นผิวที่เกิดจากการตัดแบบหยาบและละเอียด	32
2.41	ลักษณะพื้นผิวและการเกิดชั้นสีขาวที่เกิดจากการหลอมละลายและแข็งตัวใหม่	32
3.1	เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า Arsitech CNC WEDM CW30	34
3.2	ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	36
3.3	แนวการตัดบนวัสดุชิ้นงาน	37
3.4	หน้าจอแสดงการทำงานของเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า ยี่ห้อ Aristech รุ่น CW30	39
3.5	การวัดความกว้างรอยตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์	39
3.6	ตำแหน่งการวัดความกว้างรอยตัด	40
3.7	เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น PS1	41
3.8	ลักษณะการรายงานค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจากการวัดด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น PS1 Cut off 5 x 0.8 มิลลิเมตร	41
4.1	ความสามารถในการแปรรูปจากการปรับพารามิเตอร์ความในการตัด	52
4.2	ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความกว้างรอยตัด	52
4.3	ความกว้างรอยตัดบนวัสดุชิ้นงาน	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน	54
4.5	ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra	54
4.6	ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Rz	54
4.7	แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ความเร็วตัด 1 มม./นาที ความหนา 25 มิลลิเมตร	55
4.8	แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ความเร็วตัด 3 มม./นาที ความหนา 25 มิลลิเมตร	55
4.9	แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ความเร็วตัด 5 มม./นาที ความหนา 25 มิลลิเมตร	55
4.10	ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดอาร์คด้วยลวดไฟฟ้าที่ ความเร็วในการตัดต่างกัน	56
4.11	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความเร็วในการตัด	57
4.12	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความกว้างรอยตัด	57
4.13	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน	58
4.14	ลักษณะความกว้างรอยตัดด้านบนกับด้านล่างที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดต่างกัน	58
4.15	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra	59
4.16	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz	59
4.17	แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 70 โวลต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร	60
4.18	แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 85 โวลต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร	60
4.19	แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 90 โวลต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร	60
4.20	ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดอาร์คด้วยลวดไฟฟ้า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดต่างกัน	60
4.20	ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดอาร์คด้วยลวดไฟฟ้า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดต่างกัน (ต่อ)	61
4.21	ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความเร็วในการตัด	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ลักษณะการขาดของเส้นลวดจากการปรับเวลาเปิด 5 ไมโครวินาที ตัดวัสดุชิ้นงานหนา 5 มิลลิเมตร	62
4.23 ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความกว้างรอยตัด	63
4.24 ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน	63
4.25 ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra	64
4.26 ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz	64
4.27 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ปัจจัยประสิทธิภาพ 29 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร	64
4.28 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ปัจจัยประสิทธิภาพ 43 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร	65
4.29 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ปัจจัยประสิทธิภาพ 57 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร	65
4.30 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความเร็วในการตัด	66
4.31 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความกว้างรอยตัด	66
4.32 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน	67
4.33 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra	67
4.34 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz	68
4.35 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ความถี่ของการสปาร์ค 62,500 ครั้งต่อวินาที ความหนา 25 มิลลิเมตร	68
4.36 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ความถี่ของการสปาร์ค 63,333 ครั้งต่อวินาที ความหนา 25 มิลลิเมตร	68
4.37 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน ความถี่ของการสปาร์ค 125,000 ครั้งต่อวินาที ความหนา 25 มิลลิเมตร	68

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการคิดค้นและพัฒนาความสามารถของเครื่องจักรเพื่อตอบสนองความต้องการของตลาด โดยการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ เทคโนโลยีการตัดอาร์กด้วยเส้นลวดไฟฟ้า [1] (WEDM :Wire Electrical Discharge Machine) ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ตัด เนื่องจากชิ้นส่วนแม่พิมพ์เป็นวัสดุที่ยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล [2] หลักการทำงานของการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าจะอาศัยความร้อนที่เกิดจากการอาร์กของเส้นลวด กับวัสดุชิ้นงานโดยที่ผิววัสดุชิ้นงาน และผิววัสดุเส้นลวดอิเล็กโตรดตัวนำไม่สัมผัสกัน จนเกิดเป็นความร้อนที่เพียงพอต่อการหลอมละลายวัสดุชิ้นงานออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กภายใต้การปกคลุมของสารเหลวกึ่งตัวนำที่เรียกว่า สารไดอิเล็กตริก (Dielectric) คอยทำหน้าที่ระบายความร้อนและขจัดเศษ ตลอดจนรักษาความเสถียรในการอาร์ก ทั้งนี้ความรุนแรงที่เกิดจากการ อาร์กจะปรากฏเป็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำตลอดจนความเที่ยงตรงทางด้านรูปทรงของวัสดุชิ้นงาน ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการในตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น SKD 11 เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการแปรรูปโดยการประเมินค่าความเร็วในการตัดและความกว้างรอยตัด ตลอดจนผลกระทบของคุณภาพชิ้นงานจากความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน และความหยาบผิวงาน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการชดเชยขนาดและแนวการตัดให้ได้ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรง และความแม่นยำที่สูง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

การศึกษาประสิทธิภาพจากกระบวนการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 โดยการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า โดยประเมินประสิทธิภาพการแปรรูปจากความเร็วตัด (Cutting Speed) และการเกิดความกว้างของรอยตัด (Kerf) ตลอดจนวัดคุณภาพของชิ้นงาน จากความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Ry) รวมทั้งความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน (Slope) เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของแต่ละพาราที่มีผลต่อความสามารถในการตัดวัสดุชิ้นงานสำหรับใช้เป็นแนวทางในการชดเชยแนวการตัดให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

1.3 สมติฐานการวิจัย

การแปรรูปด้วยกระบวนการที่อาศัยความร้อนจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการกัดกร่อนถึง

แม้ว่าความสามารถในการแปรรูปจะต่ำกว่ากระบวนการทางกล แต่มีลักษณะเด่นคือสามารถแปรรูปวัสดุที่มีความแข็งสูงซึ่งยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล ความสามารถในการแปรรูปที่ต่ำทำให้ในการปฏิบัติงานต้องทำการปรับพารามิเตอร์เพื่อควบคุมการทำงานให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ทั้งนี้พารามิเตอร์ที่ทำการปรับตั้งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแปรรูป และคุณภาพผิววัสดุชิ้นงานในระดับที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่จัดเป็นตัวแปรต้นอันประกอบด้วย ระดับความเร็วในการตัด ความต่างศักย์วงจรเปิด ปัจจัยประสิทธิภาพ และความถี่ของการสปาร์ค ที่อาจส่งผลต่อตัวแปรตาม ซึ่งประเมินได้จาก ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) ความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ทำการตัด (Slope) ความกว้างของรอยตัดที่เกิดจากการกัดกร่อน (Kerf) ตลอดจนวัดคุณภาพของชิ้นงาน จากความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz) ที่แปรเปลี่ยนตามค่าระดับค่าพารามิเตอร์

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.1 วัสดุลวดอิเล็กโตรดที่ใช้เป็นทองเหลือง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 250 ไมโครเมตร

1.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการตัดด้วยลวดไฟฟ้าประกอบด้วย

1. ความเร็วในการตัด (Cutting speed) คือความเร็วสูงสุดที่ปรับตั้งไว้ขณะทำการอาร์ก
2. ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Voltage) คือความต่างศักย์วงจรเปิดขณะทำการอาร์ก
3. ปัจจัยประสิทธิภาพของการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) คือร้อยละของเวลาการปล่อยกระแสในหนึ่งวัฏจักรการทำงาน (เปอร์เซ็นต์)
4. ความถี่ (Frequency) คือจำนวนวัฏจักรการทำงานต่อหน่วยเวลา (ครั้งต่อวินาที)

1.4.3 ประสิทธิภาพการทำงานประเมินจาก

1. ความเร็วในการตัด (Cutting speed) คือ ความเร็วในการตัดที่เกิดขึ้นจริงคิดจากระยะทางในการตัดต่อหน่วยเวลาที่ใช้ (มิลลิเมตร/นาที)
2. ความกว้างของรอยตัด (Kerf) คือความกว้างของรอยตัดที่เกิดจากการอาร์กด้วยลวดที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการสปาร์ค (ไมโครเมตร)

1.4.4 คุณภาพงานประเมินได้จาก

1. ความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน (Slope)
2. ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical mean roughness)
3. ความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz : Ten-point mean roughness)

1.4.5 สารไดอิเล็คตริกที่ใช้เป็นน้ำกลั่น (Di- Ionize)

1.4.6 ชิ้นงานทดลองเป็นเหล็กกล้า SKD 11 ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็ง

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาความเป็นไปได้โดยการทดลองช่วงค่าพารามิเตอร์ที่สามารถตัดชิ้นงานได้

1.5.2 ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัดวัสดุชิ้นงาน

1.5.3 ทำการทดลองเพื่อเก็บค่าคุณภาพผิวงานและประสิทธิภาพการแปรรูปจาก

1. ความเร็วในการตัด (Cutting speed)
2. ความกว้างของรอยตัด (Kerf)
3. ความลาดเอียงของผนังชิ้นงาน (Taper)
4. ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical mean roughness)
5. ความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz : Ten-point mean roughness)

1.5.4 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตัดและคุณภาพผิวงาน

1.5.5 สรุปผลงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

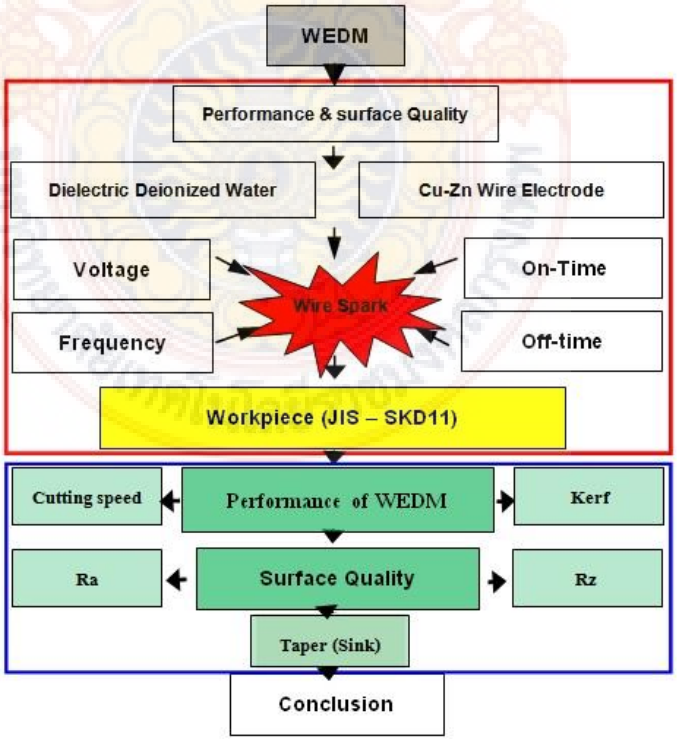
ประโยชน์จากงานวิจัยเบื้องต้นจะช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นส่วนงานอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าวัสดุชิ้นงานต่างๆ ซึ่งสามารถจำแนกผลสำเร็จของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับดังนี้

1. ทราบถึงประสิทธิภาพการแปรรูปของกระบวนการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า และใช้ข้อมูลจากการวิจัยเป็นแนวทางการสนับสนุนในการตัดสินใจเลือกกระบวนการแปรูปชิ้นงาน
2. เป็นทางเลือกใหม่ให้กับผู้ผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมแม่พิมพ์และเพิ่มศักยภาพในการผลิต
3. ส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตด้วยการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าให้มีการพัฒนามากยิ่งขึ้น
4. เพิ่มความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมที่มีคุณภาพ
5. สามารถใช้ข้อมูลจากการวิจัยเป็นแนวทางในการปรับปรุงการตัดอาร์กวัสดุต่างๆ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กรอบแนวความคิด

กรอบแนวความคิดของงานวิจัยการศึกษาประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 โดยการตัดด้วยลวดไฟฟ้าเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการแปรรูปวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้างานเย็นสำหรับผลิตวัสดุแม่พิมพ์ตัดโลหะ โดยมีตัวแปรต้นประกอบด้วย ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Voltage) ความถี่ในการสปาร์ค (Frequency) และปัจจัยประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) เพื่อทำการศึกษาถึงอิทธิพลที่มีผลต่อตัวแปรตาม ซึ่งในที่นี้คือประสิทธิภาพการแปรรูปโดยประเมินจาก ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) ความกว้างของรอยตัด (Kerf) และความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน (Slope) ตลอดจนคุณภาพผิวงานจากค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical mean roughness) และความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Rz : Ten-point mean roughness) โดยพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่มีคุณภาพหมายถึงมีความหยาบผิวต่ำ และเกิดการลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานน้อย ส่วนประสิทธิภาพการทำงานที่ดีหมายถึง ความเร็วในการตัดที่สูงโดยไม่เกิดการขาดของเส้นลวดขณะทำการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 กรอบแนวความคิดในการทำวิจัย

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า (WEDM : Wire Electrical Discharge Machining)

การตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าเป็นรูปแบบของการแปรรูปวัสดุชิ้นงาน โดยอาศัยการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าให้เกิดความร้อนจากการอาร์กผ่านช่องว่างระหว่างผิววัสดุชิ้นงาน กับผิววัสดุเส้นลวดตัวนำโดยมีของเหลวกึ่งตัวนำขวางกั้น ซึ่งเรียกว่า สารไดอิเล็กตริก (Dielectric Fluid) ที่คอยทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นเพื่อให้เกิดความเสถียรของการอาร์กจากวงจรไฟฟ้ากำลังอาจเป็นไฟฟ้ากระแสตรง หรือกระแสสลับที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกันสองวงจร คือวงจรไฟฟ้ากำลังต่ำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตลอดเวลาเพื่อรักษาระยะห่างระหว่างผิวงานกับผิวเส้นลวด และวงจรไฟฟ้ากำลังสูงที่ทำให้เกิดความร้อนจากการถ่ายเทของประจุ โดยแบ่งออกเป็นเวลาเปิด (On Time) หมายถึง ช่วงระยะเวลาการไหลของกระแสไฟฟ้า และเวลาปิด (Off-Time) หมายถึง ระยะเวลาการหยุดไหลของกระแสไฟฟ้าสลับกันเป็นวัฏจักรการอาร์กที่มีความถี่สูง จนเกิดความร้อนที่เพียงพอต่อการหลอมละลายวัสดุชิ้นงาน และขจัดออกอย่างฉับพลันในรูปของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ด้วยสารไดอิเล็กตริก ลักษณะและหลักการปล่อยกระแสไฟฟ้าในการตัดจะคล้ายกับการกัดอาร์กด้วยไฟฟ้า (EDM : Electrical Discharge Machining) เนื่องจากเป็นเครื่องจักรที่ได้พัฒนามาจากพื้นฐานเดียวกัน แต่มีข้อแตกต่างตรงที่การตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าใช้เส้นลวดเป็นวัสดุอิเล็กโตรดตัดทะลุผ่านวัสดุชิ้นงาน โดยมีระบบขับป้อนเพื่อรักษาระยะห่างของวัสดุชิ้นงาน กับวัสดุเส้นลวดอิเล็กโตรดให้คงที่ ดังแสดงลักษณะหลักการทำงานในรูปที่ 2.2 ทั้งนี้เส้นลวดที่ผ่านการอาร์กนั้นไม่สามารถงานซ้ำได้อีก เนื่องจากในกระบวนการกัดกร่อนทำให้เกิดการสึกหรอทั้งวัสดุชิ้นงานและวัสดุเส้นลวดตัวนำ

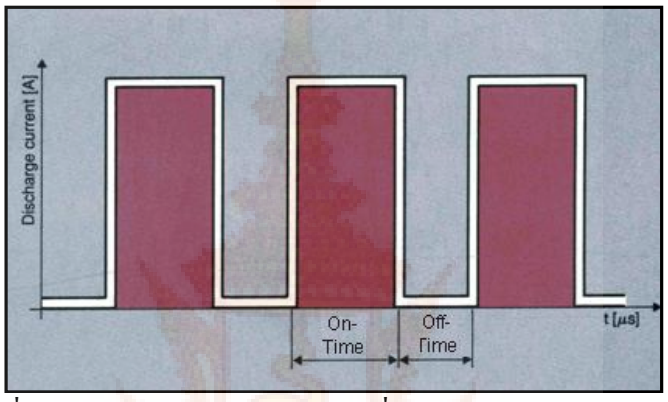
รูปที่ 2.2 ลักษณะและหลักการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า

หลักการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าจะอาศัยการกัดกร่อนที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาเปิด (On-Time) กับเวลาหยุดจ่ายประจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าเวลาปิด (Off-Time) เป็นวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยปัจจัยประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) [2] ของการสปาร์คเท่ากับเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักร (Total Cycle Time = On-Time + Off-time) ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\text{Duty Cycle} = \left(\frac{\text{On - Time}}{\text{Total Cycle Time}}\right) \text{x } 100(\%) \quad (2.1)$$

ความถี่ของการอาร์กเป็นผลที่เกิดมาจากการปรับระยะเวลาเปิด และเวลาปิดที่มีความสัมพันธ์โดยคำนวณจากจำนวนวัฏจักรการอาร์กที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลา (Sec) ดังสมการที่ 2.2 [2] ทั้งนี้ความถี่นี้จะส่งผลโดยตรงต่อความหยาบผิวชิ้นงานและความเร็วในการตัด ตลอดจนความแม่นยำและความเที่ยงตรง สำหรับกระบวนการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า (Total Cycle Time = On-time + Off-time)

$$\text{Frequency} = \frac{1}{\text{Total Cycle Time}} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.3 ช่วงระยะเวลาเปิด และปิดเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุ [2]

2.2.2 การวัดประสิทธิภาพการทำงานในกระบวนการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า (Measuring of Performance in WEDM)

กระบวนการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าเป็นกระบวนการการกัดกร่อนเพื่อให้เกิดการแปรรูปวัสดุชิ้นงาน ซึ่งในขณะอาร์กลวดอิเล็กโตรดจะเกิดการสึกหรอด้วยเช่นกัน ซึ่งลักษณะของการสึกหรอในการแปรรูป สามารถประเมินประสิทธิภาพการทำงานได้จากความเร็วในการตัด และความกว้างของรอยตัด ตลอดจนคุณภาพผิวงาน (Surface Quality) ความลาดเอียงของพื้นผิว (Slope) และความหยาบผิว ซึ่งในที่นี้จะวัดความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical Mean Roughness) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz : Ten-point mean roughness) โดยมีวิธีการประเมินค่าประสิทธิภาพการแปรรูปของกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าดังนี้

1. ความเร็วในการตัด (Cutting speed)

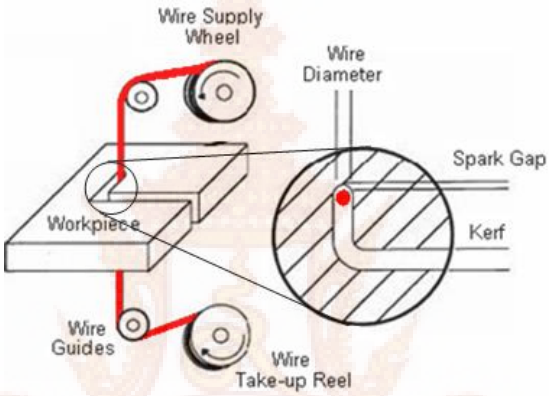
ความเร็วในการตัด (Cutting speed) เครื่องจักรกลทั่วไปที่อาศัยสมบัติทางกลของวัสดุคมตัด และการเคลื่อนที่เพื่อให้เกิดการตัดเฉือนที่เรียกว่าอัตราป้อน (Feed Rate) จะมีความเร็วมากกว่าการตัดด้วยลวดไฟฟ้าเนื่องจากเป็นการอาศัยการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้า ทำให้ชิ้นงานออก

จากกันตามแนวการเดินของเส้นลวดเป็นสองส่วน ความเร็วตัดประเมินจากความยาวที่ตัดต่อระยะเวลาที่ใช้ ดังสมการที่ 2.3

$$\text{ความเร็วในการตัด (Cutting speed)} = \frac{\text{ความยาวที่ตัด(mm)}}{\text{เวลาที่ใช้ (min)}} \quad (2.3)$$

2. ความกว้างของรอยตัด (Kerf)

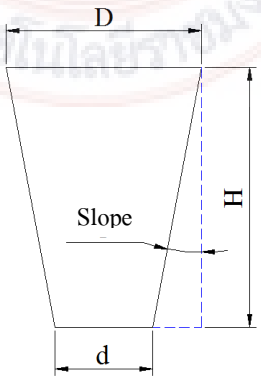
ความกว้างของรอยตัด (Kerf) จากการกัดกร่อนด้วยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างเส้นลวดกับชิ้นงานเพื่อทำให้เกิดการแปรรูปจะมีลักษณะรอยการตัดที่เกิดจากเส้นลวดคล้ายกับรอยตัดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเลื่อย คือความกว้างของรอยตัดมากกว่าความโตของเส้นลวดอิเล็กโตรดดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดความกว้างของรอยตัดจากเส้นลวด (Kerf) [3]

3. ความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน (Slope)

ความลาดเอียงของพื้นผิวชิ้นงานเป็นการประเมินค่าความต่างของแนวการตัดกับพื้นผิวผนังวัสดุชิ้นงานที่ถูกออกที่เกิดจากการสึกกร่อนของเส้นลวดที่เกิดขึ้นขณะทำการตัด ในรูปของความลาดเอียงของพื้นผิวที่ถูกตัดเฉือน ซึ่งวัดค่าออกมาเป็นของมุมที่ลาด ดังแสดงในสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.5 การคำนวณการเกิดผนังเอียงของชิ้นงาน

$$\text{Slope } (^{o}) = \tan^{(-1)}[(D-d)/2)/H] \quad (2.4)$$

เมื่อ D คือขนาดความกว้างของรอยตัดด้านบน

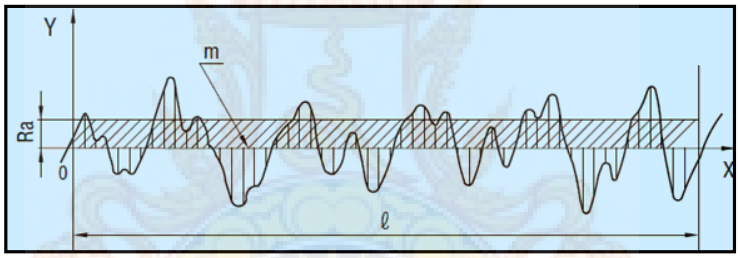
d คือขนาดความกว้างของรอยตัดด้านล่าง

H คือความหนาของวัสดุชิ้นงานที่ทำการตัด

4. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical Mean Roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหมายถึง ค่าเฉลี่ยของลักษณะพื้นผิว (Profile) จากการคำนวนพื้นที่ระหว่างจุดยอด (Peak) และจุดก้นแอ่ง (Volley) จากเส้นกึ่งกลาง (Mean) แล้วนำค่าที่ระยะห่างจากเส้นกึ่งกลางด้านบนมาหักล้างกับค่าที่ห่างจากเส้นกึ่งกลางลงด้านล่างซึ่งได้เป็นพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และสามารถเขียนสมการในการคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5 ในทางปฏิบัติแล้วจะใช้เครื่องมือวัดความหยาบผิวที่มีหัวเข็มขนาดเล็กลากเพื่อคำนวณและแสดงลักษณะพื้นผิว

$$Ra = \frac{1}{\ell}\int_0^{\ell} |f(x)|\,dx \quad (2.5)$$

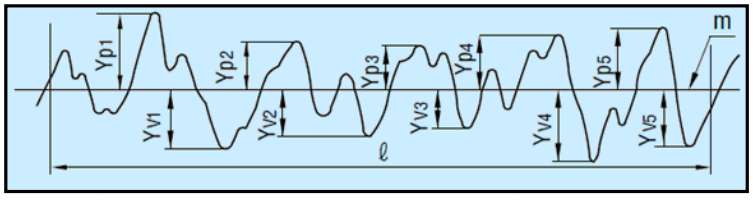


รูปที่ 2.6 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) [4]

5. ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz : Ten-point mean roughness)

ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด หมายถึงค่าความต่างเฉลี่ยสูงสุด (Peak) จากเส้นกึ่งกลางทางด้านบน 5 ตำแหน่ง และส่วนต่างจากจุดต่ำสุด (Volley) ถึงเส้นกึ่งกลาง 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.7 [3]โดยคำนวนค่า Rz จากสมการที่ 2.6

$$Rz = \frac{(Yp_1 + Yp_2 + Yp_3 + Yp_4 + Yp_5) + (Yv_1 + Yv_2 + Yv_3 + Yv_4 + Yv_5}{5} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.7 การคำนวณค่าความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz) [4]

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า [5]

1. เส้นลวดอิเล็กโตรดตัวนำ (Wire Cutting)

การตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้ามีความสำคัญและเป็นที่ต้องการเนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่ให้คุณภาพผิว และขนาดความแม่นยำสูง ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล เนื่องจากเป็นการแปรรูปโดยอาศัยการกัดกร่อนจากกระแสไฟฟ้า และใช้เส้นลวดเป็นวัสดุเครื่องมือ ตัดชิ้นงานอย่างช้าๆ ด้วยลวดอิเล็กโตรดทองเหลือง หรือทองแดง ต่อมาได้มีการเปลี่ยนเป็นเส้นลวดเคลือบสังกะสีเนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการแปรรูปที่ดีกว่า และในปี 1990 ได้มีการปรับปรุงกระบวนการตัดให้มีการปรับค่าที่หลากหลาย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น ทั้งนี้เส้นลวดอิเล็กโตรดที่ใช้ในการตัดจะมีสมบัติที่สำคัญอันประกอบด้วย

1.1 สมบัติทางไฟฟ้า (Property of Electrical)

เส้นลวดจะต้องมีสมบัติที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้โดยมีเฉลี่ย 45A โดยไม่เกิดผลกระทบใดๆ ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้า

1.2 สมบัติทางกล (Property of Mechanism)

สมบัติทางกลที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุเส้นลวดที่ใช้ในการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า คือความสามารถในการต้านทานแรงดึง (Ultimate Tensile Strength : UTS) ในการผลิตเส้นลวดเป็นการอัดดึงขึ้นรูปซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้หน่วยของความต้านทานแรงดึงจะวัดเป็นพื้นที่หน้าตัดต่อหน่วยแรง โดยทั่วไปแล้วลวดที่ใช้ในการตัดจะมีสมบัติพื้นฐานดังแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติพื้นฐานของลวดตัวนำ [5]

Wire Type	UTS kg/mm ^{2}	Conduct Rate (%)	Elongation Rate (%)
Hard Copper	35-45	96-98	0.3-5.0
Soft Copper	25-30	100-102	20-40
70 : 30 Brass (Hard)	100.00	23.00	1.66
70 : 30 Brass (Moderate)	47.00	29.40	27.80
Tungsten	350.0	18.00	---

1.3 สมบัติทางด้านฟิสิกส์ (Physical)

สมบัติทางด้านฟิสิกส์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปของการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า คือ อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุชิ้นงาน (Melting Point) เกิดจากการอาร์กอย่างต่อเนื่องจนเกิดการหลอมละลาย และสึกกร่อนทั้งวัสดุชิ้นงานและวัสดุเส้นลวดอิเล็กโตรด โดยอัตราการสึกกร่อน

ของเส้นลวดจะลดต่ำลงเมื่อจุดหลอมเหลวของเส้นลวดสูงขึ้น เส้นลวดสำหรับการตัดด้วยลวดไฟฟ้าที่มีขายตามท้องตลาดสามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 ชนิดของลวดตัวนำแบ่งตามกรรมวิธีการผลิต [5]

Materials (Wire)	Composition	Cost	Application	Process Method
Copper	Copper	Low	Seldom	Extrusion
Coated	Copper + Zinc	Low	General	Extrusion
Coated	Copper + Zinc	Mid	Large Taper	Coated by Zinc
Coated	Copper + Tin	Mid	Large Thickness	Coated by Tin
Coated	Copper + Silver	Mid-High	Faster Cutting	Coated by Silver
Coated	Copper + Mag	High	Large Thickness Graphite Cutting Aluminum Cutting	Coated by Mag
Compound	Copper + Zinc	High	Ultra Fast Cutting Large Taper	Mix up Copper and Zinc
Steel-Core	Steel + Copper + Zinc	High	Ultra Fast Cutting Large Thickness Micro Machining	Steel Core Coated by Mixed Copper and Zinc

2. สารไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า (Dielectric used in Wire EDM)

สารไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการตัดด้วยลวดไฟฟ้าเป็นของเหลวตัวกลางที่ใช้กั้นระหว่างเส้นลวดกับวัสดุชิ้นงาน เพื่อให้เกิดเป็นช่องว่างในการถ่ายเทของประจุสลับกับการหยุดถ่ายเทประจุ (Discharge Current) จนกลายเป็นวัฏจักรการอาร์กที่มีความถี่สูง (High Frequency) ดังนั้นสารไดอิเล็กตริกที่ดีต้องมีสภาวะเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความเสถียรสูง โดยในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้น้ำกลั่นและสารไฮโดรคาร์บอน (Oil) แต่สำหรับเครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า Aristech ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ใช้กับน้ำกลั่น (Deionized Water) เนื่องจากมีค่าความหนืดที่ต่ำ และสามารถควบคุมการระบายความร้อนและการไหลตัวได้ง่ายกว่าน้ำมัน จึงทำให้สามารถขจัดเศษโลหะที่หลอมเหลวออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ทั้งนี้ความต้านทานของสารไดอิเล็กตริกยังมีผลต่อความสามารถในการรักษาระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับวัสดุชิ้นงาน โดยค่าความต้านทานหรือความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Conductivity) ที่เหมาะสมต่อการตัดชนิดของวัสดุแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 โดยต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของสารไดอิ

เล็กตริก 20 องศาเซลเซียล การตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้ามีเส้นลวดหลายขนาดซึ่งจะพิจารณาเลือกใช้จากความหนาของวัสดุชิ้นงาน ในกรณีที่เป็นลวดทองเหลืองสามารถตัดขนาดชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นลวด ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุชิ้นงานชนิดต่างๆ [5]

Workpiece	Conductivity (kΩ/cm)	Remark
SS,S45C,SK3,NAK55	40-60	NAH is not easy to have a petty on the phase.
SKS3,SKD61,SUS304	40-30	-----
SKH9	40-60	-----
Cu,Bs	10-20	For preventing electric eclipse and raising specific resistance.
Al	<10	Easy to cause and cause wire broken.
Ag-W, Gu-W	<10	-----
Gr	40-50	There are big difference of machining depending on graphite class.
Wc	8-15	The specific resistance is low when machining with high speed, it will cause the melted Cobalt, And then it should be make again.
	<4	If the specific resistance is high, it will attach MO Wire for preventing electrode attached

ตารางที่ 2.4 ขนาดความหนาของชิ้นงานสัมพันธ์กับขนาดเส้นลวดทองเหลือง [5]

Wire diameter (mm)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
Thickness (mm)	<30	<50	<80	<300	<500

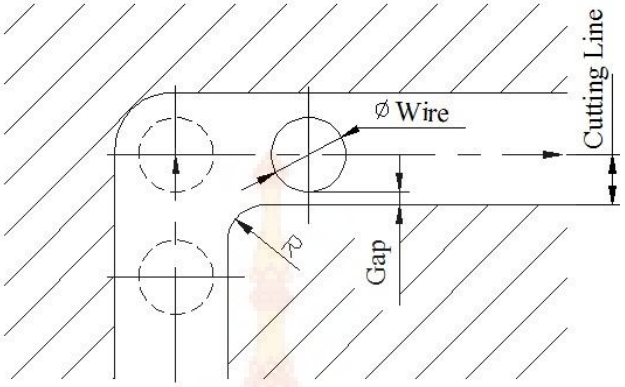
3. อิทธิพลของเส้นลวดที่มีผลต่อการตัด (Effective of Wire for Machining)

3.1 ขนาดความโตของเส้นลวด (Dimension of Wire)

ขนาดเส้นลวดมีอิทธิพลต่อความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า เมื่อลวดอิเล็กโตรดเคลื่อนที่ตัดเป็นมุมจะทำให้เกิดการกระจายของพื้นที่การอาร์กบริเวณขอบมุมของชิ้นงานซึ่งมีลักษณะโค้งมนดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยประมาณรัศมีความโค้งตามขนาดของเส้นลวดดังแสดงในตารางที่ 2.5 ทั้งนี้ขนาดของเส้นลวดและระยะช่องว่างของการสปาร์คยังมีผล

ต่อความเที่ยงตรงและความแม่นยำของขนาดชิ้นงานโดยสามารถคำนวณระยะการเดินของเส้นลวดจากสมการที่ 2.7

$$\text{Cutting Line} = (\text{Wire Diameter}/2) + \text{Sparking gab} \quad (2.7)$$



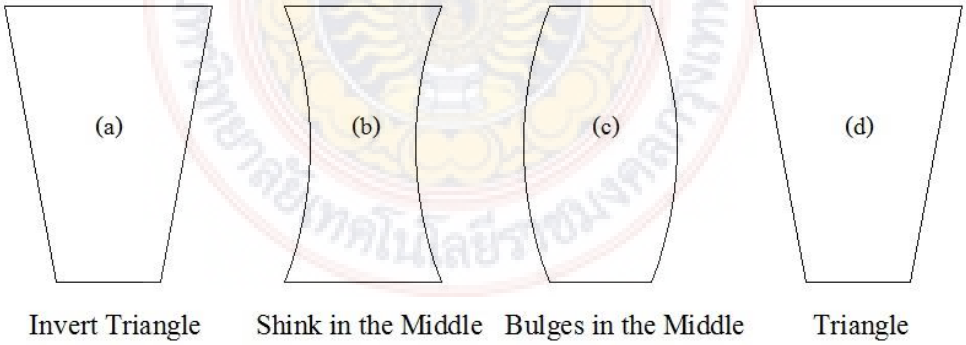
รูปที่ 2.8 ลักษณะความโค้งมนของมุมและแนวการตัดด้วยลวดไฟฟ้า [5]

ตารางที่ 2.5 ขนาดลวดที่มีผลต่อการสปาร์คทำให้เกิดเป็นมุมที่มีปลายโค้งมน [5]

Wire diameter (mm)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
R angle (mm)	0.15-1.00	0.20-1.00	0.30-1.00	0.40-1.00	0.05-1.00

3.2 ความคลาดเคลื่อนทางด้านพิกัดรูปทรง (GD&T)

ความคลาดเคลื่อนทางด้านพิกัดรูปทรงสำหรับกรณีที่ทำการตัดชิ้นงานแล้วปรากฏลักษณะความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะความความเคลื่อนทางด้านพิกัดรูปทรง [5]

(a) มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีด้านล่างเล็กกว่าด้านบน (Invert Triangle) เกิดจากแกน Z สูงจากชิ้นงานมากเกินไป ให้ปรับแกน *Z* ลงมาให้ใกล้กับชิ้นงาน และเพิ่มเวลาปิด (On-time) และเวลาหยุดอาร์ก (Arc-off)

(b) มีลักษณะเป็นโค้งเว้าตรงกึ่งกลาง (Sink in the Middle) เกิดจากความเร็วในการขับป้อน (SV) และความเร็วในการป้อนตัด (FR) ให้ลดความเร็วในการขับป้อนและเพิ่มความเร็วในการตัด

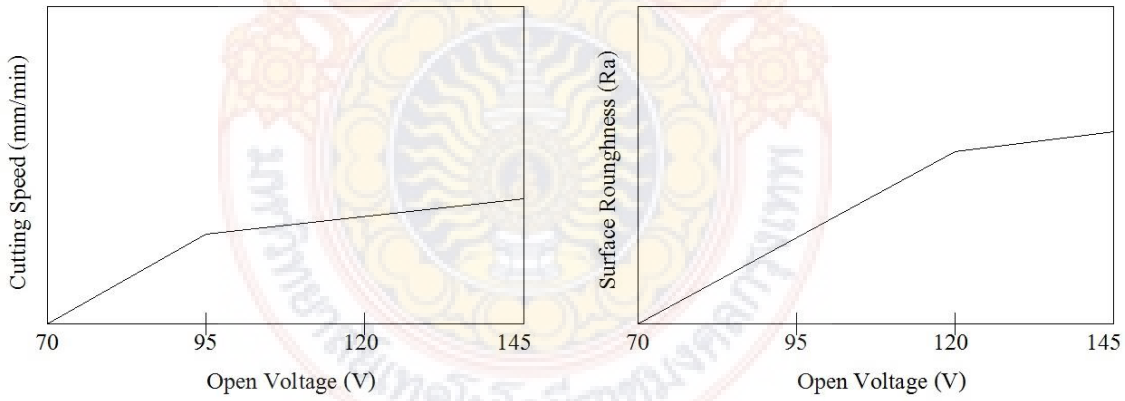
(c) มีลักษณะเป็นโค้งนูนตรงกึ่งกลาง (Bulges in the Middle) เกิดจากความเร็วในการขับป้อน (SV) และความเร็วในการป้อนตัด (FR) เพิ่มความเร็วการขับป้อนและลดความเร็วในการป้อนตัด

(d) มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูที่ด้านบนโตกว่าด้านล่าง (Triangle) เกิดจากแกน Z ใกล้ชิ้นงานมากเกินไป ให้ยกแกน Z ขึ้น และทำการเพิ่มความเร็วในการขับป้อน (SV) และลดความเร็วในการป้อนตัด (FR)

4. การปรับพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวเฉลี่ยจากการตัดด้วยลวดไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Aristech Wire-EDM

4.1 ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Voltage : OV)

ความต่างศักย์วงจรเปิดเป็นการปรับช่วงของแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ระดับ 0 ถึงระดับ 15 โดยที่ระดับ 0 มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 75 โวลต์ ไล่ขึ้นไปจนถึงระดับ 15 จะมีความต่างศักย์ 145 โวลต์ (แต่ละระดับห่างกัน 5 โวลต์) โดยพื้นฐานจะปรับความต่างศักย์คงที่อยู่ในช่วง 90-95 โวลต์ และอาจปรับตั้งระดับความต่างศักย์ที่แปรผันตามขนาดความหนาของโดยชิ้นงาน 1-10 มิลลิเมตร ใช้แรงดันระดับ 0 (70V) , 10-20 มิลลิเมตรใช้แรงดันระดับ 2 (80V) และ 30 – 50 มิลลิเมตรใช้ระดับ 3-5 (85-95V) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุชิ้นงานและลวดที่ใช้ในการตัดด้วย โดยความต่างศักย์ของวงจรมีผลต่อความเร็วในการตัด และความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน [5]

4.2 วงจรกำลังต่ำ (Low Power : LP)

หลักในการตัดด้วยลวดไฟฟ้านั้นจะเป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้า (Discharge Current) โดยอาศัยหลักการของวงจรกำลังที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งแบ่งเป็นวงจรกำลังต่ำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา และวงจรกำลังสูงซึ่งเกิดจากการ

ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เกิดความรุนแรงของการสปาร์ค ทั้งนี้วงจรกำลังต่ำได้จัดช่วงออกเป็น 30 ระดับ ซึ่งแต่ละระดับจะมีค่าและลักษณะกระแสที่ต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการตัด ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 2.6 การปรับวงจรกำลังต่ำ [5]

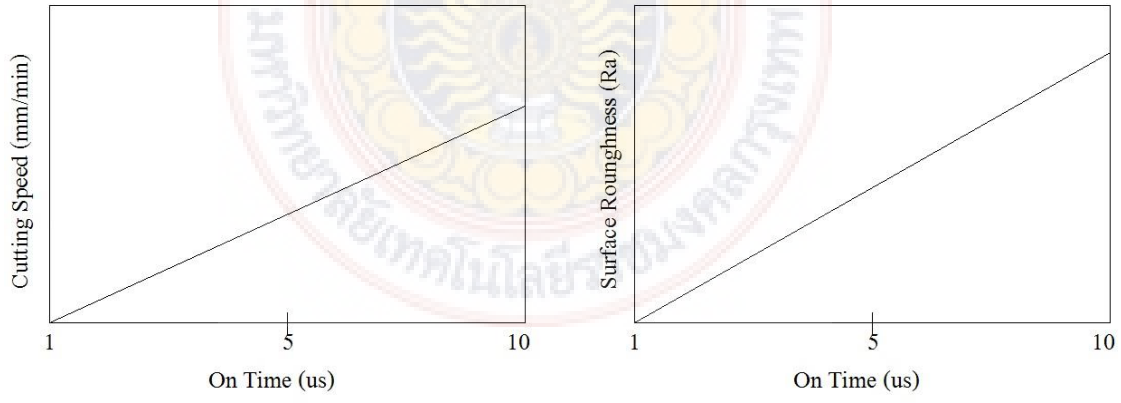
LP = 0	DC Rough Cutting	LP = 10	AC Rough Cutting
LP = 1	DC Spark Alignment	LP = 11	AC Spark Alignment
LP = 2	DC Fine Cutting	LP = 12	AC Fine Cutting
LP = 20	DC Moderate Cutting	LP = 30	Moderate Cutting
LP = 3-9	N/A (Not Available)	LP = 13-29	Super Finish Cutting

4.3 เวลาเปิด (On Time : ON) [5]

เวลาเปิดเป็นช่วงเวลาที่เกิดการไหลของประจุกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อความถี่และความเร็วในการตัด ตลอดจนความหยาบผิวชิ้นงาน โดยเวลาเปิดสามารถปรับได้ 10 ระดับตามขนาดของลวดที่ใช้ และรูปแบบวงจรกำลังต่ำที่ระดับ 0,10,20 และ 30 สำหรับการตัดแบบหยาบนั้นจะปรับระดับเวลาเปิดตามขนาดลวดดังแสดงในตารางที่ 2.7 และเวลาเปิดมีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปดังแสดงในรูปที่ 2.11

ตารางที่ 2.7 การปรับระดับเวลาเปิดตามขนาดความโตของเส้นลวด [5]

Wire Dia. (mm)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
On-time (us)	2-4	5-7	5-8	6-9	1-3

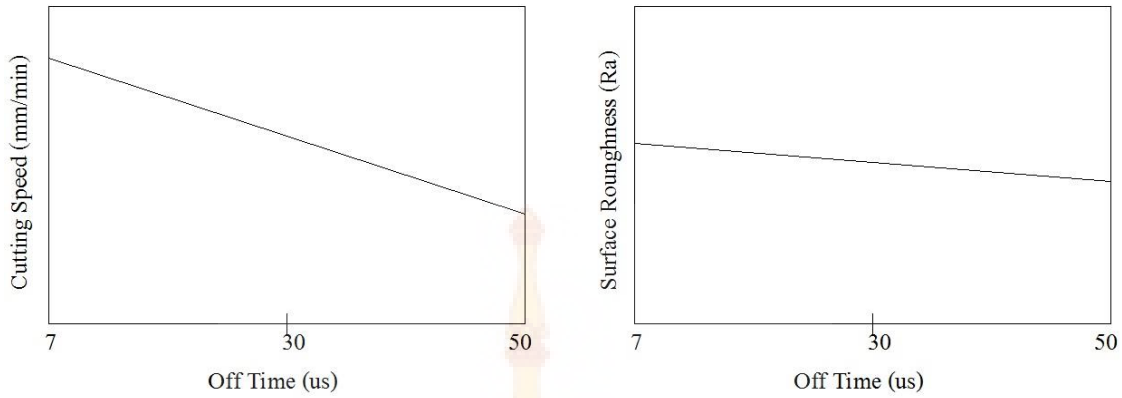


รูปที่ 2.11 เวลาเปิดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน [5]

4.4 เวลาปิด (Off Time : Off)

เวลาปิดเป็นช่วงเวลาที่ไม่เกิดการไหลของประจุกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นการปรับความถี่ของการสปาร์ค ที่ส่งผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวโดยช่วงเวลาเปิดนั้นสามารถ

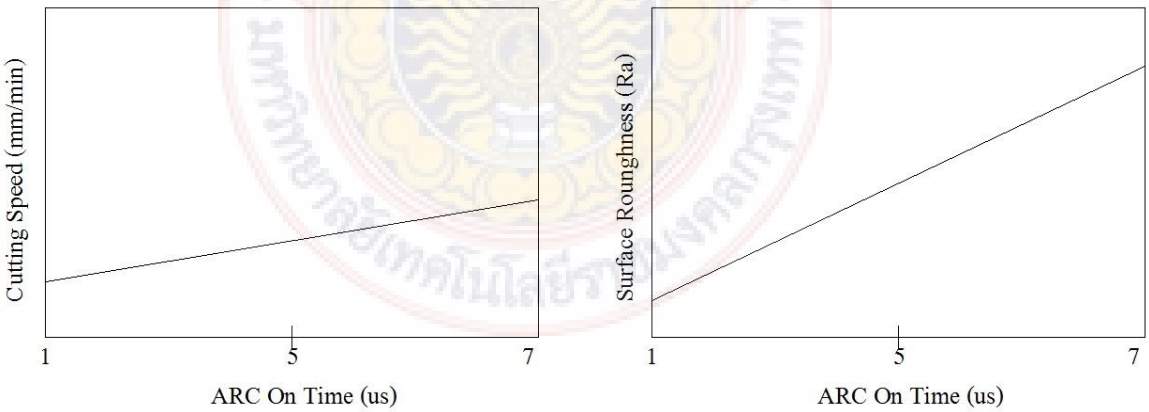
ปรับได้ ตั้งแต่ 7 – 50 ไมโครวินาที สำหรับรูปแบบการวงจรต่ำที่ระดับ 0, 10, 20 และ 30 ทั้งนี้เวลาปิดนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแปรรูปดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เวลาปิดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน [5]

4.5 เวลาอาร์ก (Arc On time : AN)

เวลาอาร์กเป็นพารามิเตอร์สนับสนุนให้เกิดการสปาร์คโดยเวลาอาร์กที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเร็วในการตัด และความหยาบผิวของวัสดุชิ้นงานสูงตามด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ทั้งนี้ในการปรับเวลาอาร์กจะต้องอิงกับเวลาเปิด กล่าวคือเวลาอาร์กจะต้องน้อยกว่าเวลาเปิดอยู่ประมาณ 2 - 4 ไมโครวินาที ตัวอย่างเช่นถ้าปรับเวลาเปิด 6 ไมโครวินาที เวลาอาร์กสูงสุดที่ปรับได้คือ 4 ไมโครวินาที และเวลาอาร์กต่ำสุดที่ปรับได้คือ 2 ไมโครวินาที ซึ่งสามารถใช้ได้กับรูปแบบวงจรกำลังต่ำระดับ 0 , 10 , 20 , และ 30

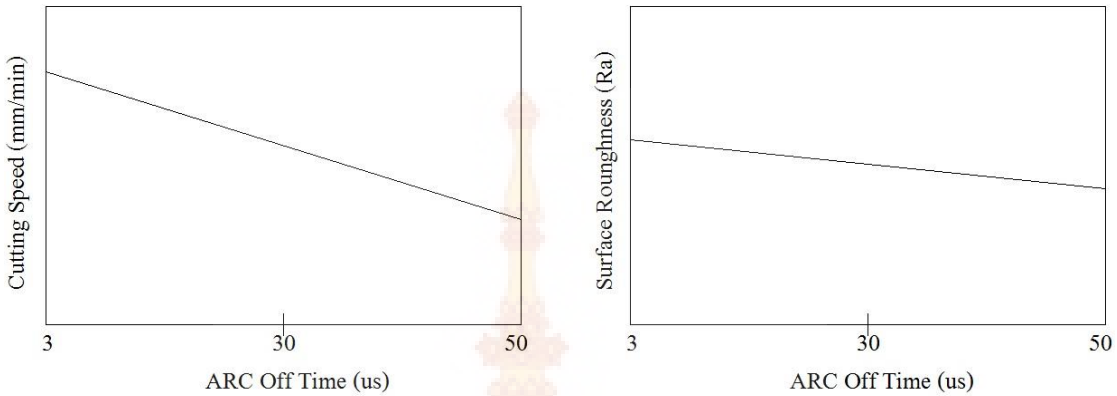


รูปที่ 2.13 เวลาอาร์กที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน [5]

4.6 เวลาหยุดอาร์ก (Arc Off Time : AFF)

เวลาหยุดอาร์กเป็นการหยุดการสบับสนุนให้เกิดการสปาร์ค ที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.14 ทั้งนี้เวลาหยุดอาร์กสามารถปรับได้ตั้งแต่ 3-50

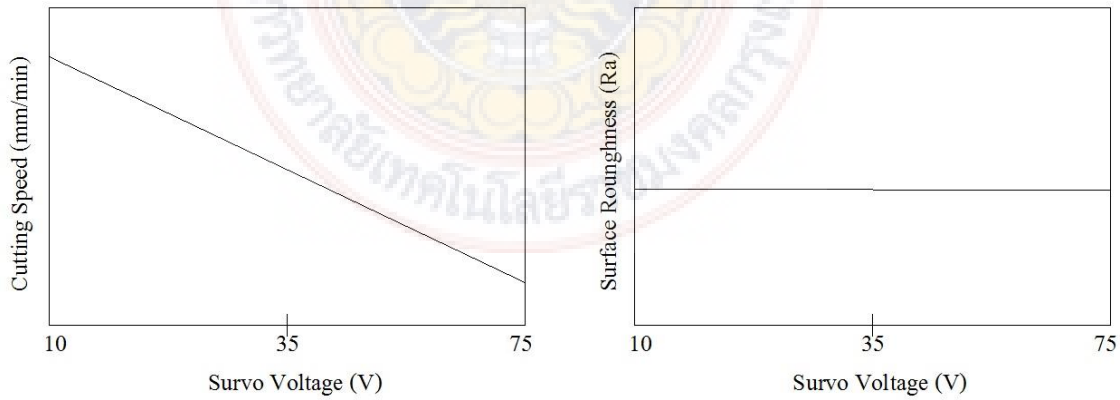
ไมโครวินาที โดยต้องอ้างอิงกับการปรับเวลาอาร์ก ซึ่งเวลาหยุดอาร์กนั้นจะต้องมีค่ามากกว่าเวลาอาร์ก 5 ถึง 10 ไมโครวินาที ตัวอย่างเช่น หากใช้เวลาอาร์ก 10 ไมโครวินาที เวลาหยุดอาร์กต่ำสุดที่ใช้เท่ากับ 15 ไมโครวินาที และเวลาหยุดอาร์กสูงสุดที่ใช้เท่ากับ 20 ไมโครวินาที โดยสามารถใช้ได้กับวงจรกำลังต่ำที่ระดับ 0 , 10 , 20 และ 30



รูปที่ 2.14 เวลาหยุดอาร์กที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน [5]

4.7 การขับป้อนความต่างศักย์ (Servo Voltage : S.V.)

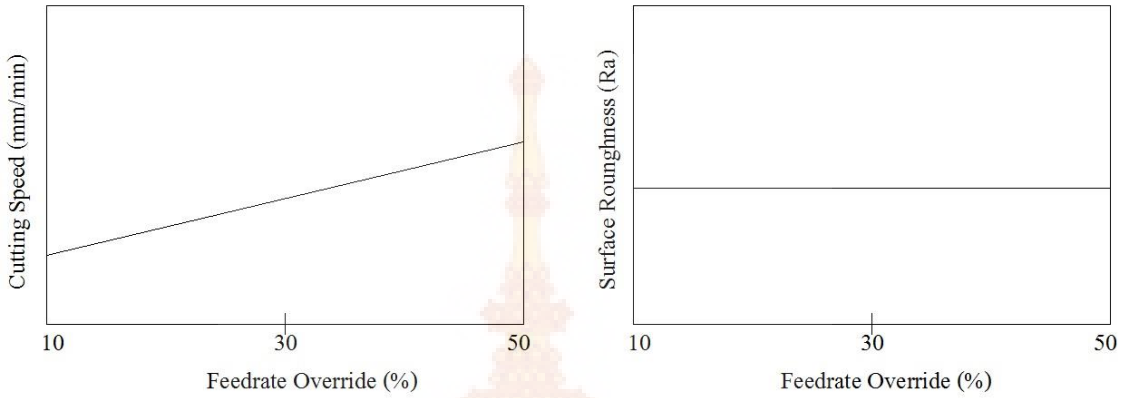
การขับป้อนความต่างศักย์เป็นการประยุกต์ใช้แรงดันไฟฟ้าเพื่อสร้างเป็นช่องว่างระหว่างเส้นลวดกับผิววัสดุชิ้นงานสามารถปรับระดับได้ตั้งแต่ 10 – 75 โวลต์ ซึ่งเป็นการอาศัยหลักการสร้างช่องว่างโดยใช้วิธีปล่อยแรงดันไฟฟ้า และวัดระดับกระแสไฟฟ้าที่ยอมให้ไหลผ่านได้ หากกระแสไหลผ่านเกินกว่าค่าที่กำหนดระบบขับป้อน (Source) จะเคลื่อนที่ลวดออกจากผิวชิ้นงานให้อยู่ในระดับที่กำหนด โดยความต่างศักย์ที่สูงมีผลทำให้ความเร็วตัดลดลง และไม่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การขับป้อนความต่างศักย์ที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน [5]

4.8 ความคลาดเคลื่อนของอัตราการป้อน (Feedrate Override : F.R)

ความคลาดเคลื่อนของอัตราการป้อนเป็นการรักษาความคงที่ของอัตราป้อนให้อยู่ในค่าที่ตั้งไว้ซึ่งยอมให้คลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 ± 1 เปอร์เซ็นต์ สามารถปรับได้อยู่ในช่วง 0 – 50 ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนในการป้อนมีผลต่อความเร็วในการตัด แต่ไม่มีผลต่อความหยาบผิวดังแสดงในรูปที่ 2.16



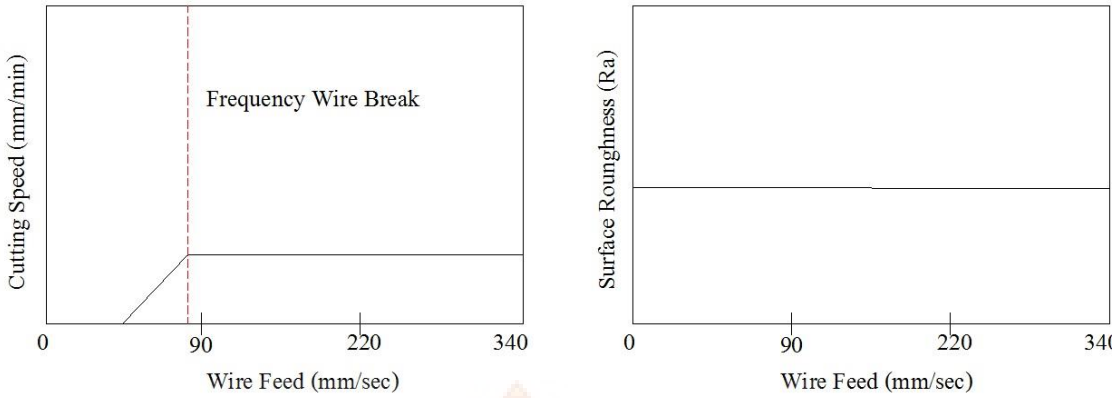
รูปที่ 2.16 ความคลาดเคลื่อนของอัตราการขับป้อนที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและผิวชิ้นงาน [5]

4.9 ความเร็วในการป้อนลวด (Wire Feed : W.F.)

ความเร็วในการป้อนลวดเป็นการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของเส้นลวดซึ่งสามารถปรับได้ 16 ระดับ ตั้งแต่ 0 – 15 (ช้า → เร็ว) มีหน่วยความเร็วในการป้อนของเส้นลวดเป็นมิลลิเมตรต่อนาทีดังแสดงในตารางที่ 2.8 โดยใช้ค่าความเร็วในการป้อนลวดที่ต่ำกว่า 90 มิลลิเมตรต่อนาที จะมีผลต่อการขาดของเส้นลวด แต่ไม่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวดังแสดงในรูปที่ 2.17

ตารางที่ 2.8 ความเร็วในการป้อนลวดตามระดับพารามิเตอร์ [5]

Wire Feed	0	1	2	3	4	5	6	7
mm/sec	0	0	5	25	60	90	110	140
Wire Feed	8	9	10	11	12	13	14	15
mm/sec	170	200	220	250	290	300	330	350



รูปที่ 2.17 ความเร็วในการป้อนลวดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน [5]

4.10 ความตึงจากแรงดึงลวด (Wire Tension : W.T.)

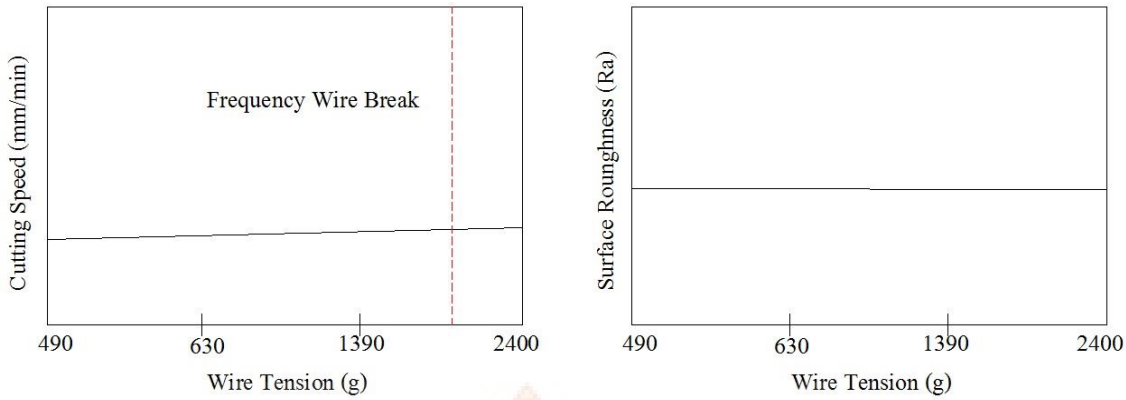
ความตึงจากแรงดึงลวด เป็นการปรับความตึงของเส้นลวดที่ใช้ในการตัด สามารถปรับได้ 16 ระดับ ตั้งแต่ 0 – 15 (น้อย → มาก) ซึ่งแรงตึงของเส้นลวดจะมีหน่วยเป็นกรัมดังแสดงในตารางที่ 2.9 ทั้งนี้ความตึงของเส้นลวดมีผลต่อความเร็วในการตัดแต่ไม่มีผลต่อความหยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ในการใช้เครื่อง Taiwan brand ความตึงของเส้นลวดจะปรับตามขนาดความโตของเส้นลวด

ตารางที่ 2.9 ความตึงจากแรงดึงลวดตามระดับพารามิเตอร์ [5]

Wire Tension	0	1	2	3	4	5	6	7
g	490	490	490	520	560	630	730	870
Wire Tension	8	9	10	11	12	13	14	15
g	1000	1180	1390	1610	1840	2060	2200	2400

ตารางที่ 2.10 ความตึงจากแรงดึงลวดตามขนาดความโตของเส้นลวด [5]

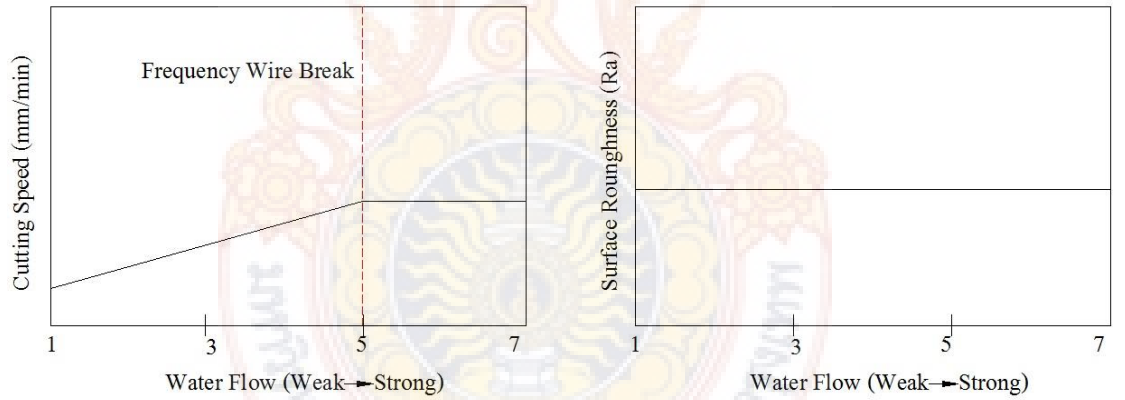
Wire Dia. (mm)	0.10	0.15	0.20	0.25
On-time (us)	490-560	490-1000	1000-1840	1390-2400



รูปที่ 2.18 ความตึงจากแรงดึงลวดที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน [5]

4.11 การไหลของเหลว (Water Flew : WL)

การไหลของเหลวตัวกลางเป็นการปรับระดับแรงดันของสารไดอิเล็คตริกสำหรับการปกคลุมบริเวณที่เกิดการสปาร์ค และขจัดเศษสามารถปรับได้แปดระดับจาก 0 -7 (เบา → แรง) ซึ่งการปรับระดับแรงดันและอัตราการไหลของเหลวจะมีเกจวัดความดันระบุค่าอีกครั้งหนึ่งโดยความดันหรืออัตราการไหลของเหลวมีผลต่อความเร็วในการตัด และการขาดของเส้นลวดรวมทั้งความหยาบผิวดังแสดงในรูป 2.19



รูปที่ 2.19 การไหลของเหลวที่มีผลต่อความเร็วในการตัดและความหยาบผิวชิ้นงาน [5]

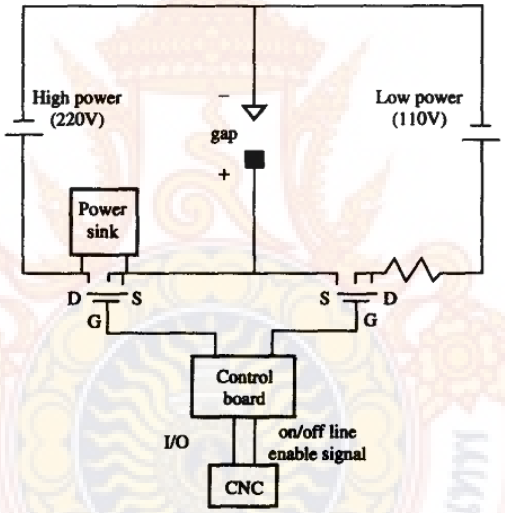
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 Y.S. Liao และคณะ [6] ศึกษาการขาดของเส้นลวดในกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าจากการตรวจจับรูปแบบสัญญาณคลื่นไฟฟ้า

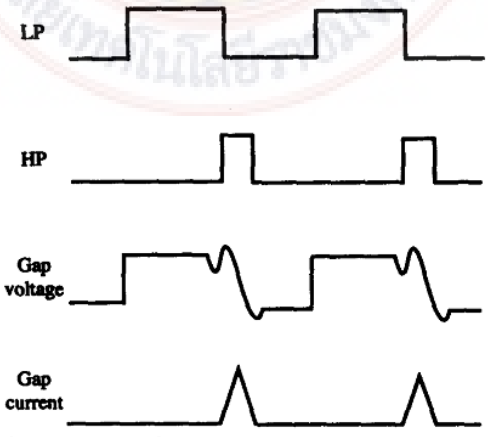
การขาดของเส้นลวดในกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้า (Wire Electrical Discharge Machining : WEDM) เป็นปัญหาสำคัญในกระบวนการผลิต โดยจักรสมัยใหม่นั้นมีการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถแยกลักษณะพิเศษของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Wave form) ออกมาเป็นคลื่นสัญญาณขณะทำการแปรรูป จากการวัดความกว้าง และความถี่ของการสปาร์คในช่วงระหว่างที่

ลวดขาดในสภาวะการทำงานปกติ งานวิจัยนี้ทำการศึกษา และวิเคราะห์การขาดของเส้นลวดจากสองกรณีคือ การขาดในการเดินเป็นส่วนโค้ง และการขาดจากการเพิ่มขึ้นของความถี่ในการสปาร์ค โดยวิเคราะห์ผลกระทบของรอยขาดจากการวิเคราะห์รูปภาพจาก SEM และ EDX ซึ่งจากการตรวจจับคลื่นสัญญาณพบว่า การขาดของลวดจะสัมพันธ์กับอัตราการขจัดเนื้องาน (Materials Removal Rate : MRR) และค่าพารามิเตอร์ในการแปรรูป (Machining Parameter)

ทฤษฎีของการกำเนิดคลื่นในการตัดด้วยลวดไฟฟ้าถูกพัฒนาโดย PTRR (Industrial Technology Research Institute) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เป็นวงจรกำเนิดคลื่นในการสปาร์คของกระแสไฟฟ้าแบบ Triangular wave โดยวงจรกำลังต่ำจะสร้างช่องว่างของการสปาร์ค (100V) และทำการสปาร์คด้วยวงจรกำลังสูง (220V) เพื่อให้เกิดการขจัดเนื้องาน เกิดเป็นความสัมพันธ์ของการสปาร์คที่ประกอบด้วย ความต่างศักย์วงจรกำลังต่ำ วงจรกำลังสูง และวงจรกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.21 การควบคุมคลื่นเป็นจังหวะดังนี้คือ เริ่มต้นจากการทำงานโดยวงจรต่ำ เพื่อสร้างระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับผิวชิ้นงาน แล้วสลับเป็นวงจรสูง เพื่อให้เกิดการปล่อยประจุกระแสไฟฟ้า (Discharge Current)



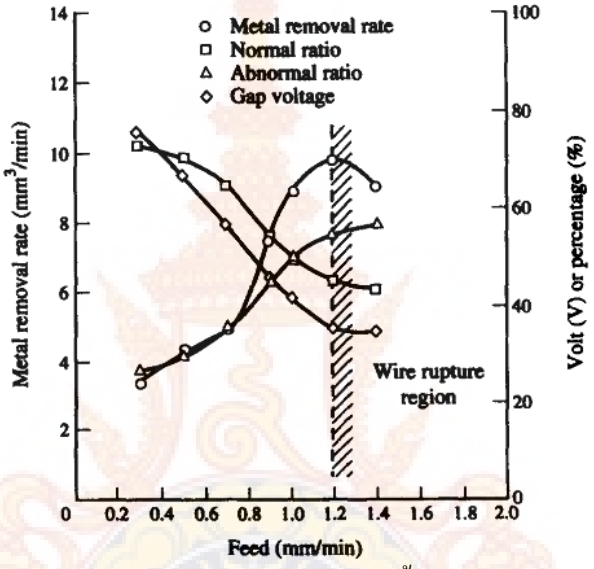
รูปที่ 2.20 วงจรกำลังในการควบคุมการตัดด้วยลวดไฟฟ้า [6]



รูปที่ 2.21 รูปคลื่นแบบปกติที่สัมพันธ์กันระหว่างการตัดด้วยลวดไฟฟ้า [6]

การออกแบบการทดลองในการวิจัยใช้สภาวะการทำงานปกติตัดชิ้นงาน SKD 11 หนา 50 มิลลิเมตรด้วยลวดทองแดงชุบสังกะสีขนาด 0.25 มิลลิเมตร ปรับพารามิเตอร์ในการสปาร์ค On-time 500 ns, Off-time 25.6 us, Arc on-time 300 ns, Arc off-time 19.2 us, Wire speed 5 m/mim, Wire Tension 1000 g, Machining Speed 19 mm^2/min, Upper Fushing Pressure = 2 bar, Lower Flushing Pressure 1 bar, Sampling Interval 10 ms

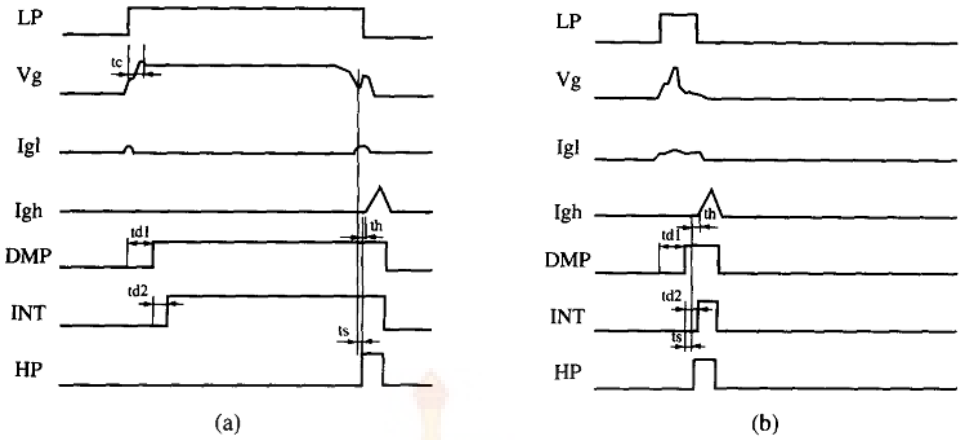
จากผลการทดลองสามารถแสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนแรงดันต่ออัตราการขจัดเนื้องานและพารามิเตอร์ในการแปรรูปดังแสดงในรูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23 แสดงลักษณะรูปแบบคลื่นสัญญาณที่เป็นปกติ และสัญญาณที่ผิดปกติ



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์อัตราส่วนแรงดันต่ออัตราการขจัดเนื้องานและพารามิเตอร์ในการแปรรูปที่มีผลความสมบูรณ์ของรูปคลื่น [6]

หมายเหตุ*

1. Metal removal rate = อัตราการขจัดเนื้องาน (mm^3/min)
2. Normal Ratio = อัตราส่วนของรูปคลื่นความถี่ของการสปาร์คที่เป็นปกติ
3. Abnormal Ratio = อัตราส่วนของรูปคลื่นความถี่การสปาร์คที่ผิดปกติ
4. Gap voltage = ช่องว่างของการสปาร์คจากแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.23 (a) ลักษณะรูปคลื่นปกติ (Normal), (b) ลักษณะรูปคลื่นผิดปกติ (Abnormal) [6]

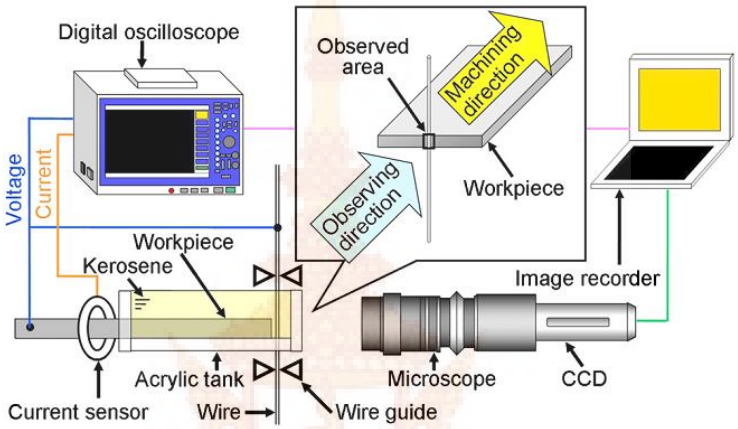
2.3.2 A. Okada และคณะ [7] ศึกษาการกระจายตัวของการสปาร์ค และการสั่นสะเทือนของเส้นลวดใน กระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าโดยใช้กล้องจับภาพความเร็วสูง

การกระจายตัวของการสปาร์ค และการสั่นสะเทือนของเส้นลวดในกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าโดยใช้กล้องจับภาพความเร็วสูงสำหรับการตัดโลหะแผ่นบางนั้นพบว่า รูปแบบของการกระจายของการสปาร์คมีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป โดยการกระจายตัวของการสปาร์คนั้นมีรูปแบบที่แน่นอน และสามารถวัดได้ด้วยกระบวนการแยกประจุของกระแสไฟฟ้า แต่สำหรับวัสดุชิ้นงานที่บางนั้นทำได้ยาก ในงานวิจัยนี้จึงใช้กล้องจับภาพที่มีความเร็วสูง (High-Speed video camera) บันทึกภาพขณะทำการสปาร์คสำหรับวิเคราะห์ความหนาแน่นของตำแหน่งการกระจายตัวของการสปาร์ค โดยมีการปรับพารามิเตอร์ในการแปรรูปอันได้แก่ Servo Voltage , Pulse Interval Time และความเร็วการป้อนลวด (Wire Running Speed) เพื่อค้นหารูปแบบของการกระจายซึ่งอาจเป็นไปได้

ทฤษฎีของการถ่ายเทประจุเกิดขึ้นได้ง่ายในกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้า และเป็นที่นิยมใช้ในการตัดชิ้นงานแผ่นบางเนื่องจากมีช่องว่างที่แคบ ซึ่งความถี่ของการถ่ายเทประจุมีผลต่อความไม่เสถียรของประสิทธิภาพในการแปรรูป และการขาดของเส้นลวด ความไม่เป็นรูปแบบของการกระจายตัวของพื้นที่การสปาร์คมีผลเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงาน วิธีการวัดการกระจายค่าของกระแสไฟฟ้า (Branched Electric Current Method) เป็นกระบวนการพื้นฐานสำหรับการวัดการกระจายค่าของตำแหน่งการสปาร์คโดยใช้ตัวจับสัญญาณไฟฟ้า และแบ่งแยกจากอัตราการสัมผัสกระแสสูงและต่ำซึ่งยากต่อการวัดในชิ้นที่ชิ้นงานที่บาง และเป็นไปไม่ได้เลยที่จะทำให้ได้ค่าที่แน่นอน การบันทึกภาพด้วยความเร็วสูงเป็นการตรวจจับพื้นที่ที่เกิดการสปาร์คจริงขณะทำการตัดด้วยลวดไฟฟ้าโดยมีความเร็วสูง

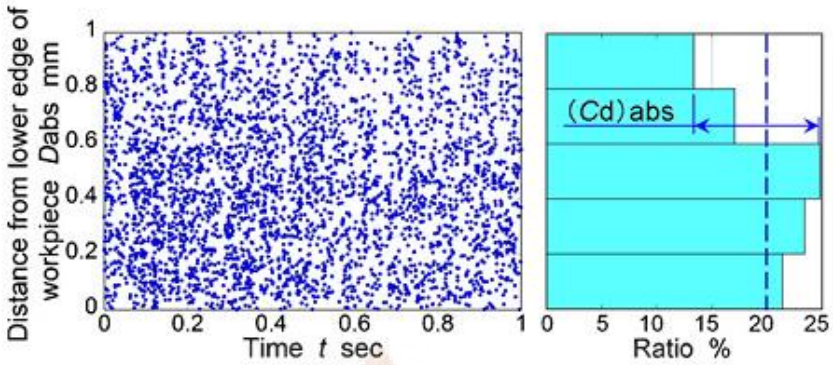
วิธีการทดลองหาค่าการกระจายตัวของพื้นที่สปาร์ค และการสั่นสะเทือนของเส้นลวดขณะทำการตัวด้วยลวดไฟฟ้ามีข้อจำกัดของการบันทึกภาพ เนื่องจากโต๊ะงานที่ทึบแสงจึงต้องสร้างโต๊ะงานจำลองแบบโปร่งแสงด้วยพลาสติก (Acrylic Tank) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยในงานวิจัยนี้ใช้ลวด

ทั้งสเตนคาร์ไบด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ไมโครเมตร ตัดชิ้นงานเหล็กกล้า SKD 11 หนา 1 มิลลิเมตร ภายใต้ของเหลวตัวกลางที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน (Kerosene) ปรับตั้งพารามิเตอร์ในการตัดด้วยลวดไฟฟ้าดังนี้ Pulse Duration 1 us, Discharge Current 20 A, Servo voltage 50 – 90 V, Pulse Interval Time 7.0 – 9.0 us และ Wire Running Speed 3.0-15.0 m/min และปรับตั้งความเร็วของการบันทึกจากกล้อง (High –Speed Observation) ด้วยความเร็วของการบันทึก (Recording Speed 8000 fps), ความเร็วในการเก็บภาพ (Shutter Speed 1/8000 S),เวลาในการบันทึกสูงสุด (Max. Recording time 1.0 และ 5.0s) และความกว้างของมุมมอง (View Size 1.3 x 0.6 mm)

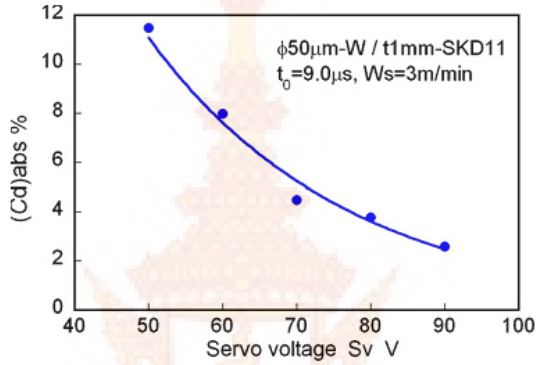


รูปที่ 2.24 อุปกรณ์ในการทดลองโดยใช้โต๊ะการทำงานแบบจำลองที่สร้างจากอะคลิลิค [7]

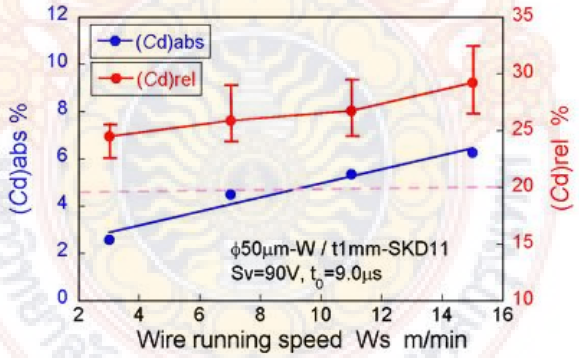
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลโดยใช้กล้องบันทึกภาพความเร็วสูงบันทึกภาพพื้นที่สปาร์คแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.25 ด้วยแรงดัน Servo Voltage 50 โวลต์ ซึ่งแสดงเป็นพื้นผิวการ สปาร์คที่แบ่งภาพความความหนาของชิ้นงาน 1 มิลลิเมตรในแนวแกนตั้ง โดยมีแนวแกนนอนเป็นระยะเวลาการบันทึก เมื่อทำการแบ่งพื้นที่เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของการสปาร์คออกเป็น 5 ส่วน ส่วนละ 20 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของพื้นที่การสปาร์คแต่ละส่วนจากการคำนวณเพื่อแสดงความต่างของพื้นที่การสปาร์ค เรียกว่าดัชนีการกระจายตัว {(Cd) abs : Discharge Concentration Index.} โดยเมื่อแรงดัน Servo Voltage เปลี่ยนแปลงจะมีผลทำให้ดัชนีการกระจายตัวของพื้นที่ โดยพื้นที่การสปาร์คจะลดลงเมื่อ Servo Voltage เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.26 ทั้งนี้ Servo Voltage ที่ต่ำจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างการสปาร์คที่แคบ ทำให้ยากต่อการเกิดฟองอากาศในบริเวณพื้นที่สปาร์ค และการไหลเวียนของสารไดอิเล็กตริก ส่งผลให้อนุภาคเศษโลหะที่ตกค้างเกิดการอาร์กซ้ำ (Short Circuit and Secondary Discharges) โดยในการศึกษาสามารถแสดงดัชนีการกระจายตัวของพื้นที่การสปาร์ค (Cd) Abs ลดลงเมื่อ Pulse Interval Time เพิ่มมากขึ้น ซึ่งระยะเวลาปิดมีผลต่อการกำเนิด พลาสม่า (Plasma) ในการสปาร์คในรอบถัดไป โดยการสร้างช่องว่างระหว่างลวดกับชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งความเร็วในการวิ่งของเส้นลวดมีผลทำให้ดัชนีการกระจายตัว โดยความเร็วของลวดที่สูงจะมีแนวโน้มทำให้อัตราการไหลของสารไดอิเล็กตริกอย่างราบเรียบ



รูปที่ 2.25 การกระจายตัวของพื้นที่การสปาร์ค และปริมาณความหนาแน่นของแต่ละส่วน [7]



รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนดัชนีการกระจายของพื้นที่การสปาร์คต่อแรงดันไฟฟ้า (Servo Voltage) [7]

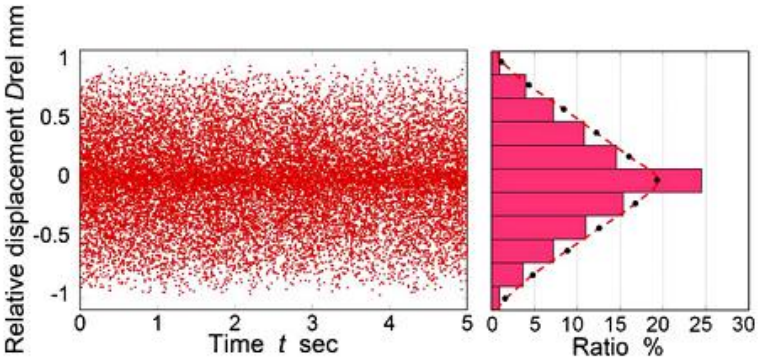


รูปที่ 2.27 ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อดัชนีการกระจายตัว [7]

หมายเหตุ

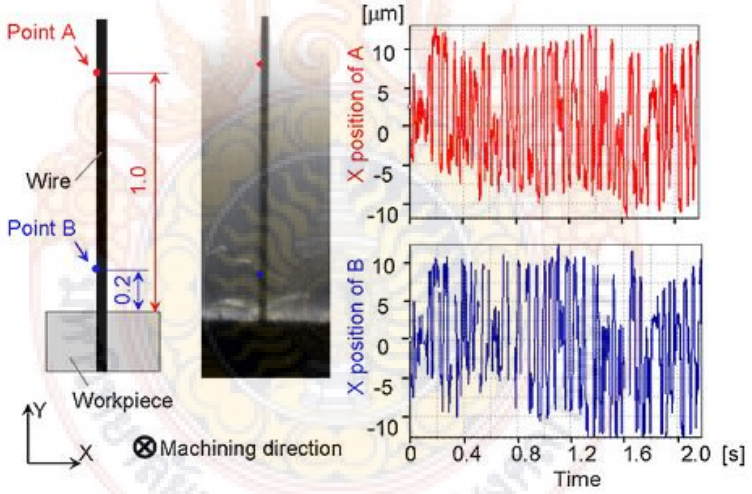
(Cd)Abs = Discharge concentration index (ความต่างสูงสุด) ดังแสดงในรูปที่ 2.25

(Cd)Rel = Discharge concentration ratio in relative (อัตราการกระจายตัว) ดังรูปที่ 2.28

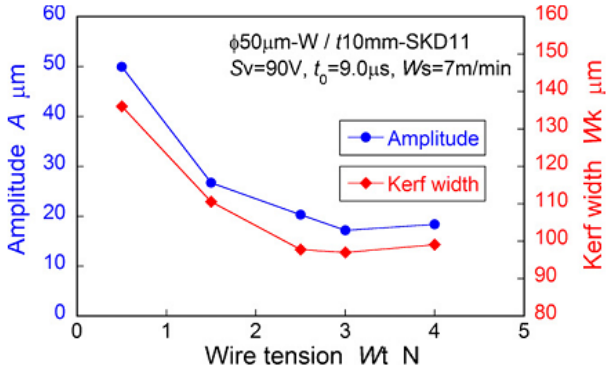


รูปที่ 2.28 อัตราการกระจายตัวของพื้นที่การสปาร์ค [7]

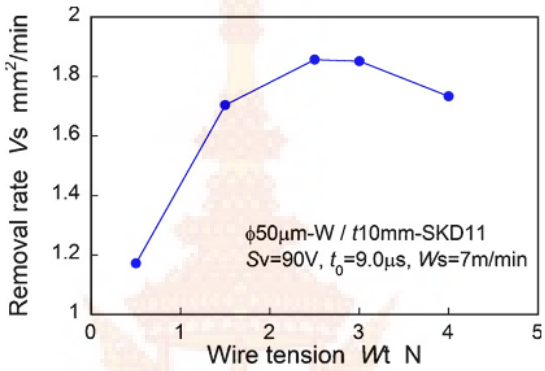
เส้นลวดไฟฟ้าที่ใช้ในการตัดวัสดุชิ้นงานทั้งสเตนคาร์ไบด์จะเกิดการสั่นสะเทือนของเส้นลวดเนื่องจากการสปาร์คดังแสดงผลการบันทึกด้วยกล้องความเร็วสูง และเมื่อวิเคราะห์ออกเป็นลายเส้นดังแสดงในรูปที่ 2.29 การสั่นสะเทือนดังกล่าวมีผลต่อความกว้างของรอยตัดที่มีความสัมพันธ์กับความตึงของเส้นลวดที่ใช้ในการตัดดังแสดงในรูปที่ 2.30 (Amplitude หมายถึงการสั่นสะเทือนของเส้นลวด และ Kerf Width หมายถึงความกว้างของคลองการตัดด้วยลวดไฟฟ้า) ซึ่งมีผลต่อความเร็วในการตัดดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.29 แสดงการสั่นสะเทือนของเส้นลวดที่ใช้ในการตัด [7]



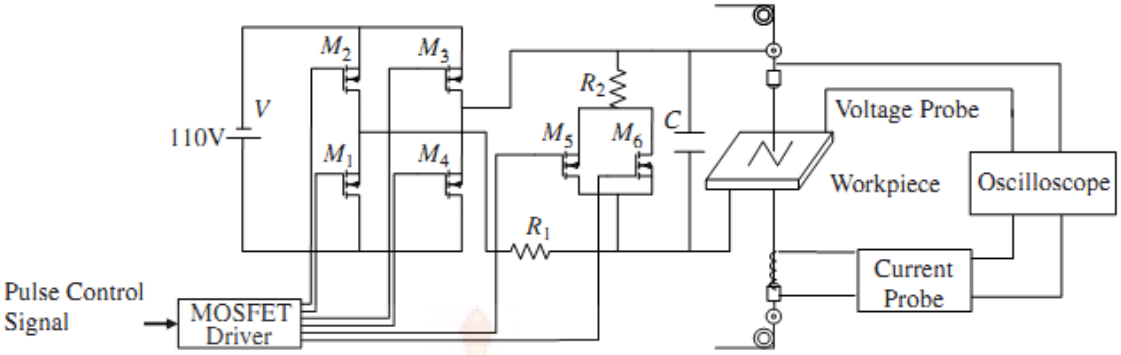
รูปที่ 2.30 ความตึงของเส้นลวดที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนและความกว้างของรอยตัด [7]



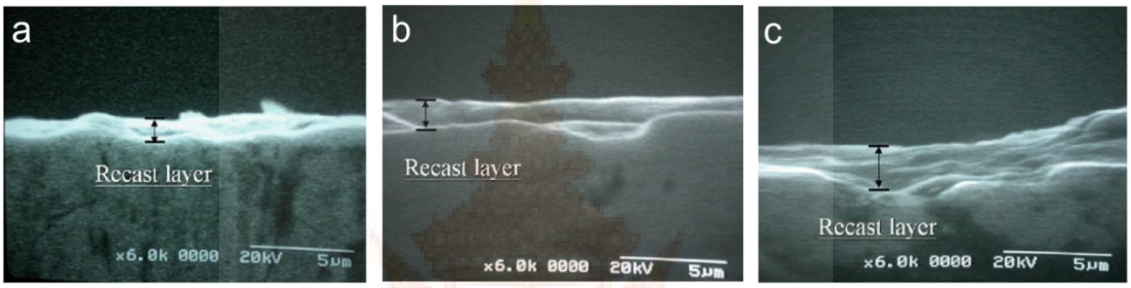
รูปที่ 2.31 ความตึงของเส้นลวดที่มีผลต่อความเร็วในการตัด [7]

2.3.3 Mu-Tian และคณะ [8] ปรับปรุงคุณภาพผิวงานในการตัดด้วยลวดไฟฟ้าโดยการปรับวงจรกำลัง

การปรับปรุงคุณภาพผิวงานในการตัดด้วยลวดไฟฟ้าโดยการปรับวงจรกำลัง เป็นการพัฒนาและการประยุกต์ใช้วงจรกำลัง (Power Supply) ในการปรับปรุงผิวชิ้นงาน โดยตัดด้วยลวดไฟฟ้าที่ใช้ทรานซิสเตอร์ควบคุมวงจรกำลังแบบ Full-bridge ดังแสดงในรูปที่ 2.32 เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าให้มีความถี่สูง ซึ่งในการทดลองพบว่าคลื่นสัญญาณขณะปล่อยประจุ (Pulse Duration) กระแสไฟฟ้าสามารถควบคุมให้เกิดการถ่ายเทประจุในระยะเวลาอันสั้นโดยการปรับตัวเก็บประจุ และต่อวงจรแบบขนานสำหรับสร้างช่องว่างระหว่างวัสดุชิ้นงานกับเส้นลวดอิเล็กโตรดเพื่อให้เกิดการอาร์ก การถ่ายเทประจุที่ยาวนานจะทำให้ค่าความต้านทานของกระแสไฟฟ้าลดลง และกระแสสูงสุดในการอาร์กจะเพิ่มขึ้นตามเวลาเปิด ซึ่งส่งผลต่อชั้นความหนาของการหลอมละลาย และเย็นตัวใหม่ (Thickness of Recast Layer) ดังแสดงในรูปที่ 2.33 กระบวนการนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับการปรับปรุงผิวไทเทเนียมและขจัดรอยแตกร้าวขนาดเล็กให้ลดลงจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นโดยการตัดซ้ำและปรับพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า ความหยาบผิวเฉลี่ยสำหรับการตัดวัสดุเหล็กกล้า SKD 11 ในครั้งที่สามมีค่าเท่ากับ 0.22 ไมโครเมตร ดังแสดงลักษณะพื้นผิวดังในรูปที่ 2.34



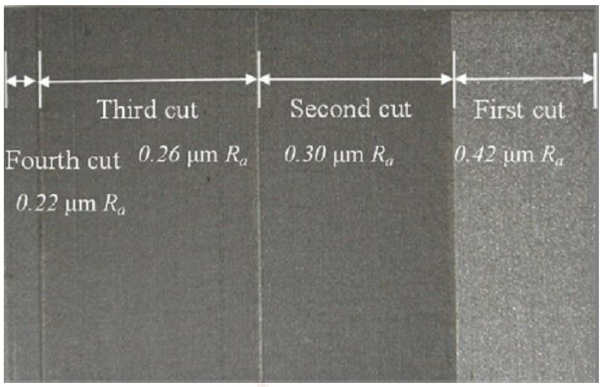
รูปที่ 2.32 แสดงวงจรควบคุมกำลังแบบ Full-bridge ของการตัดด้วยลวดไฟฟ้า [8]



รูปที่ 2.33 กระแสสูงสุดในการตัดที่มีผลต่อการหลอมละลายและเย็นตัวใหม่ (a กระแส 0.7A, b กระแส 1.2A และ c กระแส 2.3A) บนผิวชิ้นงานเหล็กกล้า SKD 11 [8]

ตารางที่ 2.11 การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการตัด [8]

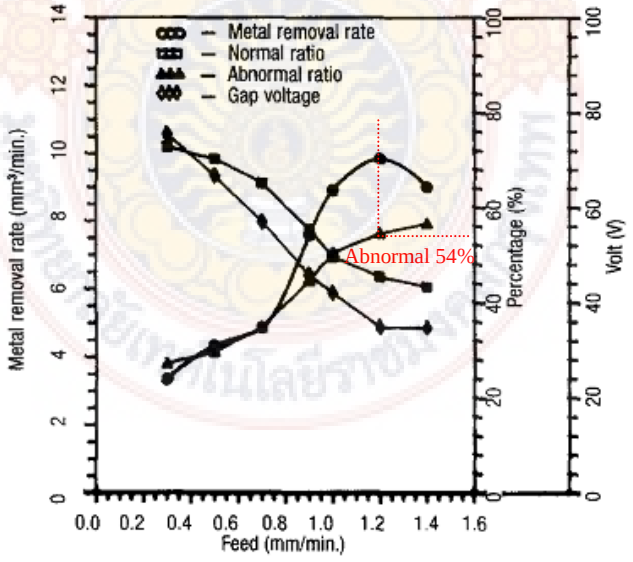
Parameter Condition	Finish-cutting Operation Number			
	1	2	3	4
Resistivity of water (kΩcm)	100	100	150	150
Current-limiting Resistance (Ω)	10	15	20	30
Pulse on-time (us)	3	1	1	1
Pulse off-time (us)	2	2	2	2
Capacitance (nF)	10	10	1	1
Wire tension (gf)	1600	1700	1800	1900
Offset (um)	10	7	5	2



รูปที่ 2.34 ลักษณะพื้นผิวที่ผ่านการปรับปรุงโดยปรับตั้งพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.11 [8]

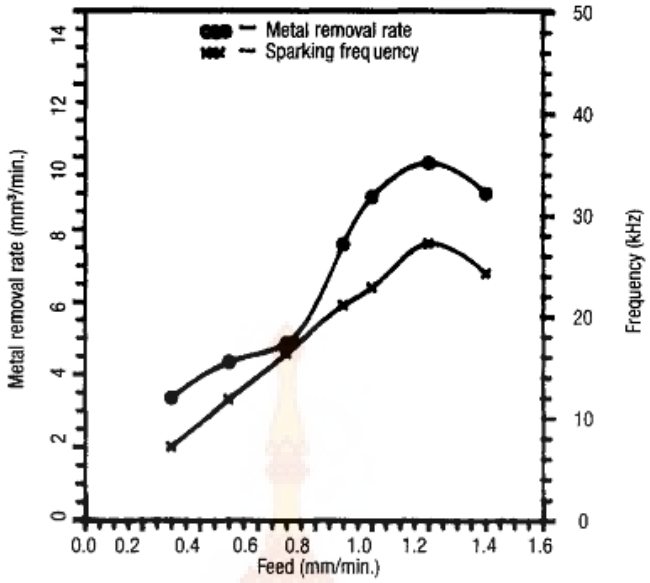
2.3.4 M.T. Yan และ Y.S. Liao [9] ศึกษาการควบคุมกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าโดยใช้แผนการควบคุม (ตรรกะ)

การควบคุมกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าโดยใช้แผนการควบคุม (ตรรกะ) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการขจัดเนื้องานกับอัตราป้อนในการตัดวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า SKD 61 หนา 30 มิลลิเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่าอัตราการขจัดเนื้องานจะเพิ่มขึ้นตามอัตราป้อน จนถึงระดับหนึ่งความเร็วในการป้อนจะส่งผลต่อการลัดวงจรการสปาร์ค (Short Circuit) เกิดเป็นรูปคลื่นที่ผิดปกติ (Abnormal Ratio) หากเกินกว่า 54 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้อัตราการขจัดเนื้องานจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.35 และรูปที่ 2.36 แสดงความสัมพันธ์ของความถี่ในการสปาร์คและความเร็วในการป้อนที่มีผลต่อ อัตราการขจัดเนื้องาน โดยอัตราการขจัดเนื้องานนั้นจะแปรผันตามความถี่



Relation Between Sensing Parameters and MRR with Respect to Feedrate (on-time: 500 ns; off-time: 11.2 μs; wire speed: 7 m/min.; wire tension: 600 gf; flushing pressure: upper = 2 bars, lower = 2 bars; wire: copper [ϕ 0.25 mm])

รูปที่ 2.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในการตัดด้วยลวดไฟฟ้ากับอัตราการขจัดเนื้องาน [9]



Relation Between Sparking Frequency and MRR with Respect to Feedrate (on-time: 500 ns; off-time: 11.2 μs; wire speed: 7 m/min.; wire tension: 600 gf; flushing pressure: upper = 2 bars, lower = 2 bars; wire: copper [ϕ 0.25 mm])

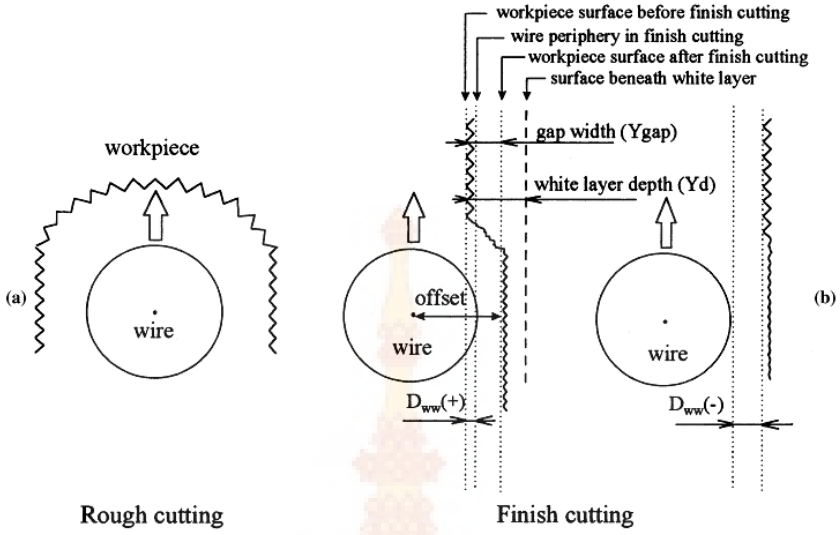
รูปที่ 2.36 แสดงความสัมพันธ์ของความถี่ในการสปาร์คและความเร็วในการป้อนที่มีผลต่ออัตราขจัดเนื้องาน [9]

2.3.5 J.T. Huang และคณะ [10] ศึกษาการกำหนดค่าพารามิเตอร์และจำนวนครั้งของการตัดเพื่อปรับสภาพพื้นผิวในกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้า

การกำหนดค่าพารามิเตอร์และจำนวนครั้งของการตัดเพื่อปรับสภาพพื้นผิวในกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตที่มีความเที่ยงตรงสูงและมีคุณภาพผิวงานที่ดี โดยการตัดแบบหยาบ และตัดซ้ำอีกครั้งเพื่อเก็บผิวละเอียด จากการปรับเวลาเปิด (Pulse On-time) เวลาปิด (Pulse Off-time) อัตราป้อน (Feed Rate) แรงดันน้ำเพื่อขจัดเศษ (Flushing Pressure) และระยะห่างระหว่างผิวเส้นลวดกับผิวชิ้นงาน (Distance Between Wire Periphery and Workpiece Surface) ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป และมีผลกระทบต่อวัสดุชิ้นงานในรูปของความกว้างของรอยตัด (Gab Width) ความหยาบผิว (Surface Roughness) และความหนาการเกิดชิ้นสีขาว (White Layer) ซึ่งจากการทดลองโดยใช้ทากูชิเทคนิคร่วมกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าเวลาเปิดและระยะห่างระหว่างผิวลวดกับผิวชิ้นงาน มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปซึ่งสามารถสร้างรูปแบบความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยการสร้างสมการทดถอยแบบอัลกอลิทึม

ทฤษฎีการตัดด้วยลวดไฟฟ้านั้น ความกว้างของรอยตัดจะเท่ากับผลรวมของขนาดเส้นลวดกับระยะการอาร์กของกระแสไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.37 ทั้งนี้ในกรณีตัดชิ้นงานในครั้งแรกจะเรียกว่าการตัดแบบหยาบ (Rough Cutting) และในการตัดซ้ำแนวเดิมจะเรียกว่า การตัดแบบละเอียด (Finish Cutting) โดยเป็นการตัดเพื่อปรับปรุงพื้นผิวและเพิ่มความแม่นยำทางด้านขนาดโดยการชดเชยระยะ

การสปาร์ค (Offset) กรณี D_{ww}+ หมายถึงลวดกินลึกเข้าไปในชิ้นงาน และกรณี D_{ww}- หมายถึงลวดห่างจากผิวชิ้นงาน ซึ่งทั้งสองรูปแบบนี้จะทำให้เกิดความหยาบผิวของชิ้นงานที่ต่างกัน



รูปที่ 2.37 การตัดวัสดุชิ้นงานด้วยลวดไฟฟ้า (a) การตัดหยาบ (b) การตัดละเอียด [10]

การออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะเงื่อนไขตัวแปรที่มีผลต่อความหยาบผิวชิ้นงานด้วยทากูชิเทคนิค เพื่อกำหนดรูปแบบของการตัดหยาบ และละเอียดให้ได้ขนาดชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงและความหยาบผิวเฉลี่ยของชิ้นงานที่ต่ำโดยสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการตัดดังตารางที่ 2.12 และมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมของการทำงานตารางที่ 2.13

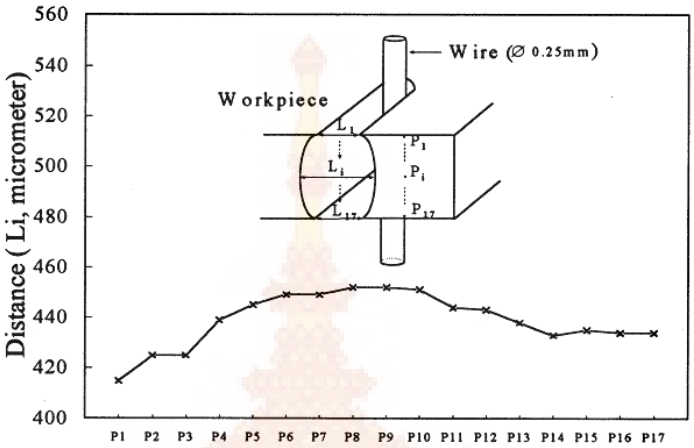
ตารางที่ 2.12 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัดแบบหยาบและละเอียด [10]

Process	R_a	T_{on}	T_{off}	Feed	D_{ww}	V_w	F_w	P
Rough cutting	3.2	1	17.6	2.4	258	9	1000	5
First finish cutting	2.03	0.2	8	3.94	148	3	1200	1
Second finish cutting	1.5	0.1	8	7.36	143	3	1200	1

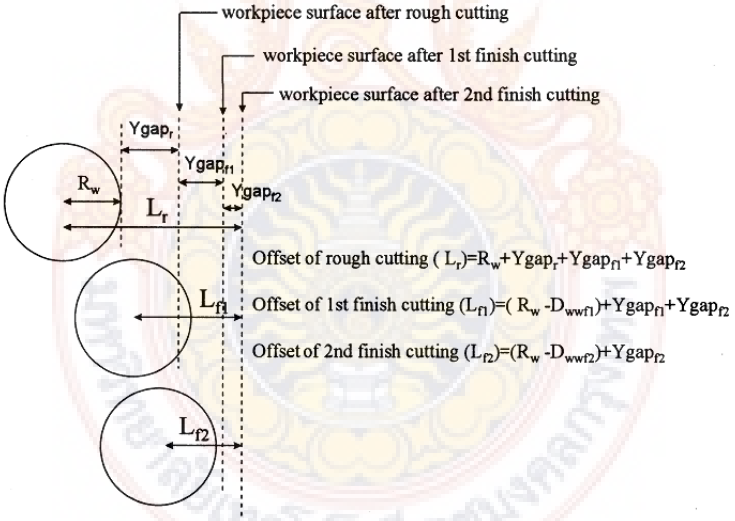
ตารางที่ 2.13 สภาวะแวดล้อมของการตัด [10]

Item	Value
Workpiece (anode)	SKD11 alloy steel
Electrode (cathode)	ϕ0.25 mm brass wire
Workpiece height	30 mm
Open voltage	95 V
Servo reference voltage	10 V
Fluid specific resistance	1–3 mA

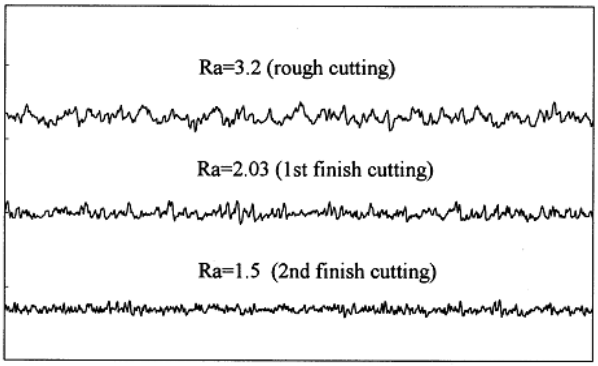
ผลการทดลองและวิเคราะห์การตัดแบบหยาบมีผลกระทบต่อระนาบแนวตัดดังแสดงในรูปที่ 2.38 และจากการตัดตามค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 2 โดยใช้รูปแบบความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยการสร้างสมการทดถอยแบบอัลกอลิทึมดังรูปที่ 2.39 ทำให้ความหยาบผิวเฉลี่ยลดลงดังแสดงลักษณะพื้นผิวในรูปที่ 2.40 ทั้งนี้ในกระบวนการตัดยังส่งผลกระทบต่อการเกิดชั้นสีขาวบนผิววัสดุชิ้นงานที่เกิดจากการหลอมละลายและเย็นตัวใหม่บนพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.41



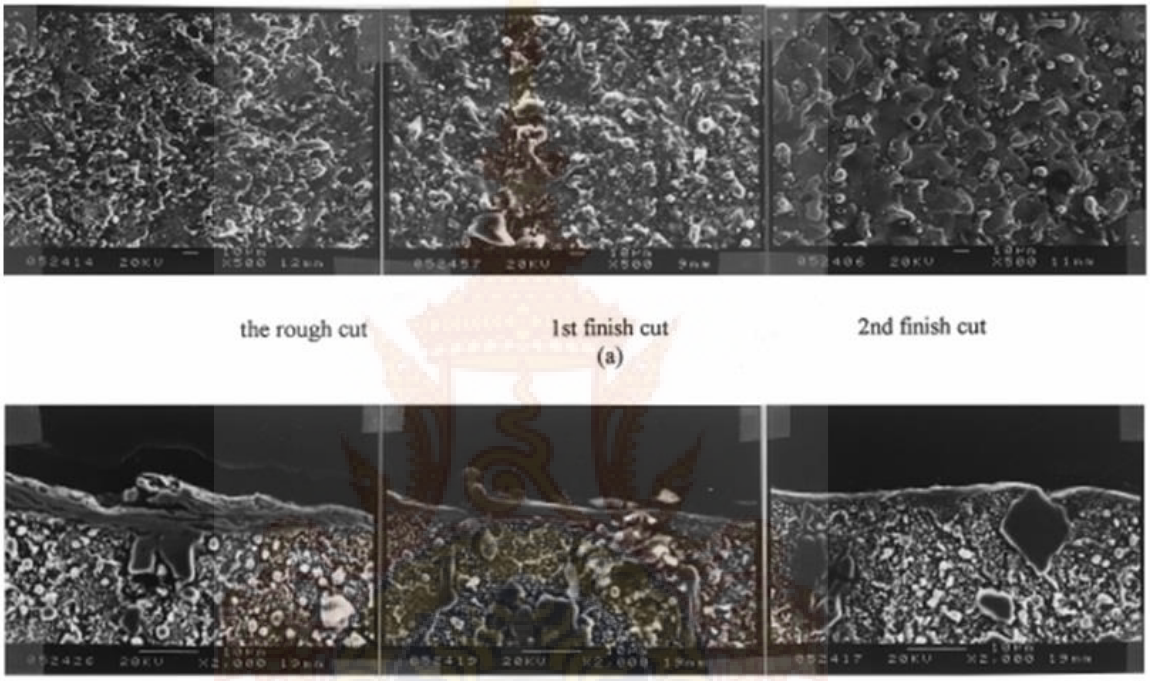
รูปที่ 2.38 ระนาบและระยะห่างที่เกิดจากการตัดด้วยลวดไฟฟ้าแบบหยาบ [10]



รูปที่ 2.39 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยการสร้างสมการทดถอยแบบอัลกอลิทึม [10]



รูปที่ 2.40 ลักษณะพื้นผิวที่เกิดจากการตัดแบบหยาบและละเอียด [10]



รูปที่ 2.41 ลักษณะพื้นผิวและการเกิดชั้นสีขาวที่เกิดจากการหลอมละลายและแข็งตัวใหม่ [10]

2.4 สรุป

กระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าเป็นการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอาร์กระหว่างเส้นลวดกับวัสดุชิ้นงาน โดยแนวการเดินของลวดจะทำให้เกิดการหลุดร่อนของอณุภาคที่เกิดจากความร้อนที่เพียงพอต่อการหลอมละลายของวัสดุ ซึ่งความร้อนในการตัดอาร์กเกิดจากการจ่ายประจุกระแสไฟฟ้าผ่านช่องว่างระหว่างผิวงานกับผิวเส้นลวดโดยมีสารไดอิเล็กตริกทำหน้าที่เป็นฉนวนกึ่งตัวนำ ทั้งนี้ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการระเหิด ระเหย เกิดเป็นก๊าซปกคลุมพื้นผิวและขจัดออกด้วยสารไดอิเล็กตริกเพื่อรักษาความเสถียร เกิดเป็นวัฏจักรการอาร์กที่ประกอบด้วยเวลาการไหลของประจุไฟฟ้าที่เรียกว่า เวลาเปิด (On-time) โดยเวลาเปิดนั้นเป็นระยะเวลาที่ทำให้เกิดความร้อนสะสมที่มีต้นกำเนิดพลังงานความร้อนจากกระแส และแรงดันไฟฟ้า สำหรับการระบายความร้อนและขจัดเศษเพื่อรักษาความเสถียรของการอาร์กเป็นระยะเวลาการหยุดไหลของประจุที่เรียกว่า เวลาปิด (Off-time) ซึ่งเวลา

ปิดต่อเวลาปิดมีความสัมพันธ์กันในรูปของประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) และวัฏจักรการทำงานมีความสัมพันธ์กับหน่วยเวลาในรูปของความถี่ (Frequency) โดยทั้งหมดที่กล่าวมานั้นล้วนแล้วแต่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูป กระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าประเมินความสามาถในการทำงานจาก ความเร็วตัด (Cutting Speed) ซึ่งหมายถึงระยะทางต่อหน่วยเวลา หรือคำนวนอยู่ในรูปของพื้นที่การตัดต่อหน่วยเวลา ทั้งนี้การตัดด้วยลวดไฟฟ้าทำให้เกิดความกว้างของรอยตัด (Kerf) ซึ่งมีความกว้างเท่ากับผลรวมของขนาดลวดตัดกับระยะความกว้างของการอาร์ก โดยความรุนแรงของการอาร์กที่เกิดขึ้นจะกลายเป็นพื้นผิวสำเร็จของแนวการตัดที่สามารถประเมินได้จากค่าความหยาบผิว และความผิดพลาดทางด้านรูปทรง อีกทั้งความรุนแรงของการอาร์กยังส่งผลต่อการเกิดชั้นสีขาว (White Layer) ที่เกิดจากการหลอมละลายและแข็งตัวใหม่ (Recast) ซึ่งมีผลต่อความเที่ยงตรง และแม่นยำของขนาดชิ้นงาน โดยสามารถปรับแก้โดยการตัดซ้ำ (Finish Cutting)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 โดยการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ และประเมินประสิทธิภาพการแปรรูปจากความเร็วในการตัด (Cutting Speed) และการเกิดความกว้างของรอยตัด (Kerf) ตลอดจนวัดคุณภาพของชิ้นงาน จากความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Ry) รวมทั้งการเกิดพนังเอียงของชิ้นงาน (Slope) โดยการปรับค่าความต่างศักย์วงจร (Voltage) ประสิทธิภาพของการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) และความถี่การอาร์ก (Frequency)

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองปรับพารามิเตอร์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 โดยการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า โดยประเมินผลจาก ความเร็วในการตัด ความกว้างของรอยตัด และความลาดเอียงของวัสดุชิ้นงาน ตลอดจนคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวทั้งนี้ในการทดลองใช้เส้นลวดอิเล็กโตรดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตรตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อน (ชุบแข็ง) มีความหนา 5, 10, 25, และ 50 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง Arsitech CNC WEDM CW30 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ภายใต้การปกคลุมด้วยสารไดอิเล็กตริกที่เป็นน้ำกลั่น โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความต่างศักย์ ปัจจัยประสิทธิภาพการทำงาน และความถี่ในการสปาร์ค ซึ่งในแต่ละการทดลองจะทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งแล้วจึงวัดผลกระทบออกมาในรูปของค่าเฉลี่ย

รูปที่ 3.1 เครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า Arsitech CNC WEDM CW30

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องและคู่มือการใช้งานทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งใช้สำหรับการตัดวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าที่มีความหนาอยู่ในช่วง 2 ถึง 50 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 การกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นในการทดลอง

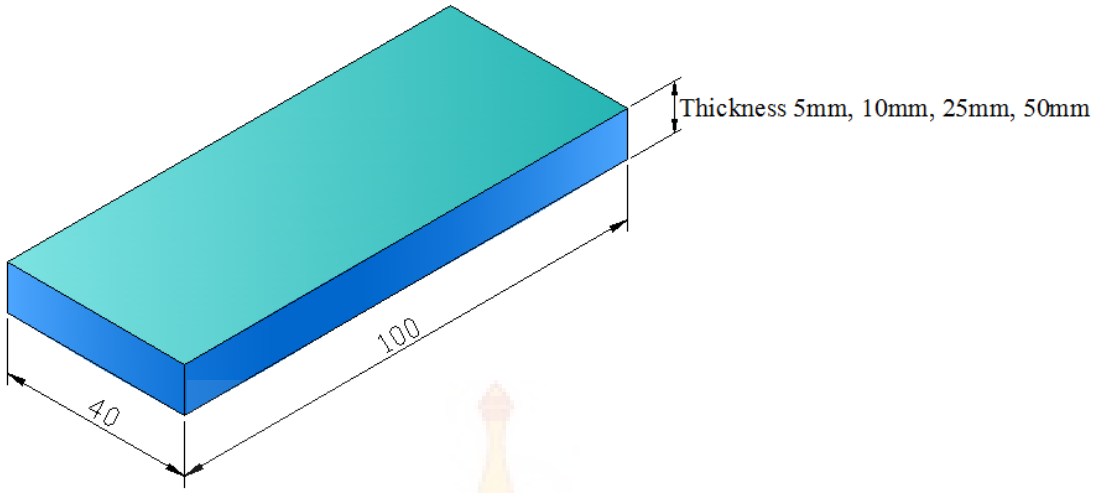
ลำดับ	พารามิเตอร์	ระดับที่เหมาะสม	หมายเหตุ
1	ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Voltage : OV)	70 ถึง 95 โวลต์	ปรับเพิ่มครั้งละ 5 โวลต์ จำนวน 6 ระดับ
2	วงจรกำลังต่ำ (Low Power : LP)	ระดับ 10	เป็นรูปแบบ AC Rough Cutting
3	เวลาเปิด (On-time : On)	6 ไมโครวินาที	อ้างอิงจากขนาดลวดที่ใช้เหมาะสำหรับเวลาเปิด 6 ถึง 8 ไมโครวินาที
4	เวลาปิด (Off-time : Off)	8 ไมโครวินาที	ค่าต่ำยิ่งดีแต่ต้องไม่ทำให้ลวดขาด
5	เวลาอาร์ก (Arc- On tine: AN)	3 ไมโครวินาที	ต้องน้อยกว่า On 2 - 4 ไมโครวินาที
6	เวลาหยุดอาร์ก (Arc- Off tine: Aff)	11 ไมโครวินาที	ต้องมากกว่า AN 5 -10 ไมโครวินาที
7	ความต่างศักย์ขับป้อน (Servo Voltage :SV)	ระดับ 50	แรงดันไฟฟ้า 75 โวลต์
8	ความคลาดเคลื่อนของอัตราป้อน (Feed rate Override : FR)	ระดับ 50	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดจากอัตราป้อน 50 เปอร์เซ็นต์
9	ความเร็วการป้อนลวด (Wire Feed : WF)	ระดับ 6	ความเร็ว 110 มิลลิเมตรต่อนาที
10	ความตึงของเส้นลวด (Wire Tension : WT)	ระดับ 10	ความตึง 1390 กรัม
11	อัตราการไหลของน้ำ (Water Flow : WL)	บน 25 kg/cm^2 ล่าง 75 kg/cm^2	-ฉีดผ่านหัว Nozzle -อุณหภูมิน้ำ 24 องศาเซลเซียส
12	ระยะห่างระหว่างผิววัสดุงานกับหัว Nozzle	5 มิลลิเมตร	ทั้งด้านบน และด้านล่าง

3.2.1 เตรียมวัสดุชิ้นงาน

วัสดุชิ้นงานในการทดสอบเป็นเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 นิยมใช้สำหรับสร้างเป็นชิ้นส่วนคมตัดในงานแม่พิมพ์โลหะ มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองผ่านกระบวนการชุบแข็งมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 60-62 HRC และถูกตัดปรับผิวและขนาดด้วยลวดไฟฟ้า ให้มีขนาดความกว้าง 40 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร หนา 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตรตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SDK 11

ลำดับ	ธาตุผสม	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
1	คาร์บอน (C)	1.1
2	ซิลิกอน (Si)	0.95
3	แมงกานิส (Mn)	มากสุดไม่เกิน 0.6
4	นิกเกิล (Ni)	0.1
6	โครเมี่ยม (Cr)	10
7	โมลิดินั่ม (Mo)	1.5
8	วานาเดียม (V)	0.05



รูปที่ 3.2 ขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 เตรียมสารไดอิเล็กตริก

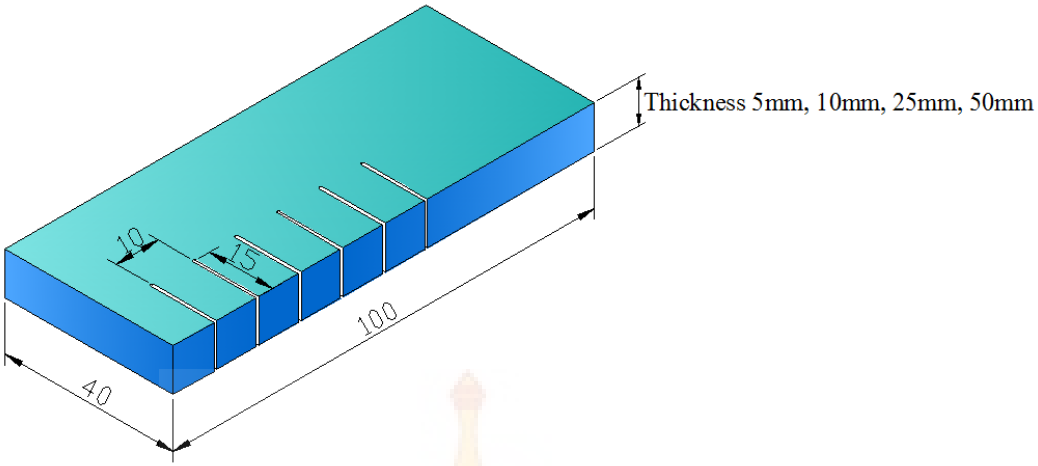
สารไดอิเล็กตริกที่ใช้ในการทดลองสำหรับการตัดด้วยลวดไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่เป็นน้ำกลั่น เนื่องจากมีความหนืดที่ต่ำ และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดี ทั้งนี้น้ำกลั่นที่ใช้ในการทดลองมีสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของน้ำกลั่นที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับที่	รายละเอียดควบคุม	ระดับค่าการควบคุม
1	ความเป็นกรด-ด่าง (pH ที่ 25 องศาเซลเซียส)	5.0-7.0
2	สารละลายของแข็ง (Residual Dissolved Solid)	Max. 1.0 ppm
3	ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity ที่ 25 องศาเซลเซียส)	Max. 1 Microsiemens
4	คลอไรด์ (Chloride)	-
5	เหล็ก (Iron : Fe)	-
6	ทองแดง (Copper : Cu)	-

3.2.3 ทดลองปรับพารามิเตอร์ความเร็วในการตัด (Cutting Speed)

การทดลองปรับความเร็วตัดโดยควบคุมพารามิเตอร์แวดล้อมดังแสดงในตารางที่ 3.1 และคงที่ความต่างศักย์วงจรเปิด ที่ 80 โวลต์ ปรับความเร็วในการตัดเป็น 6 ระดับ คือ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มิลลิเมตรต่อนาที ตัดชิ้นงานที่มีความหนา 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตร ทั้งนี้ความเร็วในการตัดที่ปรับตั้งนั้นเป็นความเร็วสูงสุดในการเดินตัดจริงนั้นเครื่องจักรจะต้องรักษาระยะห่างระหว่างผิววัสดุชิ้นงานกับผิววัสดุลวดอิเล็กโตรดให้คงที่ ในบางครั้งความเร็วในการตัดจริงอาจต่ำกว่าความเร็วสูงสุดที่ปรับตั้งไว้ โดยในการทดลองกำหนดแนวการตัดดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งรอยตัดแต่ละแนวห่างกัน 10 มิลลิเมตร เดินตัดเป็นแนวเส้นตรง 15 มิลลิเมตร จะเหลือขอบชิ้นงาน 35 มิลลิเมตร ซึ่งมากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการโก่งงอที่อาจส่งผลต่อการวัดความกว้างของรอยตัด



รูปที่ 3.3 แนวการตัดบนวัสดุชิ้นงาน

3.2.4 ทดลองปรับพารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Voltage)

การทดลองปรับความต่างศักย์วงจรเปิดโดยควบคุมพารามิเตอร์แวดล้อมดังแสดงในตารางที่ 3.1 และคงที่ความต่างความเร็วในการตัดเป็น 5 มิลลิเมตรต่อนาที ตัดชิ้นงานที่มีความหนา 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตร ด้วยความต่างศักย์วงจรเปิดที่แตกต่างกัน 6 ระดับ ประกอบด้วย 70, 75, 80, 85, 90 และ 95 โวลต์ โดยกำหนดแนวการตัดเหมือนกับการปรับพารามิเตอร์ความเร็วในการตัด

3.2.5 ทดลองปรับพารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพการทำงาน (Duty Factor)

การทดลองปรับพารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพการทำงานเป็นการปรับระดับสัดส่วนระหว่างเวลาเวลาเปิด (On-Time) กับเวลาปิด (Off-Time) ซึ่งปัจจัยประสิทธิภาพการทำงานมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักร ดังแสดงในสมการที่ 1 ซึ่งในการทดลองนี้ควบคุมเงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.4 ทั้งนี้พารามิเตอร์อื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงยังคงควบคุมตามตารางที่ 3.1

$$\text{Duty Cycle} = \left(\frac{\text{On - Time}}{\text{Total Cycle Time}}\right) \text{x } 100(\%) \qquad (1)$$

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลองปรับปัจจัยประสิทธิภาพการทำงาน

ลำดับ	พารามิเตอร์	ค่าที่เลือกใช้	หมายเหตุ
1	เวลาเปิด (On-time : On)	4, 5, 6, 7 และ 8 ไมโครวินาที	คำนวณให้อยู่ในรูปของปัจจัยประสิทธิภาพจากสมการที่ 1
2	เวลาปิด (Off-time : Off)	10, 9, 8, 7, และ 6 ไมโครวินาที	
3	ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor)	29, 36, 43, 50 และ 57 เปอร์เซ็นต์	คำนวณจากสมการที่ 1
4	ความถี่ของการสปาร์ค (Frequency)	71420 ครั้งต่อวินาที	คำนวณจากสมการที่ 2
5	ความต่างศักย์วงจร (Open Voltage)	80 โวลต์	-
6	ความเร็วในการตัด (Cutting Speed)	5 มิลลิเมตรต่อนาที	เป็นความเร็วตัดสูงสุดที่ตั้งไว้

3.2.6 ทดลองปรับพารามิเตอร์ความถี่ (Frequency)

การทดลองปรับพารามิเตอร์ความถี่ของการสปาร์คเป็นการปรับระดับของเวลาเวลาเปิด (On-Time) กับเวลาปิด (Off-Time) ต่อหน่วยเวลารวมในหนึ่งวัฏจักร(Total Cycle Time = On-time + Off-time) ดังแสดงในสมการที่ 2 ซึ่งในการออกแบบการทดลองนี้ จะคงที่ระดับปัจจัยประสิทธิภาพที่ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยในการทดลองนี้ควบคุมเงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.5 ทั้งนี้พารามิเตอร์อื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงยังคงควบคุมตามตารางที่ 3.1

$$\text{Frequency} = \frac{1}{\text{Total Cycle Time}} \quad (2)$$

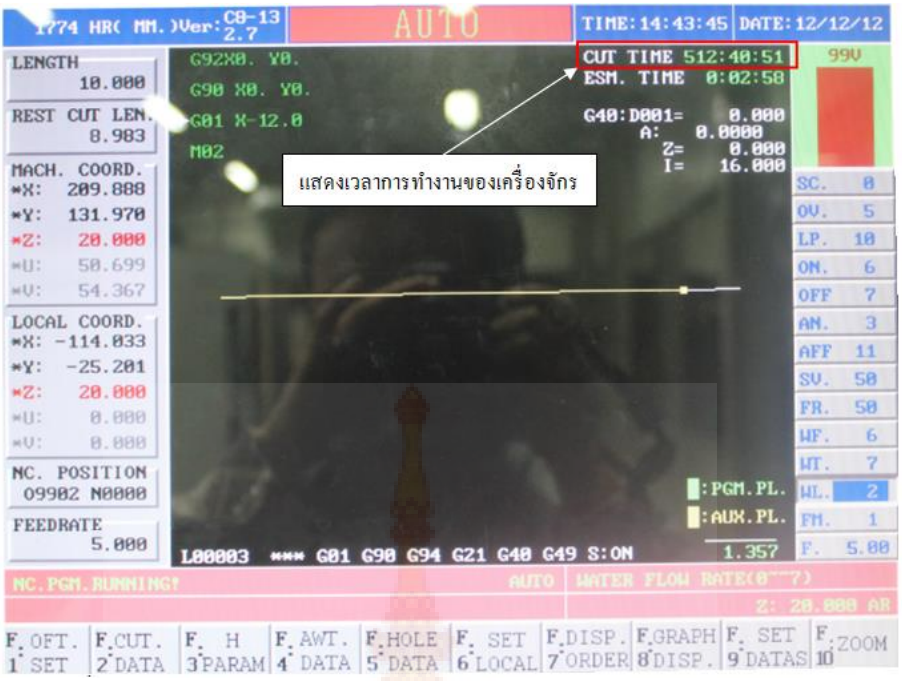
ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ควบคุมในการทดลองปรับความถี่ในการสปาร์ค

ลำดับ	พารามิเตอร์	ค่าที่เลือกใช้	หมายเหตุ
1	เวลาเปิด (On-time : On)	8, 7, 6, 5 และ 4 ไมโครวินาที	คำนวณให้อยู่ในรูปของความถี่ โดยใช้สมการที่ 2
2	เวลาปิด (Off-time : Off)	8, 7, 6, 5 และ 4 ไมโครวินาที	
3	ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor)	50 เปอร์เซ็นต์	คำนวณจากสมการที่ 1
4	ความถี่ของการสปาร์ค (Frequency)	62500, 71429, 83333, 100000 และ 125000 ครั้งต่อวินาที	คำนวณจากสมการที่ 2
5	ความต่างศักย์วงจร (Open Voltage)	80 โวลต์	
6	ความเร็วในการตัด (Cutting Speed)	5 มิลลิเมตรต่อนาที	เป็นความเร็วตัดสูงสุดที่ตั้งไว้

3.2.7 การบันทึกประสิทธิภาพการทำงาน

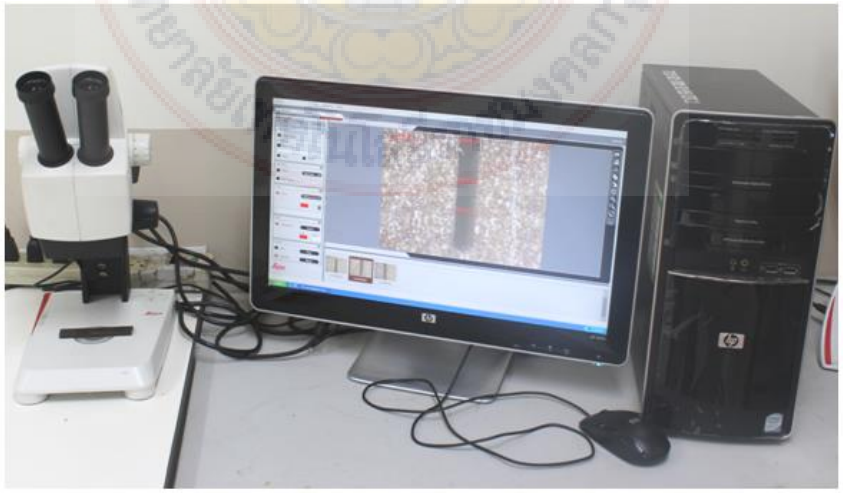
การบันทึกประสิทธิภาพการทำที่เกิดขึ้นจากการตัดด้วยลวดไฟฟ้าจากการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ในรูปของความเร็วในการตัด และความกว้างของรอยตัด

1) ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) สามารถปรับตั้งและควบคุมความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ตัดวัสดุชิ้นงานมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที ทั้งนี้ความเร็วที่เกิดขึ้นจากการตัดชิ้นงานจริงมักจะต่ำกว่าความเร็วสูงสุด เนื่องจากในการตัดด้วยลวดไฟฟ้าเป็นการทำให้เกิดการสปาร์คจนเกิดความร้อนส่งผลให้วัสดุชิ้นงานและวัสดุเส้นลวดเกิดการสึกกร่อนภายใต้การปกคลุมของสารไดอิเล็กตริกที่ทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ทั้งนี้ในการสปาร์คดังกล่าวจะมีช่องว่างขนาดเล็กระหว่างชิ้นงานกับวัสดุอิเล็กโตรดที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยแรงดันไฟฟ้า โดยมีการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย Servo Voltage ดังนั้นเมื่อเส้นลวดเข้าใกล้ชิ้นงานมากเกิดไปจะทำให้แรงดันไฟฟ้าต่ำ ระบบ Servo ควบคุมความเร็วในการตัดให้ช้าลง ดังนั้นความเร็วในการตัดที่แท้จริงจึงสามารถบันทึกระยะทางที่ลวดเดินตัดหารด้วยเวลาที่แท้จริงในการตัดซึ่งแสดงอยู่บนจอแสดงผลของเครื่องจักร ดังแสดงในรูปที่ 3.4

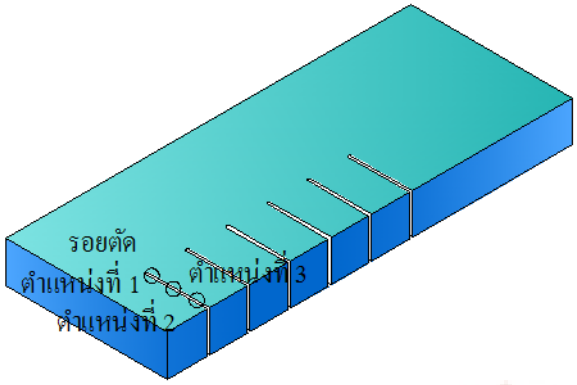


รูปที่ 3.4 หน้าจอแสดงการทำงานของเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า ยี่ห้อ Aristech รุ่น CW30

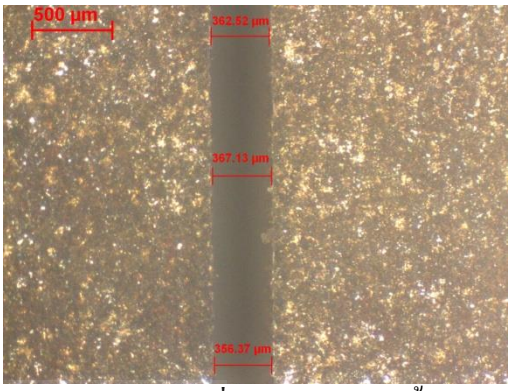
2) ความกว้างของรอยตัด (Kerf) เป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากความรุนแรงของการกัดเซาะซึ่งส่งผลให้เกิดความกว้างของรอยตัดที่มากกว่าขนาดความโตของเครื่องมือตัดในลักษณะเดียวกับการตัดด้วยใบเลื่อย ลวดอิเล็กโตรดที่ใช้ในการทดลองเป็นทองเหลืองมีขนาด 0.25 มิลลิเมตร ให้ขนาดความกว้างของรอยตัดเล็กมากจนไม่สามารถวัดด้วยเครื่องมือทั่วไป ในที่นี้จึงเลือกใช้กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) ยี่ห้อ Liaca รุ่น EZ40 ทำการส่องขยายและวัดความกว้างของรอยตัด ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยทำการวัดจากความกว้างรอยตัดทั้งด้านบน และด้านล่างของชิ้นงานแล้วคิดเป็นค่าเฉลี่ยของความกว้างรอยตัด (ในแต่ละรอยตัดจะทำการวัดค่า 3 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 3 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 3.6 แล้วจึงนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย)



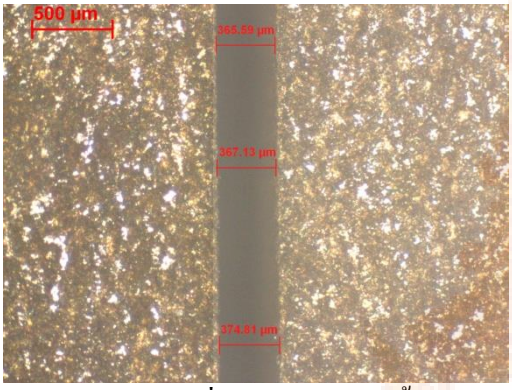
รูปที่ 3.5 การวัดความกว้างรอยตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์



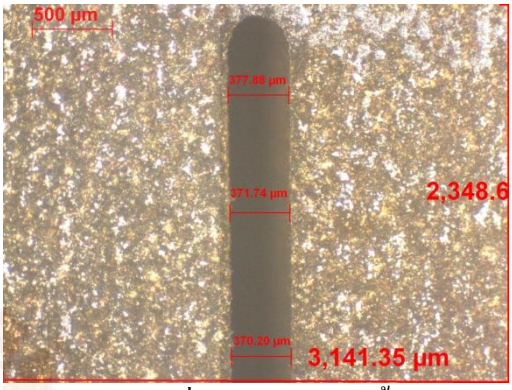
ก) ตำแหน่งการวัดความกว้างรอยตัด



ข) ตำแหน่งวัดที่ 1 ทำการวัด 3 ครั้ง



ค) ตำแหน่งวัดที่ 2 ทำการวัด 3 ครั้ง



ง) ตำแหน่งวัดที่ 3 ทำการวัด 3 ครั้ง

รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวัดความกว้างรอยตัด

3.2.8 การประเมินคุณภาพของการตัดด้วยลวดไฟฟ้า

การประเมินคุณภาพของวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า SKD 11 ที่ผ่านกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้า ประเมินจากการความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานและผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด

1) ความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน (Slope) เป็นผลกระทบที่เกิดจากการสปาร์คซึ่งทำให้ทั้งวัสดุชิ้นงาน และวัสดุอิเล็กโตรดเกิดการสึกกร่อน จึงทำให้ขนาดของเส้นลวดที่เคลื่อนที่ในสองทิศทาง คือเคลื่อนที่ในแนวการเดินตัด (Cutting Speed) และในแนวดิ่งทำให้ขนาดของเส้นลวดที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุชิ้นงานจากผิวด้านบนและด้านล่างมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้ขนาดความกว้างของรอยตัดที่ผิวด้านบนและผิวด้านล่างไม่เท่ากัน ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณหาค่ามุมความหลักตรีโกณมิติจะทำให้ทรางถึงความลาดเอียงดังแสดงในสมการที่ 4

$$\text{Slope}(^{o}) = \tan^{(-1)}[(D-d)/2)/H] \qquad (4)$$

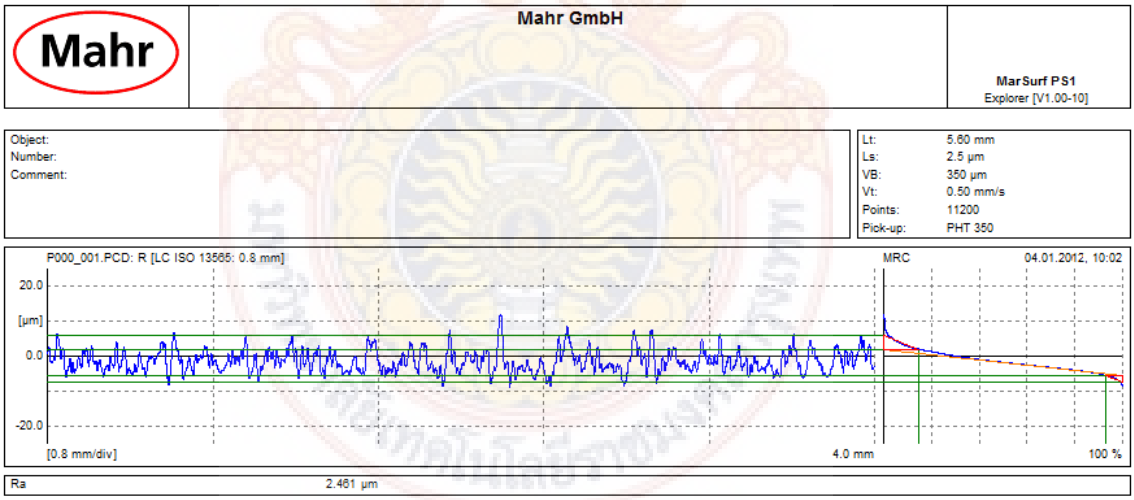
เมื่อ D คือขนาดความกว้างของรอยตัดด้านบน

d คือขนาดความกว้างของรอยตัดด้านล่าง

H คือความหนาของวัสดุชิ้นงานที่ทำการตัด

2) ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra : Arithmetical mean roughness) และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz : Ten-point mean roughness) ชิ้นงานเมื่อทำการวัดความกว้างของรอยตัดเรียบร้อยแล้ว จะถูกตัดออกเพื่อวัดความหยาบผิวงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น PS1 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยทำการวัดความหยาบผิวฟังชั่น Ra และ Rz ใช้ระยะ Cut off 5 x 0.8 มิลลิเมตร (DIN EN ISO 4288) ก่อนทำการวัดต้องเตรียมพื้นผิววัสดุชิ้นงานด้วยการล้างคราบสารไดอิเล็กตริกด้วยแอลกอฮอร์และทำการเปล่าลมร้อนเพื่อไล่ความชื้นแล้วจึงวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ทำการวัดจำนวน 5 ตำแหน่ง แล้วจึงนำมาคิดค่าเฉลี่ย

รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น PS1



รูปที่ 3.8 ลักษณะการรายงานค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจากการวัดด้วย
เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Mahr รุ่น PS1 Cut off 5 x 0.8 มิลลิเมตร

3.3 สรุป

การดำเนินการทดลองตัดวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้างานเย็น SKD 11 ที่นิยมใช้เป็นชิ้นส่วนคมตัดในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์โลหะ ซึ่งวัสดุชิ้นงานผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลด้วยกระบวนการทางความร้อน (ชุบแข็ง) มีความแข็งในสภาวะการทดลอง 60-62 HRC มีความหนา 4

ระดับ ตั้งแต่ 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตร ในการทดลองใช้ลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ตัดภายใต้การปกคลุมของสารไดอิเล็กตริกที่เป็นน้ำกลั่น ตลอดจนมีการระบายความร้อนและขจัดเศษโดยการฉีดน้ำกลั่นผ่านชุดประคองลวด (Nozzle) ด้วยแรงดันน้ำ 25 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตรจากด้านบน และ 75 กิโลกรัมต่อตารางเซ็นติเมตรจากด้านล่าง โดยการปรับพารามิเตอร์เริ่มจากการปรับความเร็วในการตัดเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อความสามารถตัด และผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงาน เพื่อกำหนดสภาวะเงื่อนไขควบคุมในการทดลอง จากนั้นจึงทำการปรับพารามิเตอร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ปัจจัยประสิทธิภาพการทำงานในหนึ่งวัฏจักรการสปาร์ค ซึ่งคิดจากร้อยละของเวลาเปิดต่อเวลารวมในหนึ่งวัฏจักรการสปาร์ค และทำการปรับพารามิเตอร์ความถี่ของการสปาร์ค ซึ่งคิดจากจำนวนครั้งของการสปาร์คในระยะเวลาหนึ่งวินาที โดยในทุกการทดลองจะควบคุมพารามเตอร์ให้คงที่และมีการปรับเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์เพียงตัวเดียวเท่านั้น

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การศึกษาประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 ด้วยลวดไฟฟ้า จากการปรับพารามิเตอร์อันประกอบด้วย ความต่างศักย์ (Voltage) ปัจจัยประสิทธิภาพของการทำงานในหนึ่งวัฏจักร (Duty Cycle) และความถี่ (Frequency) โดยประเมินผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงานจาก ความเร็วในการตัด (Cutting speed) และความกว้างของรอยตัด (Kerf) ตลอดจนประเมินคุณภาพงานจากความลาดเอียงของผิววัสดุชิ้นงาน (Slope) ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz) ภายใต้การปกคลุมและระบายความร้อน ตลอดจนขจัดเศษด้วยสารไดอิเล็คตริกที่ใช้เป็นน้ำกลั่น (Di- Ionize) ซึ่งวัสดุชิ้นงานผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติทางกล ด้วยกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็ง มีความหนา 4 ระดับ คือ 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตร

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งตามพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา และผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการทำงาน โดยประเมินอยู่ในรูปของ ความเร็วในการตัด ความกว้างของรอยตัด ความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน ความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz

4.1.1 พารามิเตอร์ความเร็วในการตัด (Cutting Speed)

พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดเป็นการทดสอบความสามารถในการตัดวัสดุที่มีความหนาต่างกัน โดยปรับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 สำหรับสำหรับความเร็วในการตัด ตารางที่ 4.2 สำหรับความกว้างรอยตัด ตารางที่ 4.3 สำหรับความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน ตารางที่ 4.4 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และตารางที่ 4.5 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Rz

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความเร็วในการตัด

ความเร็วตัดสูงสุด (มม./นาที)	ความเร็วในการตัดจริง (มม/นาที)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
1	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.00	2.00	2.00	1.34
3	3.00	3.00	3.00	1.79
4	4.00	4.00	3.61	1.81
5	5.00	5.00	3.75	1.82
6	6.00	6.00	3.81	1.84

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อกว้างรอยตัด

ความเร็วสูงสุด (มม./นาที)	ความกว้างรอยตัด (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
1	380.86	376.96	389.83	371.18
2	379.96	375.89	376.78	363.04
3	377.20	372.80	362.32	360.48
4	373.12	365.44	354.16	359.38
5	367.81	356.11	352.80	358.25
6	361.52	346.14	349.92	357.48

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน

ความเร็วสูงสุด (มม./นาที)	ความลาดเอียง (ลิบดา)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
1	1.70	1.23	0.80	0.79
2	1.41	1.51	0.67	0.65
3	1.47	1.61	0.94	0.76
4	2.50	1.67	1.06	0.77
5	3.40	1.89	1.27	0.67
6	4.13	2.29	1.29	0.66

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra

ความเร็วสูงสุด (มม./นาที)	ความหยาบผิวเฉลี่ย Ra (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
1	2.55	2.81	2.80	2.72
2	2.74	2.59	2.65	2.64
3	2.77	2.48	2.47	2.52
4	2.67	2.49	2.40	2.47
5	2.63	2.55	2.43	2.46
6	2.62	2.72	2.45	2.47

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz

ความเร็วสูงสุด (มม./นาที)	ความหยาบผิวเฉลี่ยเสิบจุด Rz (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
1	17.40	17.83	17.52	16.83
2	16.80	16.67	16.27	16.70
3	16.27	15.37	15.37	16.10
4	15.90	15.55	15.20	15.80
5	15.77	15.80	15.73	16.77
6	16.27	16.90	16.33	17.50

4.2.2 พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Voltage)

พารามิเตอร์ต่างศักย์เป็นการทดสอบความสามารถในการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น SKD 11 โดยปรับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1 และปรับระดับต่างศักย์วงจรเปิดที่แตกต่างกัน 6 ระดับ ประกอบด้วย 70, 75, 80, 85, 90 และ 95 โวลต์ ทำการตัดวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 สำหรับสำหรับความเร็วในการตัด ตารางที่ 4.7 สำหรับความกว้างรอยตัด ตารางที่ 4.8 สำหรับความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานตารางที่ 4.9 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และตารางที่ 4.10 สำความหยาบผิวเฉลี่ย Rz

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความเร็วในการตัด

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความเร็วในการตัด (มม/นาที)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
70	5.00	5.00	2.79	1.27
75	5.00	5.00	3.18	1.49
80	5.00	5.00	3.46	1.68
85	5.00	5.00	3.67	1.83
90	5.00	5.00	3.83	1.94
95	5.00	5.00	3.96	2.04

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อกว้างรอยตัด

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความกว้างรอยตัด (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
70	367.99	363.21	360.21	358.95
75	363.67	360.30	358.30	357.07
80	361.84	358.12	357.12	354.08
85	358.09	355.08	353.93	351.13
90	355.74	353.23	351.66	350.66
95	353.02	349.68	351.63	347.17

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความลาดเอียง (ลิบดา)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
70	0.83	0.81	0.56	0.71
75	0.57	0.91	0.35	0.59
80	0.72	1.06	0.69	0.56
85	0.88	1.31	0.86	0.86
90	0.86	1.37	0.69	0.82
95	1.11	1.26	0.98	0.96

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความหยาบผิวเฉลี่ย Ra (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
70	2.54	2.58	2.47	2.37
75	2.69	2.67	2.59	2.47
80	2.83	2.82	2.76	2.63
85	2.93	2.88	2.79	2.64
90	2.86	2.84	2.85	2.67
95	2.73	2.72	2.72	2.63

ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความหยาบผิวเฉลี่ยเสิบจุด Rz (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
70	15.20	16.37	16.30	14.50
75	15.93	16.42	16.60	15.30
80	15.97	16.57	16.40	15.63
85	16.30	16.52	16.53	15.87
90	16.27	16.53	17.03	15.83
95	16.15	16.47	17.33	15.87

4.2.3 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor)

พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพเป็นการทดสอบความสามารถในการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น SKD 11 โดยปรับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.4 และควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆ ตามตารางที่ 3.1 ทำการตัดวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตร สามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.11 สำหรับสำหรับความเร็วในการตัด ตารางที่ 4.12 สำหรับความกว้างรอยตัด ตารางที่ 4.13 สำหรับความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานตารางที่ 4.14 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และตารางที่ 4.15 สำความหยาบผิวเฉลี่ย Rz

ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความเร็วในการตัด

ปัจจัยประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)	ความเร็วในการตัด (มม/นาที)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
29	5.00	5.00	2.18	1.03
36	5.00	5.00	2.75	1.29
43	5.00	5.00	3.36	1.61
50	5.00	5.00	3.80	1.97
57	ไม่สามารถตัดได้	5.00	3.93	2.26

ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อกว้างรอยตัด

ปัจจัยประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)	ความกว้างรอยตัด (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
29	342.12	331.63	344.09	348.01
36	356.19	341.70	349.55	356.42
43	359.70	351.79	351.00	359.79
50	362.00	357.91	350.91	358.60
57	ไม่สามารถตัดได้	362.61	352.53	358.00

ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน

ปัจจัยประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)	ความลาดเอียง (ลิบดา)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
29	3.23	0.31	0.24	0.34
36	3.06	0.55	0.38	0.34
43	2.17	0.65	0.89	0.58
50	1.99	1.89	0.93	0.76
57	ไม่สามารถตัดได้	1.79	1.17	0.89

ตารางที่ 4.14 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra

ปัจจัยประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)	ความหยาบผิวเฉลี่ย Ra (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
29	2.24	2.39	2.46	2.42
36	2.47	2.42	2.62	2.46
43	2.63	2.55	2.65	2.52
50	2.72	2.57	2.79	2.60
57	ไม่สามารถตัดได้	3.04	3.00	2.61

ตารางที่ 4.15 พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz

ปัจจัยประสิทธิภาพ	ความหยาบผิวเฉลี่ยเสิบจุด Rz (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
29	14.63	15.40	15.63	15.30
36	16.00	15.40	15.87	15.60
43	16.30	15.47	16.20	15.80
50	16.87	16.00	17.23	16.00
57	ไม่สามารถตัดได้	18.80	18.47	16.30

4.2.4 พารามิเตอร์ความถี่ (Frequency)

พารามิเตอร์ความถี่เป็นการทดสอบความสามารถในการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น SKD 11 โดยปรับพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.5 และควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆ ตามตารางที่ 3.1 ทำการตัดวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตร สามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.16 สำหรับสำหรับความเร็วในการตัด ตารางที่ 4.17 สำหรับความกว้างรอยตัด ตารางที่ 4.18 สำหรับความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานตารางที่ 4.19 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และตารางที่ 4.20 สำความหยาบผิวเฉลี่ย Rz

ตารางที่ 4.16 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อความเร็วในการตัด

ความถี่ในการสปาร์ค (ครั้งต่อวินาที)	ความเร็วในการตัด (มม/นาที)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
62500	ไม่สามารถตัดได้	5.00	4.09	2.02
71429	5.00	5.00	3.87	1.94
83333	5.00	5.00	3.32	1.78
100000	5.00	5.00	3.00	1.62
125000	5.00	5.00	2.94	1.45

ตารางที่ 4.17 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อกว้างรอยตัด

ความถี่ในการสปาร์ค (ครั้งต่อวินาที)	ความกว้างรอยตัด (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
62500	ไม่สามารถตัดได้	366.10	358.38	370.71
71429	371.63	360.64	354.58	369.09
83333	355.26	349.20	349.12	357.58
100000	349.72	339.82	344.34	352.25
125000	342.98	330.60	338.03	347.10

ตารางที่ 4.18 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน

ความถี่ในการสปาร์ค (ครั้งต่อวินาที)	ความลาดเอียง (ลิบดา)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
62500	ไม่สามารถตัดได้	2.92	1.41	0.96
71429	4.09	1.51	1.34	0.86
83333	1.47	1.00	1.03	0.79
100000	0.58	0.93	0.45	0.55
125000	0.52	1.00	0.65	0.62

ตารางที่ 4.19 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra

ความถี่ในการสปาร์ค (ครั้งต่อวินาที)	ความหยาบผิวเฉลี่ย Ra (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
62500	ไม่สามารถตัดได้	2.86	2.84	2.71
71429	2.84	2.75	2.74	2.65
83333	2.75	2.67	2.66	2.45
100000	2.62	2.59	2.57	2.38
125000	2.39	2.45	2.37	2.35

ตารางที่ 4.20 พารามิเตอร์ความถี่ที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz

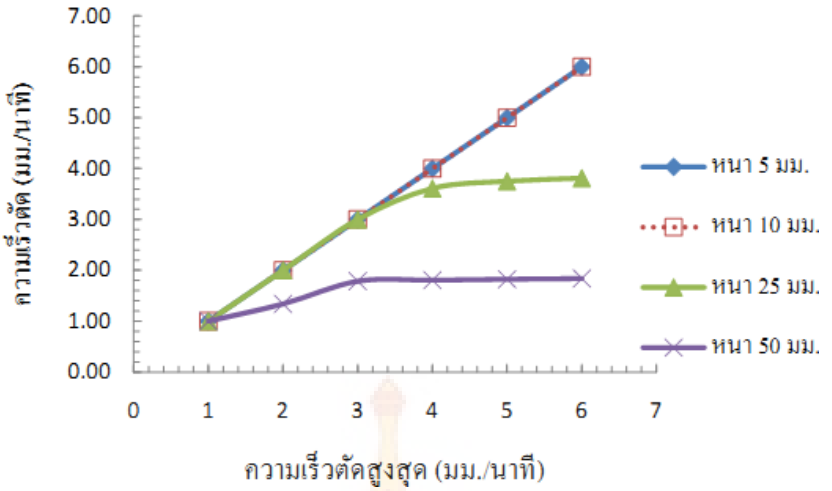
ความถี่ในการสปาร์ค (ครั้งต่อวินาที)	ความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz (ไมโครเมตร)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
62500	ไม่สามารถตัดได้	18.77	17.57	17.80
71429	17.13	17.10	18.57	16.50
83333	16.57	15.83	16.80	15.70
100000	16.23	14.97	15.77	15.50
125000	14.27	15.03	15.43	15.80

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

วิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งวิเคราะห์และอภิปรายผลตามพารามิเตอร์ที่ทำการปรับตั้งค่าครั้งละหนึ่งตัวแปร อันประกอบด้วย ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Voltage) ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) และความถี่ในการสปาร์ค (Frequency) โดยวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการแปรรูปจาก ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) และกว้างของรอยตัด (Kerf) ตลอดจนผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานจาก ความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน (Slope) ความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz ทั้งนี้จากการออกแบบการทดลองทำให้เกิดพารามิเตอร์ที่ได้นำมาวิเคราะห์เพิ่มเติมอีกหนึ่งตัวแปรคือ ความหนาของวัสดุชิ้นงานที่มีผลต่อความสามารถในการตัด ซึ่งในการทดลองใช้ระดับความหนาที่ 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตร

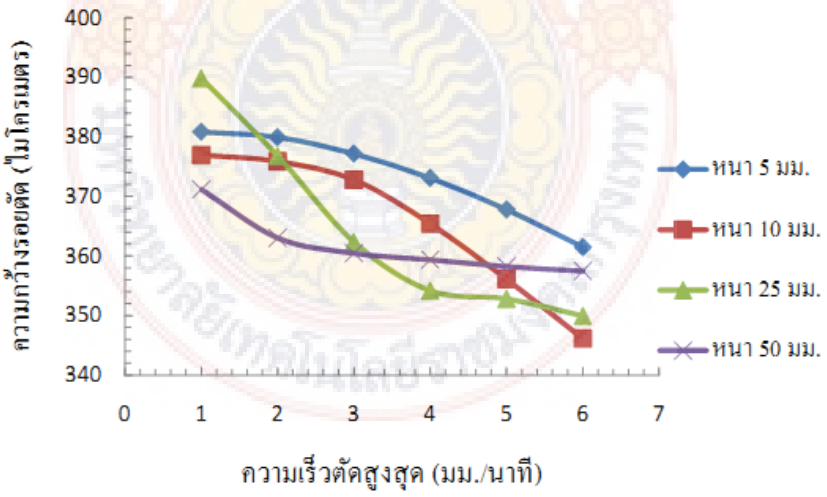
4.2.1 วิเคราะห์พารามิเตอร์ความเร็วในการตัด (Cutting Speed)

จากการทดลองเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปโดยการปรับตั้งความเร็วตัดสูงสุดที่แตกต่างกัน 6 ระดับ จาก 1 ถึง 6 มิลลิเมตรต่อนาที (เมื่อระดับความเร็วในการตัดมากว่า 6 มิลลิเมตรต่อนาที เส้นลวดจะขาดขณะทำการตัดวัสดุชิ้นงาน) ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกับ พบว่าเมื่อความเร็วตัดสูงสุดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นแบบแปรผันตรงสำหรับวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 5 และ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เมื่อความหนาของวัสดุชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ความเร็วในการตัดจะลดลง สังเกตุได้จากวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร เมื่อความเร็วตัดสูงสุดมากกว่า 3 มิลลิเมตร ความชันของการแปรผันตามจะลดลง ในส่วนของวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 50 มิลลิเมตรนั้นความชั้นของการเพิ่มขึ้นมีน้อยมาก (ความเร็วในการตัดเป็นความเร็วที่คำนวณจากระยะทางจริงที่ตัดต่อหน่วยเวลาจริงที่ใช้ ส่วนความเร็วตัดสูงสุดนั้นเป็นความเร็วควบคุมที่ยอมให้เครื่องจักรเดินตัด ซึ่งในบางกรณีเครื่องจักรจะไม่สามารถเดินตัดด้วยความเร็วสูงสุดได้เนื่องจากจะต้องรักษาระยะห่างระหว่างผิววัสดุชิ้นงาน กับผิววัสดุเส้นลวดอิเล็กโตรดโดยใช้ระบบเซอร์โวเป็นตัวขับป้อนเพื่อให้เกิดความเสถียรของการอาร์ก)

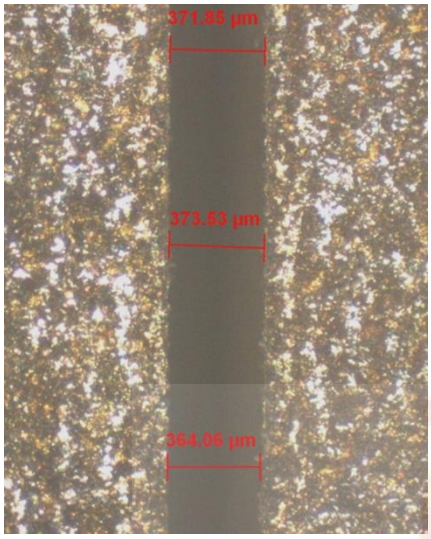


รูปที่ 4.1 ความสามารถในการแปรรูปจากการปรับพารามิเตอร์ความในการตัด

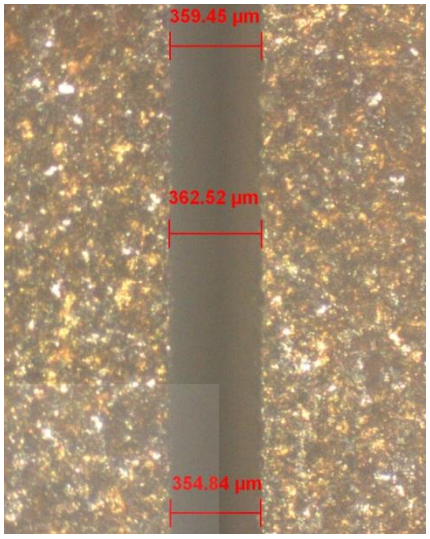
ผลของความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความกว้างรอยตัดลดลง ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.1 ซึ่งผลกระทบของความเร็วในการตัดวัสดุชิ้นงานที่ความหนา 5, 10, 25 และ 50 มิลลิเมตร มีแนวโน้มลดลงที่สัมพันธ์กับตามความเร็วในการตัด ซึ่งเกิดจากความเร็วในที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็วของเส้นลวดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณของการอาร์ก และเมื่อความหนาวัสดุชิ้นงานมากขึ้นจะทำให้ความกว้างของรอยตัดลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของการอาร์กต่อพื้นที่ [7] โดยสามารถสรุปได้ว่าความเร็วในการตัดหรือความหนาที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความหนาแน่นของการอาร์กต่อพื้นที่ต่ำลง จึงทำให้ความกว้างของรอยตัดลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



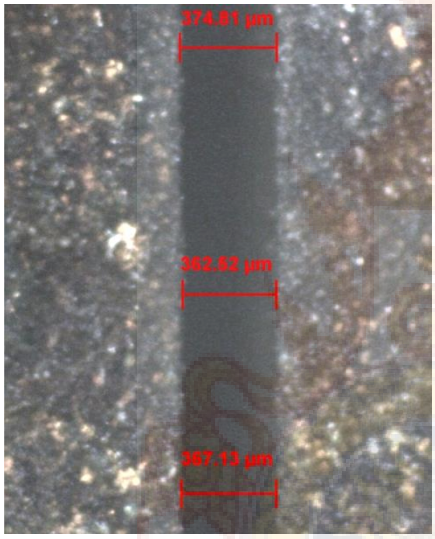
รูปที่ 4.2 ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความกว้างรอยตัด



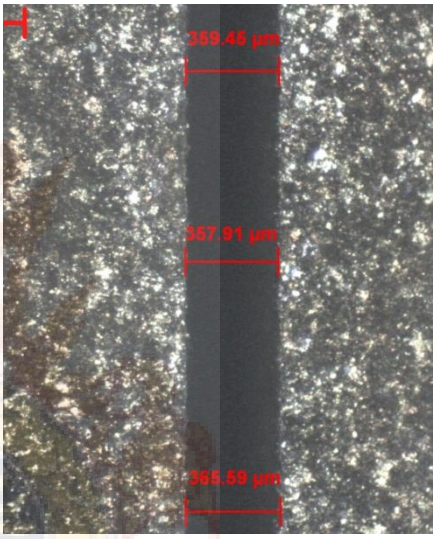
ก) ความเร็วตัด 1 มม./นาที ความหนา 5 มม.



ข) ความเร็วตัด 6 มม./นาที ความหนา 5 มม.



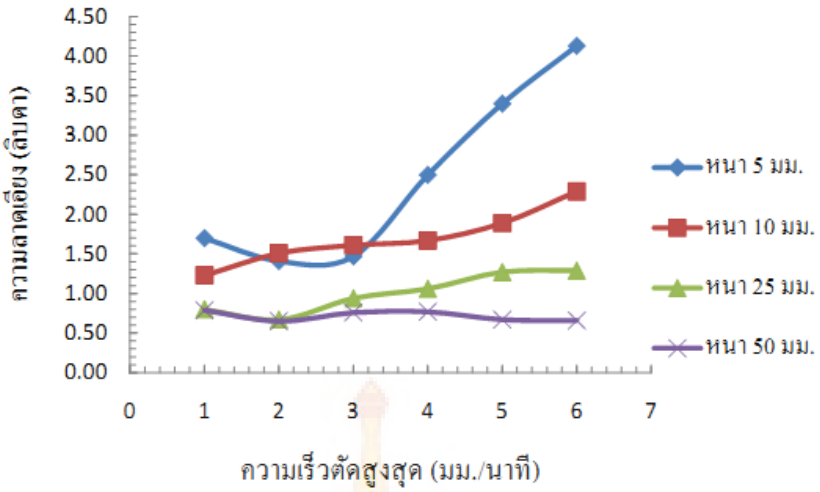
ค) ความเร็วตัด 1 มม./นาที ความหนา 50 มม.



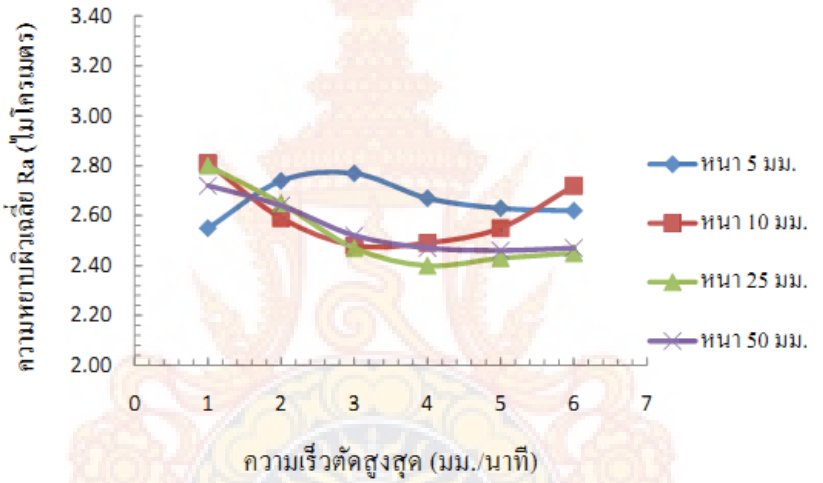
ง) ความเร็วตัด 6 มม./นาที ความหนา 50 มม.

รูปที่ 4.3 ความกว้างรอยตัดบนวัสดุชิ้นงาน

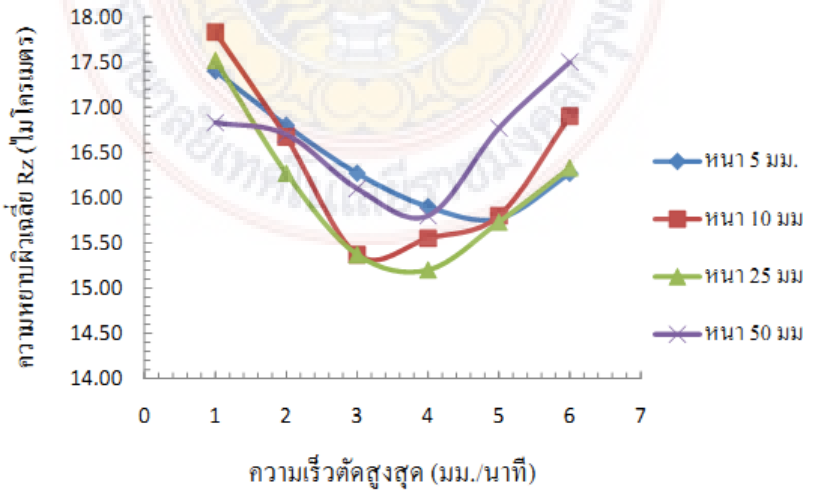
ผลของความเร็วในการตัดที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความลาดเอียงของผิวงานซึ่งคำนวณจากค่าความต่างของความกว้างรอยตัดผิววัสดุชิ้นงานด้านบน กับความกว้างรอยตัดผิววัสดุชิ้นงานด้านล่าง (ในการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าเส้นลวดจะถูกป้อนให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ซึ่งเมื่อเกิดการอาร์กจะทำให้เกิดการสึกกร่อนของเส้นลวดจึงทำให้ขนาดความโตของเส้นลวดที่เคลื่อตัวผ่านผิววัสดุชิ้นงานด้านบนมีขนาดโตกว่าด้านล่าง) และความหนาของวัสดุชิ้นงานตามหลักทางคณิตศาสตร์ตรีโกณมิติ สามารถแสดงค่าความลาดเอียงของผิววัสดุชิ้นงานที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วในการตัดดังรูปที่ 4.4 จากการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วในการตัดสูงขึ้น ความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานจะเพิ่มตาม ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงความหนาของวัสดุชิ้นงานพบว่า วัสดุชิ้นงานที่บางจะเกิดความลาดเอียงที่สูงกว่าวัสดุชิ้นงานที่หนา



รูปที่ 4.4 ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน

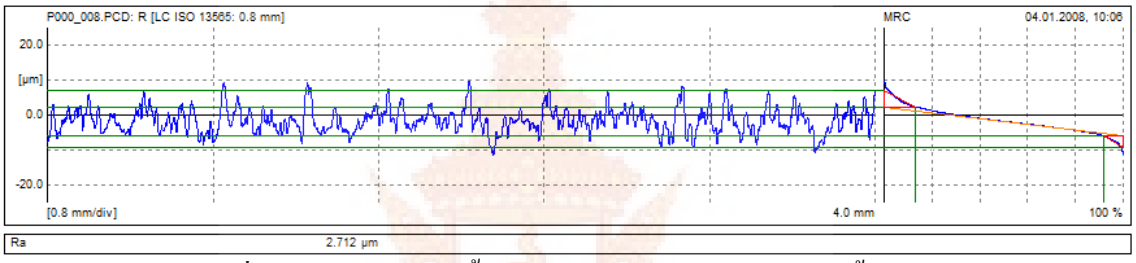


รูปที่ 4.5 ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra

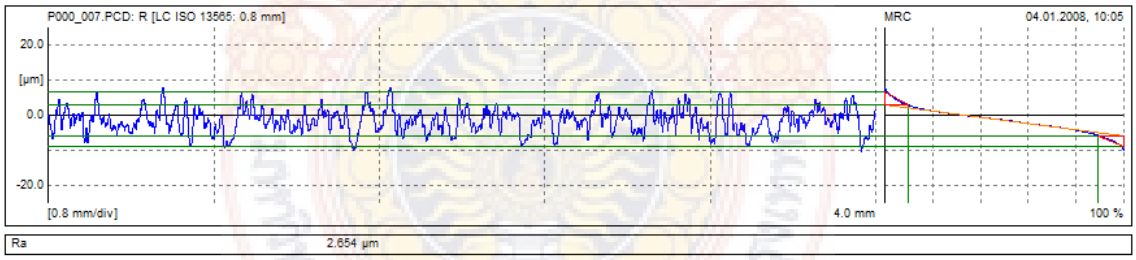


รูปที่ 4.6 ความเร็วในการตัดที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Rz

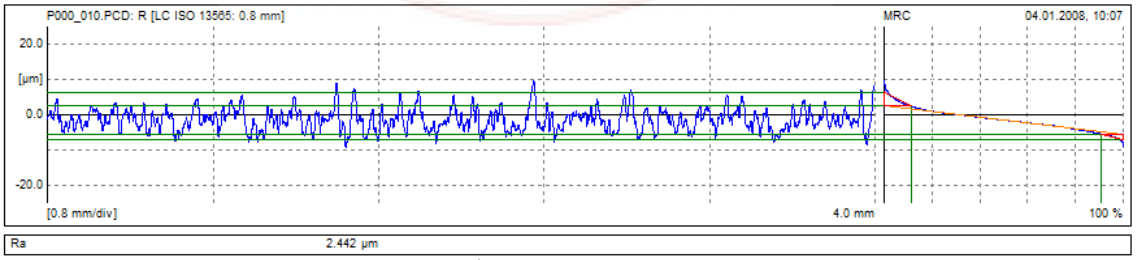
ผลของความเร็วในการตัดที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz จากการทดลองพบว่า มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นแบบพาราโบล่าหงายที่มีความโค้งต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.5 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และรูปที่ 4.6 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz (การทดลองนี้เป็นการตัดแบบหยาบ Rough Cutting) ทั้งนี้จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวจากการสร้างพื้นผิวจำลอง (Profile) ของวัสดุชิ้นงานโดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวยี่ห้อ Marh รุ่น PS1 เพื่อเปรียบเทียบถึงลักษณะผิวงานที่ความเร็วตัดต่างๆ กันพบว่ามีลักษณะพื้นผิวที่เกิดจากการกัดกร่อนโดยมีสภาวะของเนื้องาน (Materials Ratio Curve : MRC) แตกต่างกันน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 และได้แสดงลักษณะพื้นผิวเพื่อเปรียบเทียบเพิ่มเติมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังการขยายต่ำ (35 เท่า) และกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนส่องกราด (SEM) กำลังการขยาสูง (500 เท่า) ดังแสดงในรูปที่ 4.10



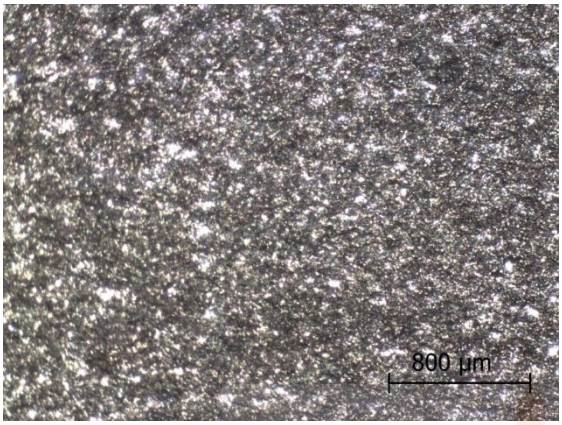
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ความเร็วตัด 1 มม./นาที ความหนา 25 มิลลิเมตร



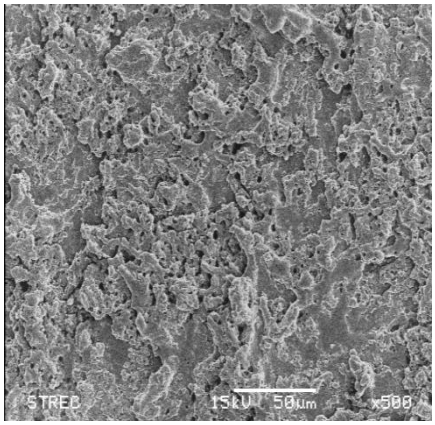
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ความเร็วตัด 3 มม./นาที ความหนา 25 มิลลิเมตร



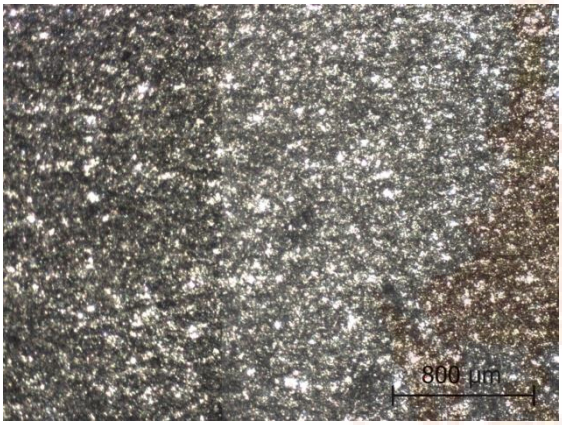
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ความเร็วตัด 5 มม./นาที ความหนา 25 มิลลิเมตร



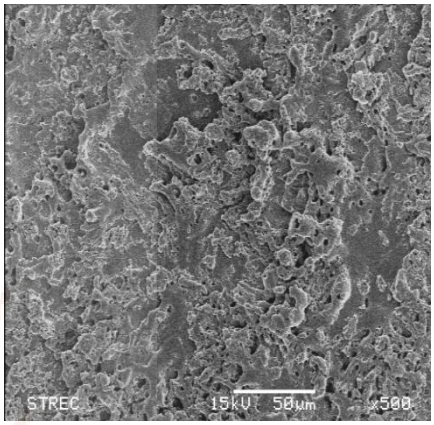
ก) ความเร็วตัด 1 มม/นาที, หนา 25 มม., ขยาย 35 เท่า



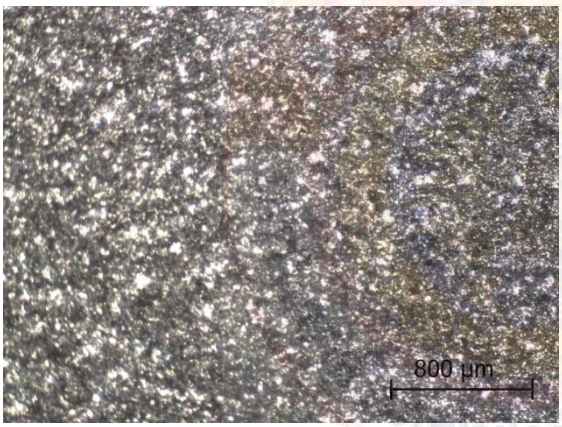
ข) ความเร็วตัด 1 มม/นาที, หนา 25 มม., ขยาย 500 เท่า



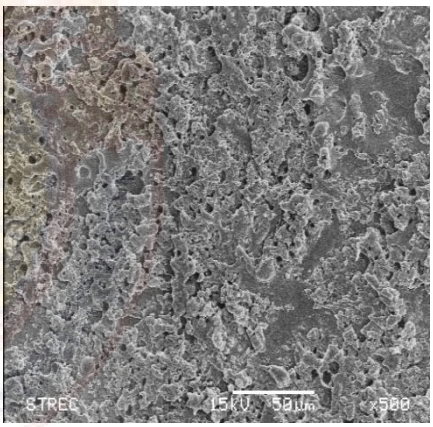
ค) ความเร็วตัด 3 มม/นาที, หนา 25 มม., ขยาย 35 เท่า



ง) ความเร็วตัด 3 มม/นาที, หนา 25 มม., ขยาย 500 เท่า



จ) ความเร็วตัด 5 มม/นาที, หนา 25 มม., ขยาย 35 เท่า



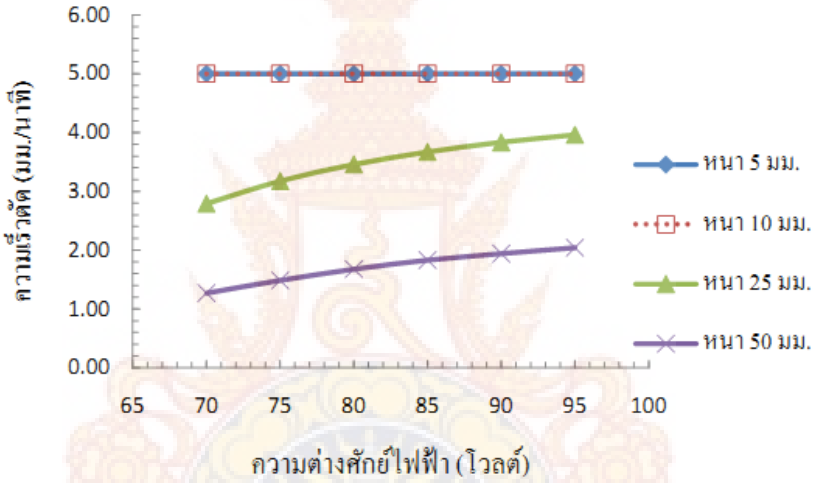
ฉ) ความเร็วตัด 5 มม/นาที, หนา 25 มม., ขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าที่ความเร็วในการตัดต่างกัน

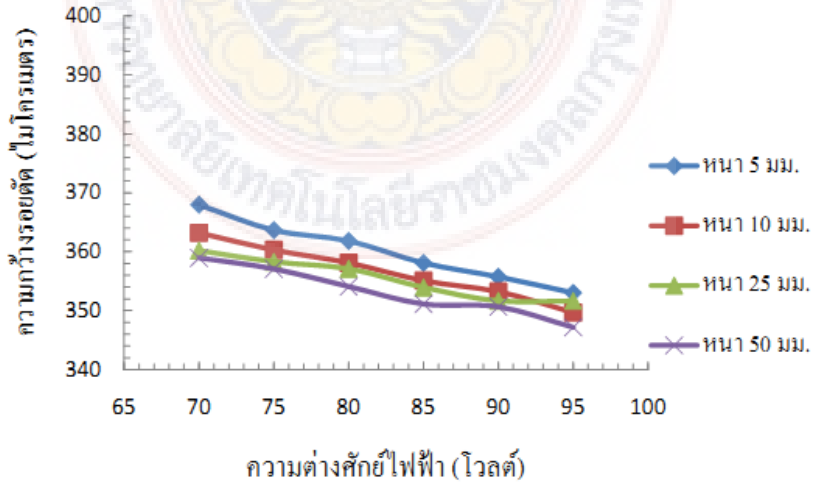
จากรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิว (Profile) จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ส่วน (Sample Length) แต่ละส่วนจะมีความยาว เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งมีระยะความยาว 0.8 มิลลิเมตร จะเท่ากับความยาวของ 800 ไมโครเมตร บนภาพกำลังการขยายต่ำ โดยความสูงของพื้นผิวจากจุดต่ำสุด (Valley) ถึงจุดสูงสุด (Peak) จำมีกำลังขยายประมาณ 500 เท่า ดังนั้นลักษณะพื้นผิวของจุดต่ำสุดและสูงสุดจะมีลักษณะเหมือนกับภาพกำลังการขยายสูง

4.2.2 วิเคราะห์พารามิเตอร์ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Voltage)

การทดลองปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดโดยการปรับระดับค่าการทดลองที่ต่างกัน 6 ระดับ จาก 70 ถึง 95 โวลต์ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการแปรรูปวัสดุชิ้นงาน โดยประเมินจากความเร็วในการตัด พบว่า วัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 5 และ 10 มิลลิเมตร จะมีความเร็วในการตัดเท่ากับความเร็วตัดสูงสุดของเครื่องที่ตั้งไว้ คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สำหรับชิ้นงานที่มีความหนา 25 และ 50 มิลลิเมตร พบว่าระดับความเร็วในการตัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด นอกจากนี้ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกว้างรอยตัดของวัสดุชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของความเร็วในการตัดและการลดลงของความกว้างรอยตัดเกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่สูงจะทำให้เกิดการกระจายตัวของการอาร์กที่สม่ำเสมอ [7] และมีความรุนแรง [2]

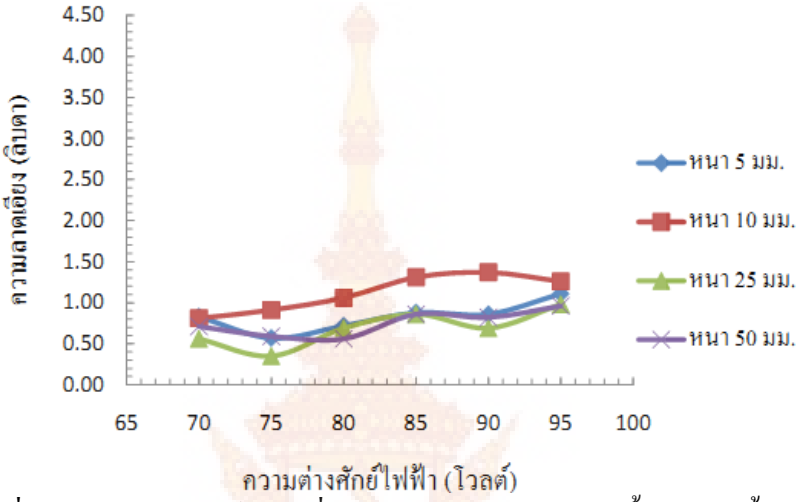


รูปที่ 4.11 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความเร็วในการตัด



รูปที่ 4.12 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความกว้างรอยตัด

ในกรณีของการปรับความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความลาดเอียงของพื้นผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดความแตกต่างของความกว้างรอยตัดด้านบน และด้านล่างมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าที่สูงทำให้การกระจายตัวของการอาร์กสม่ำเสมอจึงทำให้ความกว้างรอยตัดลดลง แต่จะทำให้การสึกกร่อนของเส้มลวดมีมากขึ้น จึงทำให้ความกว้างของรอยตัดด้านบนกับด้านล่างมีความต่างมากขึ้น



รูปที่ 4.13 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน

ก) ข) ค) ง)

ก) รอยตัดด้านบนความต่างศักย์วงจรไฟฟ้า 70 โวลต์ ความหนาของวัสดุชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร

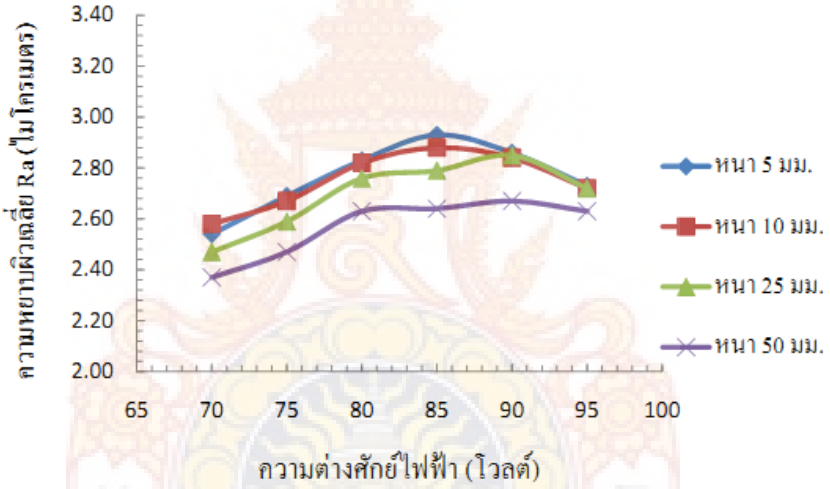
ข) รอยตัดด้านล่างความต่างศักย์วงจรไฟฟ้า 70 โวลต์ ความหนาของวัสดุชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร

ค) รอยตัดด้านบนความต่างศักย์วงจรไฟฟ้า 95 โวลต์ ความหนาของวัสดุชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร

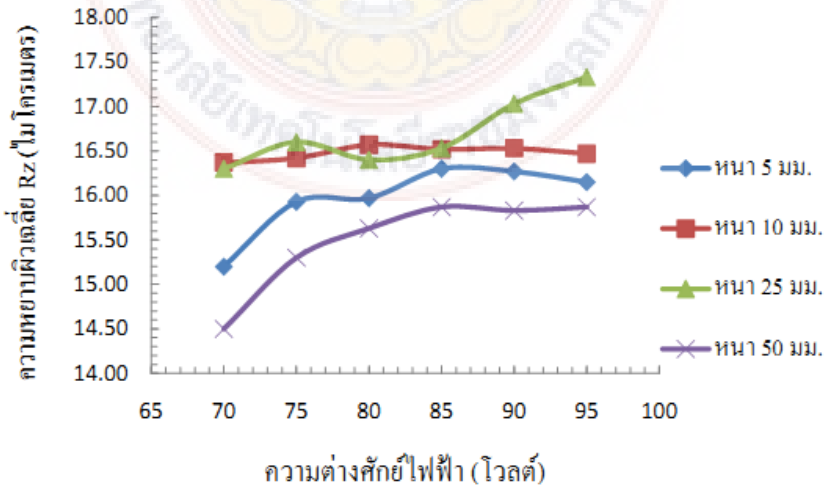
ง) รอยตัดด้านล่างความต่างศักย์วงจรไฟฟ้า 95 โวลต์ ความหนาของวัสดุชิ้นงาน 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.14 ลักษณะความกว้างรอยตัดด้านบนกับด้านล่างที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดต่างกัน

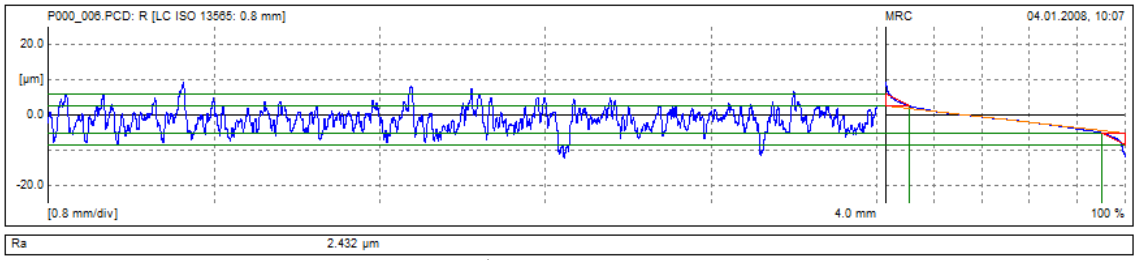
จากการทดลองปรับระดับความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าเพื่อศึกษาผลกระทบต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz พบว่า ความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลกระทบโดยก่อให้เกิดความหยาบผิวที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนมากนัก กล่าวคือ เมื่อความต่างศักย์วงจรไฟฟ้ามากขึ้น ความหยาบผิวก็จะเพิ่มขึ้นตาม จนถึงระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากกว่า 85 โวลต์ ความหยาบผิวก็มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.15 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และรูปที่ 4.16 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz และจากการศึกษาลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานโดยการตรวจสอบ และจำลองลักษณะพื้นผิว (Profile) ออกมาในรูปของเส้นกราฟด้วยเครื่องตรวจสอบความหยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 ประกอบกับรูปถ่ายลักษณะพื้นผิวของวัสดุชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบกำลังการขยายต่ำ (35 เท่า) กับกำลังการขยายสูง (500 เท่า) พบว่าความรุนแรงของการกัดเซาะที่หลงเหลือเป็นลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความต่างศักย์วงจรไฟฟ้า



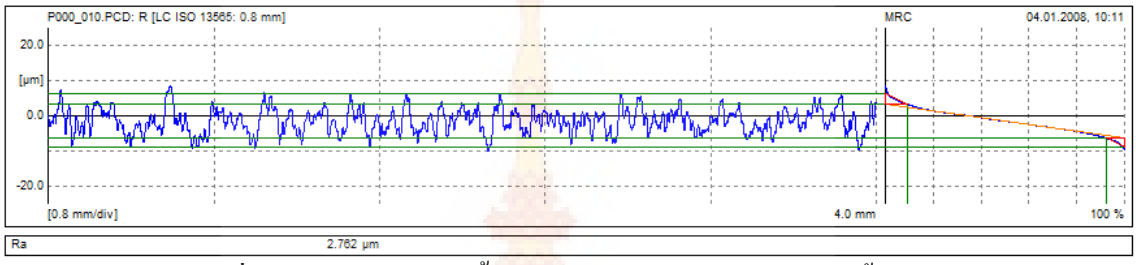
รูปที่ 4.15 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra



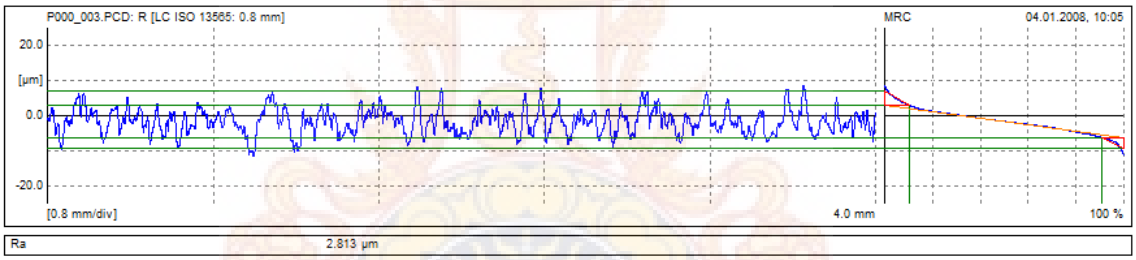
รูปที่ 4.16 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz



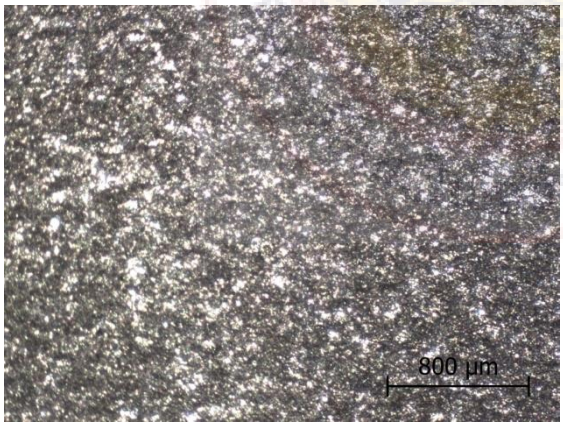
รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 70 โวลต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร



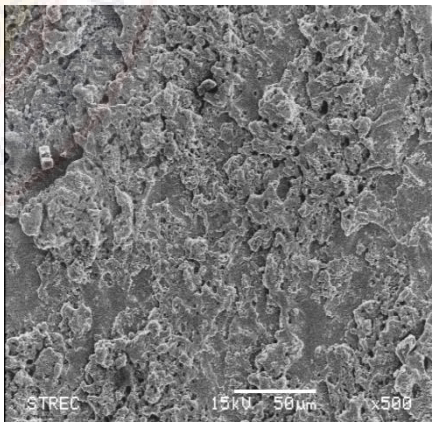
รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 85 โวลต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด 90 โวลต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร

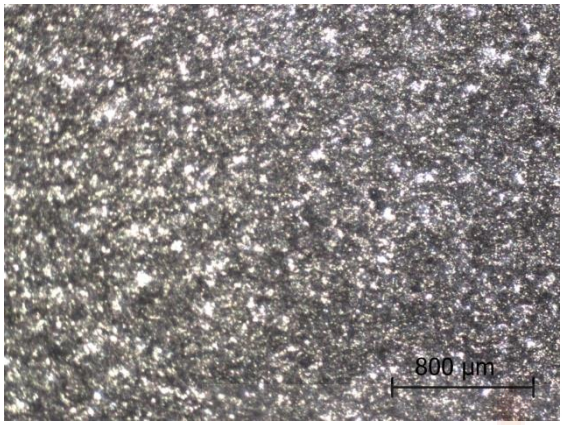


ก) ความต่างศักย์ 70 โวลต์, หนา 25 มม., ขยาย 35 เท่า

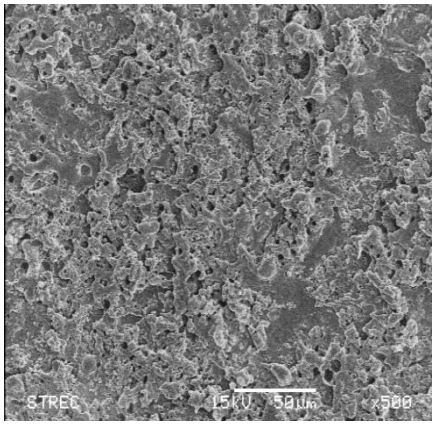


ข) ความต่างศักย์ 70 โวลต์, หนา 25 มม., ขยาย 500 เท่า

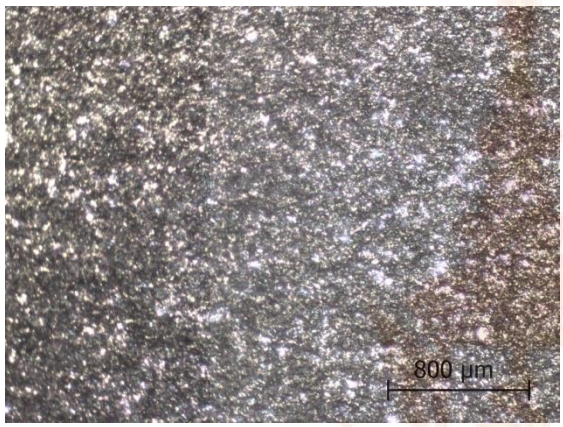
รูปที่ 4.20 ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดต่างกัน



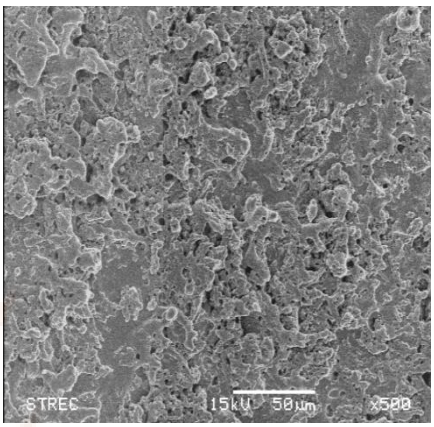
ค) ความต่างศักย์ 80 โวลต์, หนา 25 มม., ขยาย 35 เท่า



ง) ความต่างศักย์ 80 โวลต์, หนา 25 มม., ขยาย 500 เท่า



จ) ความต่างศักย์ 90 โวลต์, หนา 25 มม., ขยาย 35 เท่า



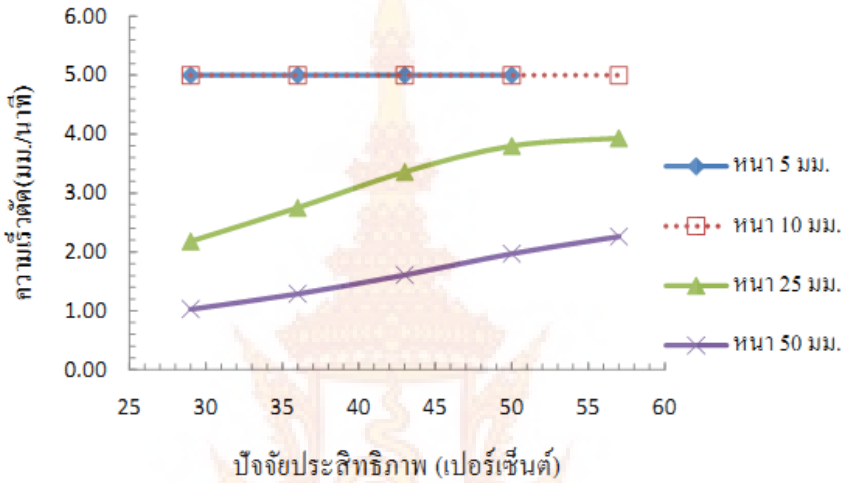
ฉ) ความต่างศักย์ 90 โวลต์, หนา 25 มม., ขยาย 500 เท่า

รูปที่ 4.20 ลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ผ่านการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดต่างกัน (ต่อ)

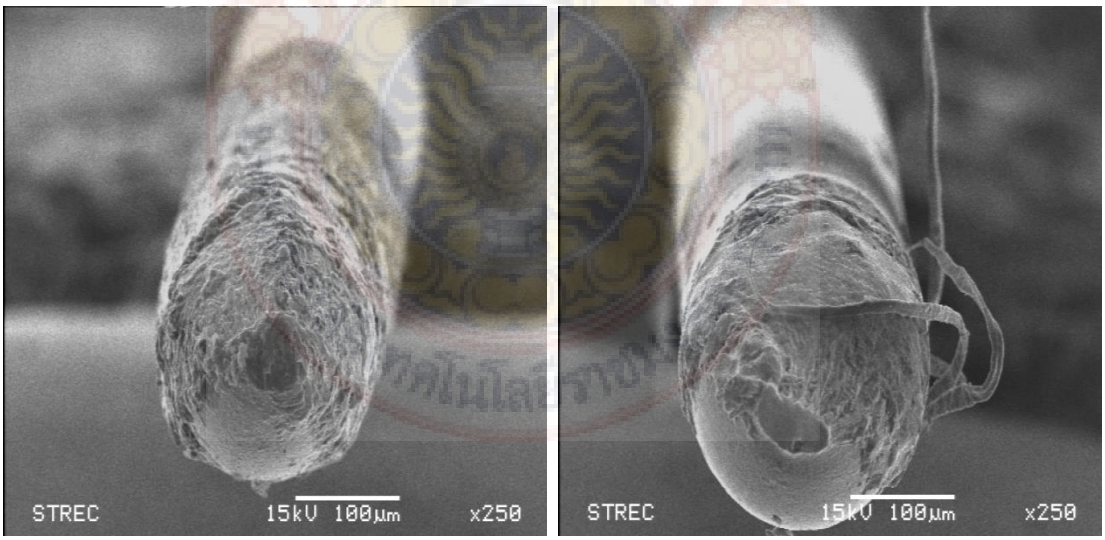
4.2.3 วิเคราะห์พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor)

พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพเกิดจากการปรับตัวแปรประกอบอันได้แก่ เวลาเปิดและเวลาปิด เพื่อให้เกิดสัดส่วนการไหลของประจุกระแสไฟฟ้า ต่อหน่วยเวลารวมในหนึ่งวัฏจักรการสปาร์ค โดยในการทดลองนี้ทำการปรับพารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพ 5 ระดับ ประกอบด้วย 29, 36, 43, 50 และ 57 เปอร์เซ็นต์ (ในการทดลองทำการปรับพร้อมกันทั้งเวลาเปิด และเวลาปิดเพื่อรักษาระดับความถี่ของการสปาร์คให้คงที่) ซึ่งจากการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อการแปรรูปวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์งานเย็น SKD 11 โดยประเมินจากความเร็วในการตัด พบว่า ปัจจัยประสิทธิภาพนั้นส่งผลต่อการขาดของเส้นลวด ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.21 ซึ่งเห็นได้ว่าวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ไม่สามารถตัดได้ที่ปัจจัยประสิทธิภาพ 57 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเกิดการขาดของเส้นลวด (ระดับปัจจัยประสิทธิภาพ 57 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากการปรับเวลาเปิด 8 ไมโครวินาที เวลาปิด 6 ไมโครวินาที ซึ่งเวลาเปิดที่มากในขณะที่พื้นที่การสปาร์คต่ำจะทำให้เกิดความหนาแน่นของการอาร์กต่อพื้นที่สูง จึงทำให้เกิดการสึกกร่อนของเส้นลวดในปริมาณมากจึงทำให้พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด

มีขนาดลดลงเป็นอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 4.22 ประกอบกันการสั่นสะเทือนของเส้นลวด [7] อันเนื่องมาจากกระบวนการที่อาศัยความร้อนทำให้เกิดการหลอมเหลว และขจัดเศษออกแบบทันทีทันใด โดยในขณะที่วัสดุหลอมละลายจะเกิดการขยายตัวของอากาศ และหดตัวแบบทันทีทันใด [2] ขณะขจัดเศษด้วยสารไดอิเล็กตริกระหว่างผิววัสดุชิ้นงานกับผิวเส้นลวดตัวนำ) เมื่อความหนาของวัสดุชิ้นงานมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการตัดลดลง แต่ระดับของปัจจัยประสิทธิภาพนั้นจะส่งผลให้ความเร็วในการตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับปัจจัยประสิทธิภาพ สำหรับวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 25 และ 50 มิลลิเมตร

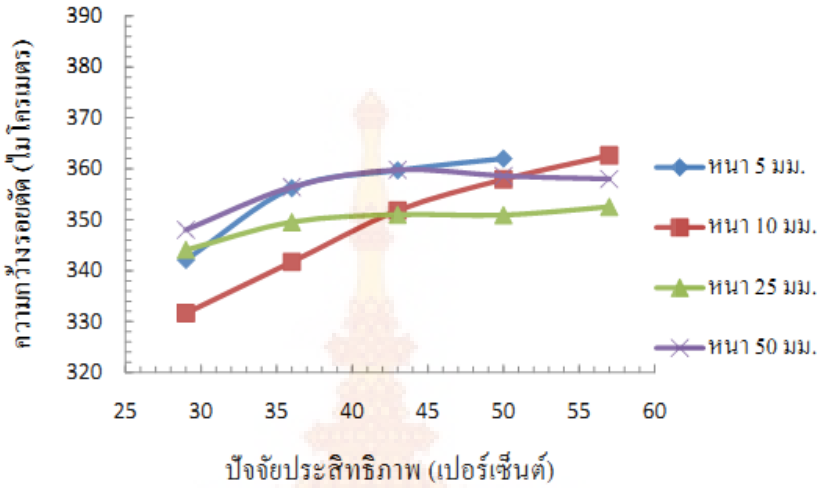


รูปที่ 4.21 ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความเร็วในการตัด



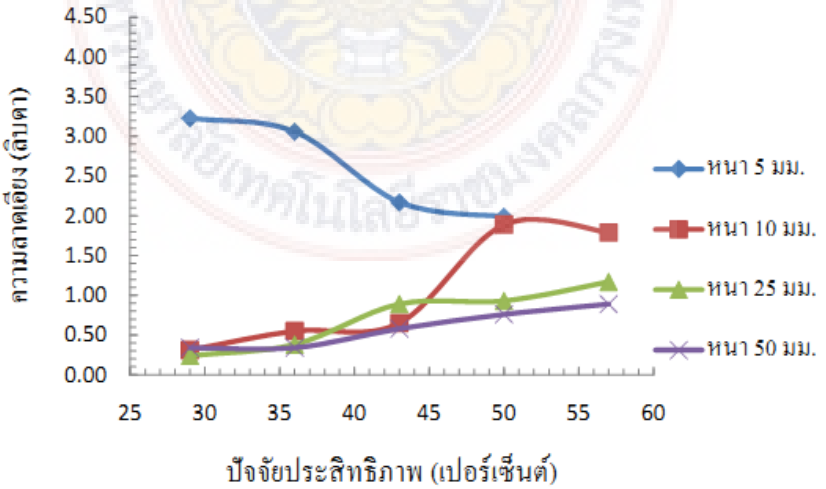
รูปที่ 4.22 ลักษณะการขาดของเส้นลวดจากการปรับเวลาเปิด 5 ไมโครวินาที ตัดวัสดุชิ้นงานหนา 5 มิลลิเมตร

ผลกระทบของปัจจัยประสิทธิภาพที่มีต่อความกว้างรอยตัดของวัสดุชิ้นงานจากการทดลอง พบว่า ความกว้างรอยตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระกับปัจจัยประสิทธิภาพ ซึ่งความกว้างรอยตัดของทุกระดับความหนาและ ทุกระดับปัจจัยประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 330 ถึง 360 ไมโครเมตร ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.23



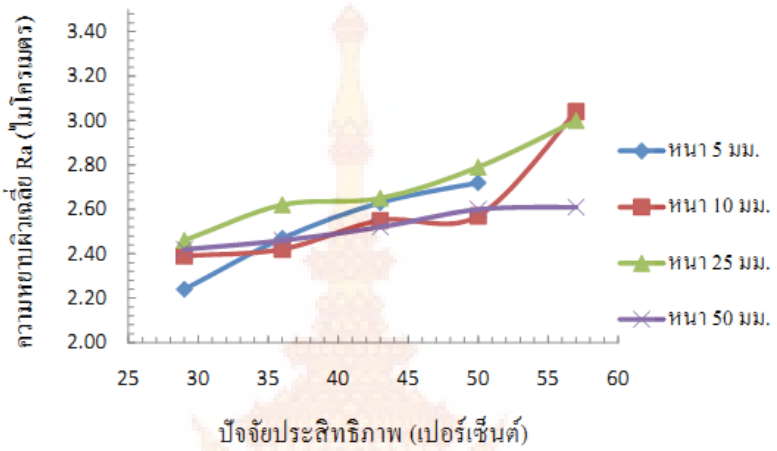
รูปที่ 4.23 ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความกว้างรอยตัด

การทดลองปรับระดับปัจจัยประสิทธิภาพเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานโดยประเมินจากความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานพบว่า วัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร มีแนวโน้มความลาดเอียงของพื้นผิวรอยตัดลดลงเมื่อระดับปัจจัยประสิทธิภาพมีค่ามากขึ้น สำหรับวัสดุชิ้นงานที่มีความหนาตั้งแต่ 10 มิลลิเมตรขึ้นไป มีแนวโน้มความลาดเอียงของรอยตัดที่เพิ่มขึ้นตามระดับปัจจัยประสิทธิภาพ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.24

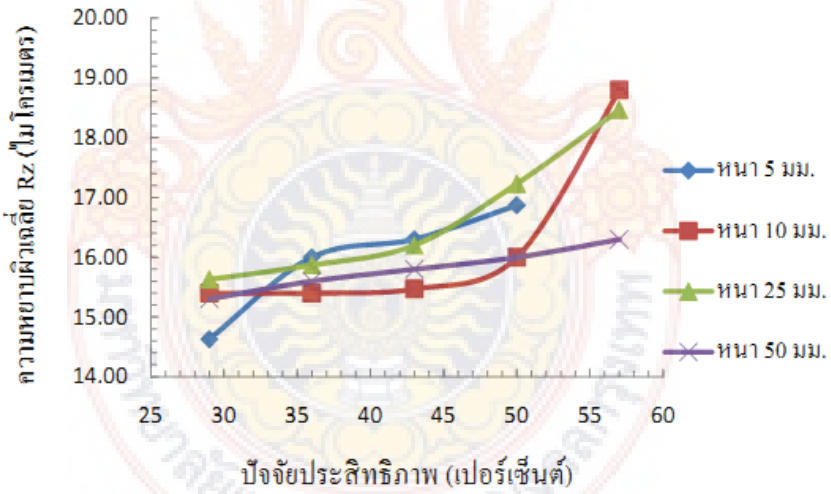


รูปที่ 4.24 ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน

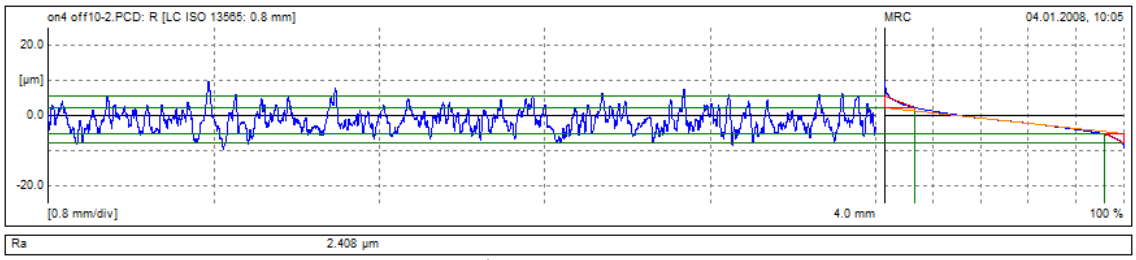
สำหรับผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด (Rz) นั้นพบว่า เมื่อระดับปัจจัยประสิทธิภาพซึ่งหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของการปล่อยประจุกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นกำเนิดของพลังงานความร้อนเพิ่มมากขึ้น ทำให้พื้นผิวที่เป็นร่องรอยที่หลงเหลือจากการกัดเซาะมีลักษณะแนวโน้มของความหยาบผิวเพิ่มมากขึ้นตามระดับปัจจัยประสิทธิภาพ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.25 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และรูปที่ 4.26 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz



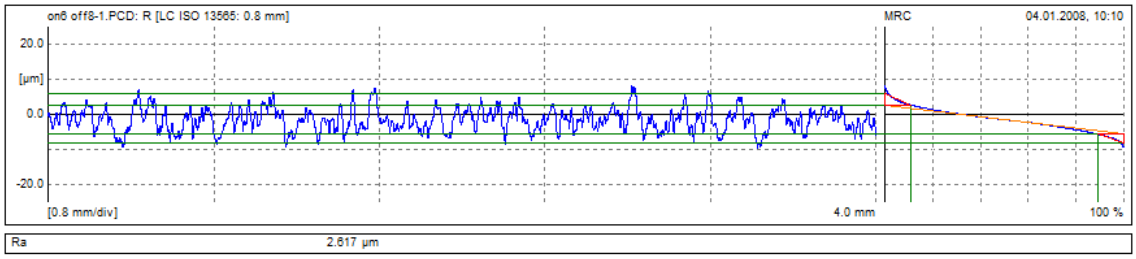
รูปที่ 4.25 ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra



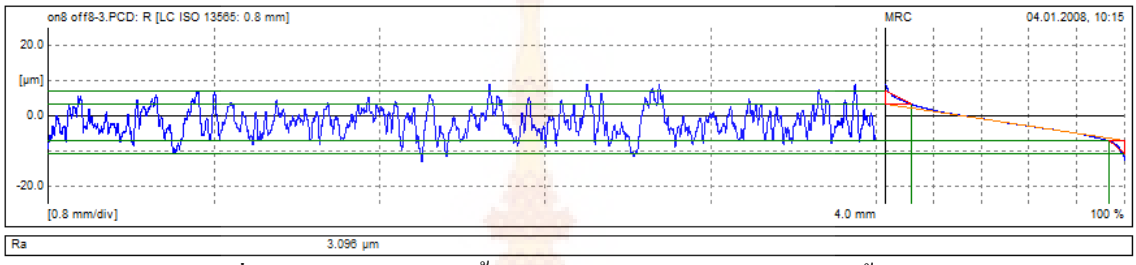
รูปที่ 4.26 ปัจจัยประสิทธิภาพที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด Rz



รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ปัจจัยประสิทธิภาพ 29 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร



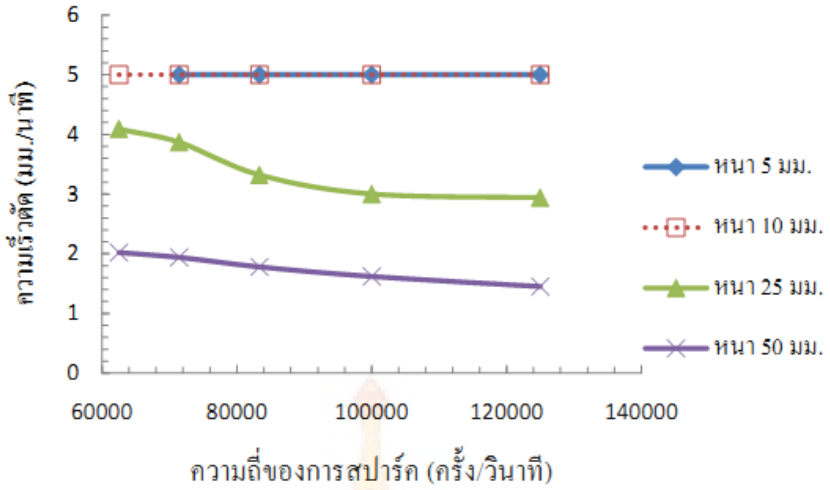
รูปที่ 4.28 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ปัจจัยประสิทธิภาพ 43 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.29 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ปัจจัยประสิทธิภาพ 57 เปอร์เซ็นต์ ความหนา 25 มิลลิเมตร

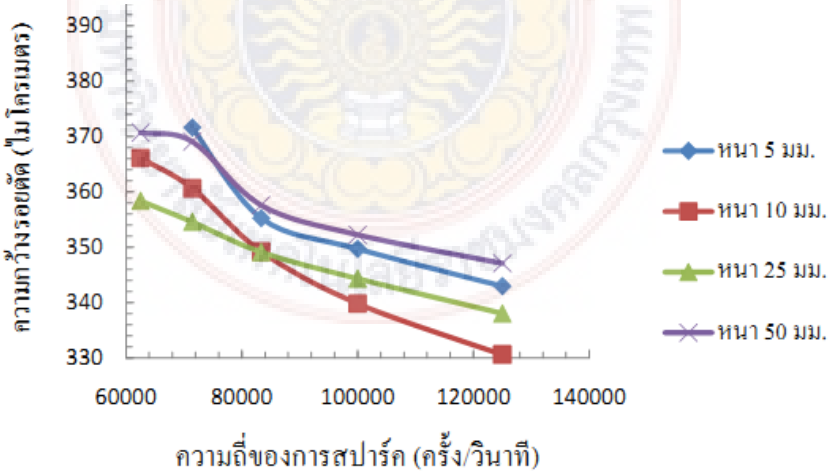
4.2.4 วิเคราะห์พารามิเตอร์ความถี่ของการสปาร์ค (Frequency)

การทดลองปรับระดับความถี่ในการสปาร์คเป็นการปรับตัวแปรประกอบอันได้แก่ เวลาเปิด และเวลาปิด เพื่อให้เกิดระดับความถี่ของการสปาร์ค ซึ่งมีหน่วยเป็นจำนวนวัฏจักรของการสปาร์คในหน่วยเวลาหนึ่งวินาที โดยในการทดลองทำการปรับเวลาเปิด และเวลาปิดพร้อมกันเพื่อรักษาระดับของปัจจัยประสิทธิภาพให้คงที่เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ความถี่ที่ใช้ในการทดลองมีอยู่ 5 ระดับ ประกอบด้วย 62500, 71429, 83333, 100000 และ 125000 ครั้งต่อวินาที ซึ่งจากการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้า SKD 11 โดยประเมินจากความเร็วในการตัด พบว่า วัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ไม่สามารถตัดได้ด้วยความถี่ที่ต่ำ อันเนื่องมาจากเกิดการขาดของเส้นลวดตัวนำขณะเดินตัดวัสดุชิ้นงาน (ความถี่ที่ต่ำในที่นี้เกิดจากระยะเวลาเปิด 8 ไมโครวินาที เวลาปิด 8 ไมโครวินาที ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนและการสึกกร่อนของเส้นลวดที่สูงเนื่องจากพื้นที่ในการกระจายตัวของการสปาร์คมีน้อย จึงทำให้เส้นลวดขาด) ทั้งนี้สำหรับวัสดุที่มีความหนา 25 และ 50 มิลลิเมตรนั้น จะมีความเร็วในการตัดที่ลดลงเมื่อระดับความถี่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.30

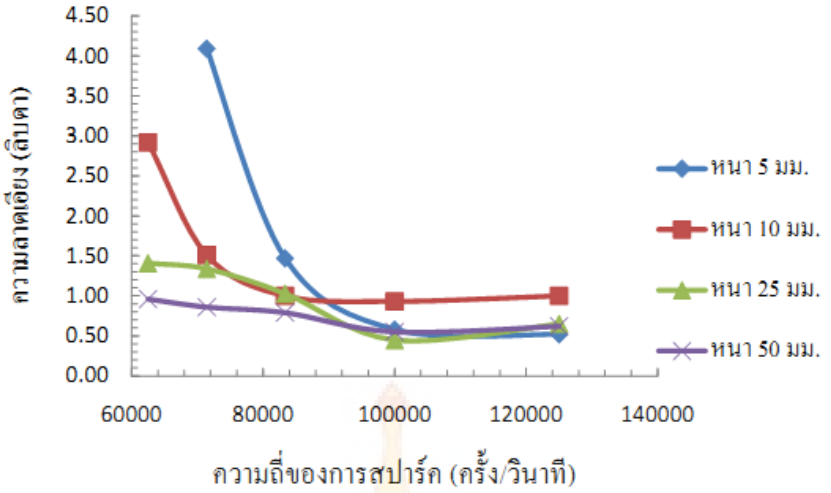


รูปที่ 4.30 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความเร็วในการตัด

ในส่วนของผลกระทบของการปรับระดับความถี่ที่มีต่อความกว้างรอยตัดนั้น พบว่า ความกว้างของรอยตัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อความถี่ของการสปาร์คเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.31 (ความถี่ของการสปาร์คที่เพิ่มมากขึ้นในการทดลองนี้เกิดจากการลดทั้งเวลาเปิด และเวลาปิดพร้อมๆ ในที่นี้ความถี่สูงสุด มีค่าเวลาเปิด 4 ไมโครวินาที และมีค่าเวลาปิด อยู่ที่ 4 ไมโครวินาที) จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่า ระดับความถี่สูงเหมาะสำหรับการตัดวัสดุชิ้นงานที่บาง ส่วนความถี่ต่ำเหมาะสำหรับการตัดเฉือยวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา ในส่วนผลกระทบของการปรับระดับความถี่ที่มีผลต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ทำการตัดนั้นพบว่า ความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.32

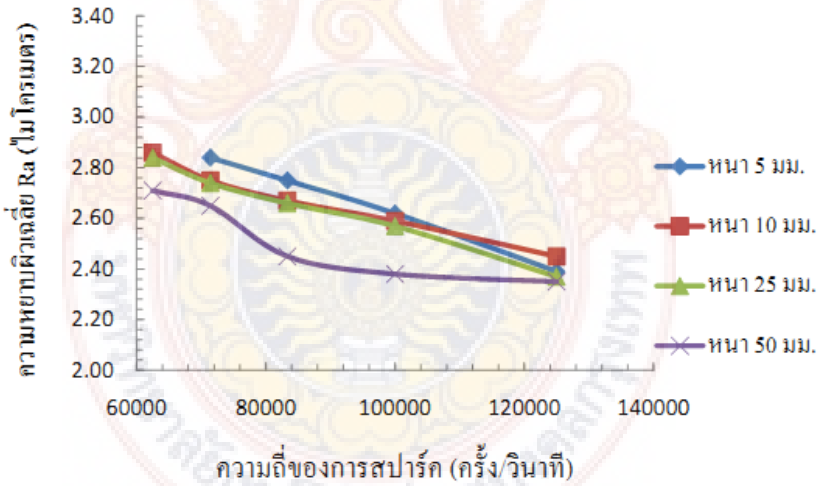


รูปที่ 4.31 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความกว้างรอยตัด

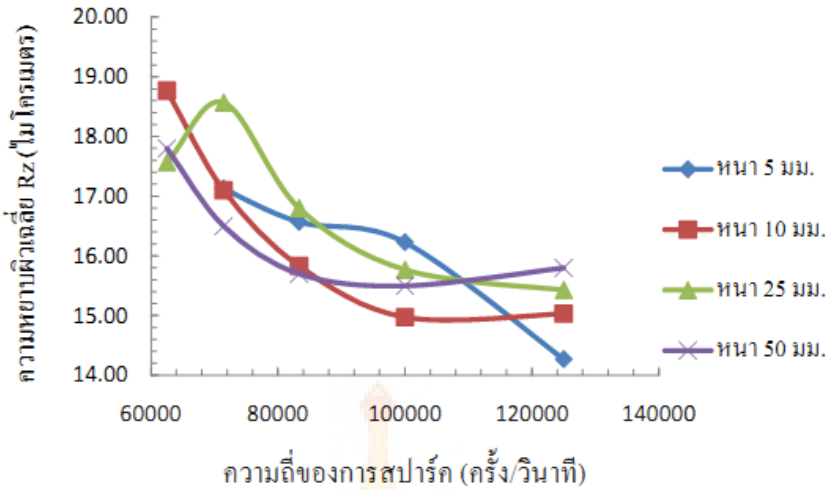


รูปที่ 4.32 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน

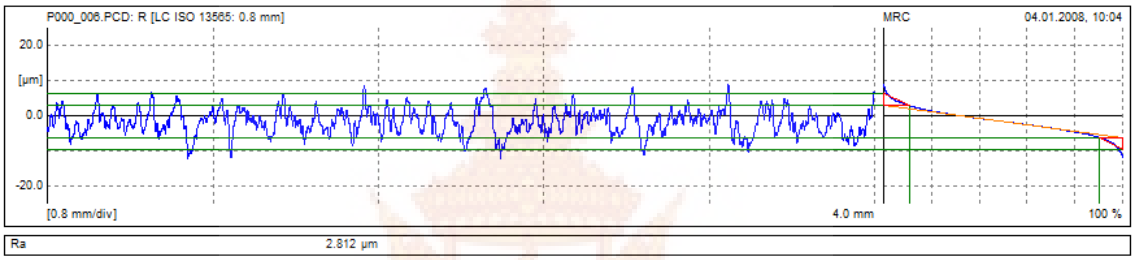
สำหรับผลกระทบของความถี่จากการสปาร์คที่มีผลต่อคุณภาพผิววัสดุชิ้นงานในรูปของความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz นั้นพบว่า ทุกระดับความหนาของวัสดุชิ้นงาน มีแนวโน้มของความหยาบผิวลดลง เมื่อระดับความถี่ของการสปาร์คเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.33 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Ra และรูปที่ 4.34 สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ระดับความถี่ต่างกันจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวดังแสดงในรูปที่ 4.35 ถึงรูปที่ 4.37



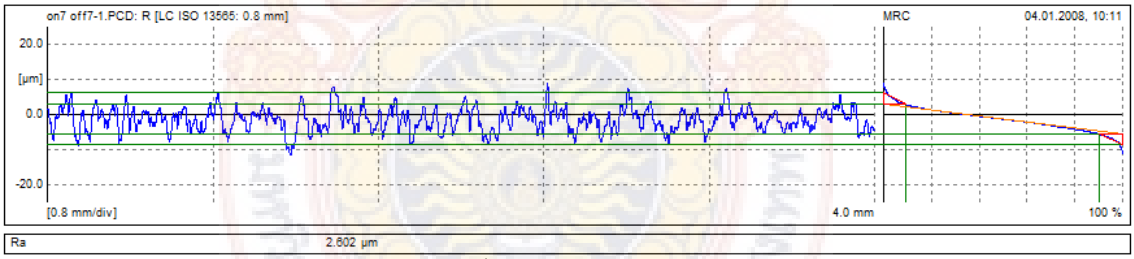
รูปที่ 4.33 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ย Ra



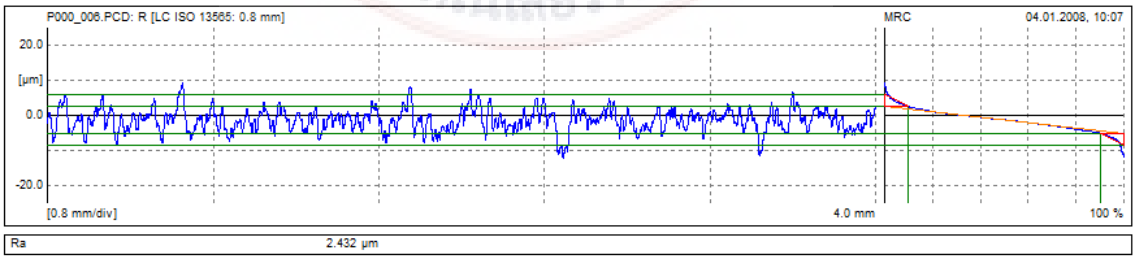
รูปที่ 4.34 ความถี่ของการสปาร์คที่มีผลต่อความหยาบผิวเฉลี่ยแบบสิบจุด Rz



รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ความถี่ของการสปาร์ค 62,500 ครั้งต่อวินาที ความหนา 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.36 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ความถี่ของการสปาร์ค 83,333 ครั้งต่อวินาที ความหนา 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.37 แสดงลักษณะพื้นผิว (Profile) ของความหยาบผิวชิ้นงาน
ความถี่ของการสปาร์ค 125,000 ครั้งต่อวินาที ความหนา 25 มิลลิเมตร

4.3 สรุป

การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้า SKD 11 ด้วยลวดไฟฟ้า โดยประเมินประสิทธิภาพการตัดจากความเร็วตัด และความกว้างรอยตัด ตลอดจนคุณภาพผิวงานในรูปของ ความลาดเอียงและความหยาบผิวของพื้นผิววัสดุชิ้นงาน มีตัวแปรต้นประกอบด้วย ความเร็วตัด ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ปัจจัยประสิทธิภาพ และความถี่ของการปสาร์ค (ปัจจัยประสิทธิภาพและความถี่ของการสปาร์คเป็นตัวแปรที่เกิดจากความสัมพันธ์ของเวลาเปิด และเวลาปิด) ซึ่งการประเมินความเร็วตัดที่เป็นตัวแปรตามเป็นผลจากการคำนวณค่าของระยะทางจริงที่ตัดต่อหน่วยเวลาที่ใช้ ส่วนความเร็วตัดที่เป็นตัวแปรต้นนั้นเป็นค่าคงที่มีหน่วยเป็นระยะทางต่อหน่วยเวลาที่ยอมให้เครื่องเดินตัดด้วยความเร็วสูงสุด แต่เนื่องจากกระบวนการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าวัสดุชิ้นงานกับเส้นลวดตัวนำจะต้องไม่สัมผัสกัน โดยการใช้ระบบเซอร์โวควบคุมระยะห่างเพื่อให้เกิดความเสถียรของการสปาร์ค ความเร็วตัดที่เป็นตัวแปรตามจึงมีค่าน้อยกว่าความเร็วตัดที่เป็นตัวแปรต้น นอกจากนี้ยังพบว่า ปัจจัยประสิทธิภาพและความถี่ของการสปาร์คนั้นยังส่งผลต่อการขาดของเส้นลวดอิเล็กโตรดตัวนำ โดยเมื่อตัวแปรประกอบที่เป็นเวลาเปิดที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 8 ไมโครวินาที จะไม่สามารถตัดวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา 5 มิลลิเมตรได้ เนื่องจากเวลาเปิดที่มากในขณะที่พื้นที่การสปาร์คต่ำจะทำให้เกิดความหนาแน่นของการอาร์กต่อพื้นที่สูง จึงทำให้เกิดการสึกกร่อนของเส้นลวดในปริมาณมากจึงทำให้พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดมีขนาดลดลงเป็นอย่างมาก ประกอบกันการสั่นสะเทือนของเส้นลวดอันเนื่องมาจากกระบวนการที่อาศัยความร้อนทำให้เกิดการหลอมเหลว และขจัดเศษออกแบบทันทีทันใด โดยในขณะที่วัสดุหลอมละลายจะเกิดการขยายตัวของอากาศ และหดตัวแบบทันทีทันใดขณะขจัดเศษด้วยสารไดอิเล็กตริกระหว่างผิววัสดุชิ้นงานกับผิวเส้นลวดตัวนำ) แต่เมื่อความหนาของวัสดุมากขึ้นเป็น 10, 25 หรือ 50 มิลลิเมตร ระดับการควบคุมพารามิเตอร์ในการทดลองดังกล่าวจะสามารถตัดวัสดุชิ้นงานได้ตามปกติ

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 โดยการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าซึ่งเป็นการแปรรูปด้วยกระบวนการที่อาศัยความร้อน จากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการกัดกร่อนที่มีความเร็วในการแปรรูปต่ำกว่ากระบวนการทางกล แต่สามารถแปรรูปวัสดุที่มีความแข็งสูงซึ่งยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกลได้ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรต้นประกอบด้วย ระดับความเร็วในการตัด (Cutting Speed) ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Voltage) ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) และความถี่ของการสปาร์ค (Frequency) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อความสามารถในกระบวนการตัดโดยประเมินจาก ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) และความกว้างของรอยตัดที่เกิดจากการกัดกร่อน (Kerf) ตลอดจนศึกษาผลกระทบที่มีต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุชิ้นงานที่ทำการตัด (Slope) และความหยาบพื้นผิววัสดุ จากค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และความหยาบผิวเฉลี่ยสิบจุด (Rz) โดยจากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้คือ

1. พารามิเตอร์ความเร็วในการตัด (Cutting Speed) มีผลต่อประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 โดยประเมินจากความเร็วการตัดพบว่า ความเร็วในการตัดจริงจะเพิ่มขึ้นตามระดับความเร็วในการตัดสูงสุด และผกผันกับความหนาของวัสดุชิ้นงานที่ทำการตัด กล่าวคือ เมื่อวัสดุชิ้นงานมีความหนามากขึ้นความเร็วในการตัดจะลดลง สำหรับในกรณีที่ความหนาวัสดุชิ้นงานคงที่เมื่อเพิ่มความเร็วตัดสูงสุดให้มากขึ้นความเร็วในการตัดจริงจะเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่งแล้วจะมีระดับคงที่ (ความเร็วตัดสูงสุดเป็นความเร็วที่ยอมให้เครื่องเดินตัด ส่วนความเร็วในการตัดจริงเป็นความเร็วที่เกิดจากการคำนวณระยะทางการตัดจริงต่อหน่วยเวลาที่ใช้ตัดจริง) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่อาศัยการอาร์กของกระแสไฟฟ้า โดยวัสดุชิ้นงานกับวัสดุเส้นลวดอิเล็กโตรดจะต้องไม่สัมผัสกัน และจะต้องรักษาระยะห่างเพื่อให้เกิดการอาร์กที่สม่ำเสมอจึงทำให้ความเร็วตัดจริงมีค่าที่ต่ำกว่าความเร็วตัดสูงสุด เมื่อวัสดุชิ้นงานมีค่าความหนามากขึ้น ทั้งนี้ความเร็วในการตัดจริงที่มากขึ้นยังส่งผลให้ความกว้างรอยตัดลดลงอยู่ในช่วง 345 ถึง 362 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับระดับความหนาของวัสดุชิ้นงาน ตลอดจนส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวงานในรูปของความลาดเอียงของพื้นผิววัสดุที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วในการตัดและจะลดลงเมื่อความหนาของวัสดุชิ้นงานที่ทำการตัดมากขึ้น และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิววัสดุชิ้นงานเพียงเล็กน้อย

2. พารามิเตอร์ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Voltage) มีผลต่อประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 โดยประเมินจากความเร็วการตัด พบว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเร็วในการตัดแปรผันตาม อีกทั้งยังส่งผลให้ความกว้างรอยตัดลดลง อยู่ในช่วง 347 ถึง 352 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับระดับความหนาของวัสดุชิ้นงาน ในส่วนของคุณภาพผิวงานทั้งความลาดเอียง และความหยาบผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด

3. พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) เป็นตัวแปรต้นที่เกิดจากการปรับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเปิด กับเวลาปิด เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 โดยประเมินจากความเร็วการตัด พบว่า ความเร็วในการตัดแปรผันตามระดับปัจจัยประสิทธิภาพ แต่ที่ระดับปัจจัยประสิทธิภาพสูงนั้นจะไม่สามารถตัดวัสดุชิ้นงานที่บางได้ อันเนื่องมาจากความหนาแน่นของการอาร์กต่อพื้นที่จะทำให้เกิดการสึกกร่อนของเส้นลวดประกอบกับการสั่นสะเทือนของเส้นลวดอันเนื่องมาจากการอาร์กเพื่อให้เกิดความร้อนสำหรับหลอมเหลววัสดุและขจัดเศษออกแบบทันทีทันใด โดยในขณะที่วัสดุหลอมละลายจะเกิดการขยายตัวของอากาศ และหดตัวแบบทันทีทันใดขณะขจัดเศษด้วยสารไดอิเล็กตริกจึงทำให้เส้นลวดตัวนำขาดทำให้สามารถสรุปได้ว่าระดับปัจจัยประสิทธิภาพที่ต่ำเหมาะสำหรับการตัดวัสดุบาง และระดับปัจจัยประสิทธิภาพที่สูงเหมาะสำหรับการตัดวัสดุชิ้นงานที่มีความหนา นอกจากนี้ระดับปัจจัยประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลกระทบต่อความกว้างรอยตัด ความลาดเอียงของพื้นผิว ตลอดจนความหยาบผิววัสดุชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

4. พารามิเตอร์ความถี่ (Frequency) ซึ่งเป็นตัวแปรต้นที่เกิดจากการปรับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเปิด กับเวลาปิด เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 โดยจากการทดลองที่ระดับปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความเร็วในการตัด ความกว้างรอยตัด ตลอดจนคุณภาพผิวงานในรูปของความลาดเอียง และความหยาบผิวดจะแปรผกผันกับความถี่ของการสปาร์ค กล่าวคือ เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความเร็วในการตัดและผลกระทบอื่นๆ ที่ทำการประเมนผลมีค่าลดลง นอกจากนี้ระดับความถี่ต่ำไม่เหมาะสมสำหรับการตัดวัสดุชิ้นงานที่บาง เนื่องจากเกิดการขาดของเส้นลวดอิเล็กโตรดตัวนำเช่นเดียวกันกับพารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพ

5. ความหนาของวัสดุชิ้นงานมีผลทำให้ความเร็วในการตัดลดลงเนื่องจากความหนาของวัสดุชิ้นงานที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการกระจายตัวของการอาร์กส่งผลเกิดการกัดกร่องและขจัดเศษของวัสดุชิ้นงานในบริเวณกว้าง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองนี้เป้นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพการตัดวัสดุชิ้นงาน ซึ่งสามารถใช้เป้นข้อมูลอ้างอิงเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ ระดับผลกระทบ หรือผลกระทบร่วมของตัวแปร โดนใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experimental) เพื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติต่อไป

การขาดของเส้นลวดในการทดลองปรับพารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพ และความถี่ของการสปาร์คซึ่งมาจากการปรับเวลาเปิด 8 ไมโครวินาที จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการขาดของเส้นลวดมาจากค่าระยะเวลาเปิด เนื่องจากระยะเวลาเปิดเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าซึ่งส่งผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้น (ในการทดลองนั้นไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงได้จจึงทำให้ยากต่อการอธิบายความร้อนที่เกี่ยวข้อง) ประกอบพื้นที่หน้าตัดที่ต่ำจึงทำให้เกิดความหนาแน่นของการอาร์กต่อพื้นที่สูงจึงเกิดการสั่นสะเทือนจากการขจัดเศษและระบายความร้อนจากการหดและขยายตัวอย่างรวดเร็วในการขจัดเศษ

ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญที่มีผลเป็นอย่างมากต่อการขาดของเส้นลวด คืออัตราการไหลสำหรับการระบายความร้อนและการขจัดเศษของสารไดอิเล็กตริก ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นก่อนการกำหนดค่าแรงดันน้ำในการระบายความร้อนคงที่ (25 kg/cm^2 จากด้านบน และ 75 kg/cm^2 จากด้านล่าง) พบว่า แรงดันน้ำที่ต่ำเมื่อใช้พารามิเตอร์ปัจจัยประสิทธิภาพ หรือความถี่ที่สูงจะมีความถี่การขาดของเส้นลวดสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] E.Bud Guitrau., The EDM Handbook. Handser Gardener publication Cincinati, 1997,PP 19-54.

[2] Thomas, B., Technology of Electrical Discharge Machining. Druckerei Helene, 6102 Pfunstste PP 11-53

[3] S. S.Mahapatra and Amar Patnaik. Parametric Optimization of Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Process using Taguchi Method. J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. Copyright 2006 by ABCM October-December 2006, Vol. XXVIII, pp. 422-429.

[4] JIS B 0031 and JIS B 0061

[5] Aristech., Aristech CNC Wire cut EDM Instruction Manual. Lien Sheng Mechine & Electrical., Ta-li Shing, 2004.

[6] Y.S. LIAO, Y.Y. CHU and M.T. YAN. Study of Wire Breaking Process and Monitoring of WEDM, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 37, No. 4, pp. 555-567, 1997

[7] A. Okada, Y. Uno, M. Nakazawa and T. Yamauchi, Evaluatio ns of spark distribution and wire vibration in wire EDM by high-speed observation., CIRP Annals - M anufacturing Technology 59 (2010) 231–234.

[8] Mu-Tian Yan and Yi-Peng Lai, Surface quality improvement of wire-EDM using a fine-finish power supply, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 1686 – 1694.

[9] M.T. Yan and Y.S. Liao, Adaptive Control of the WEDM Process Using the Fuzzy Control Strategy, Journal of Manu[acturing Systems Vol. 17/No. 4 (1998) 263-274.

[10] 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 87 (1999) 69 – 81.

[11] Bulent Ekmekci, “Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM),” ScienceDirect(Electronic), 2007, Available : ScienceDirect (7 June 2007)

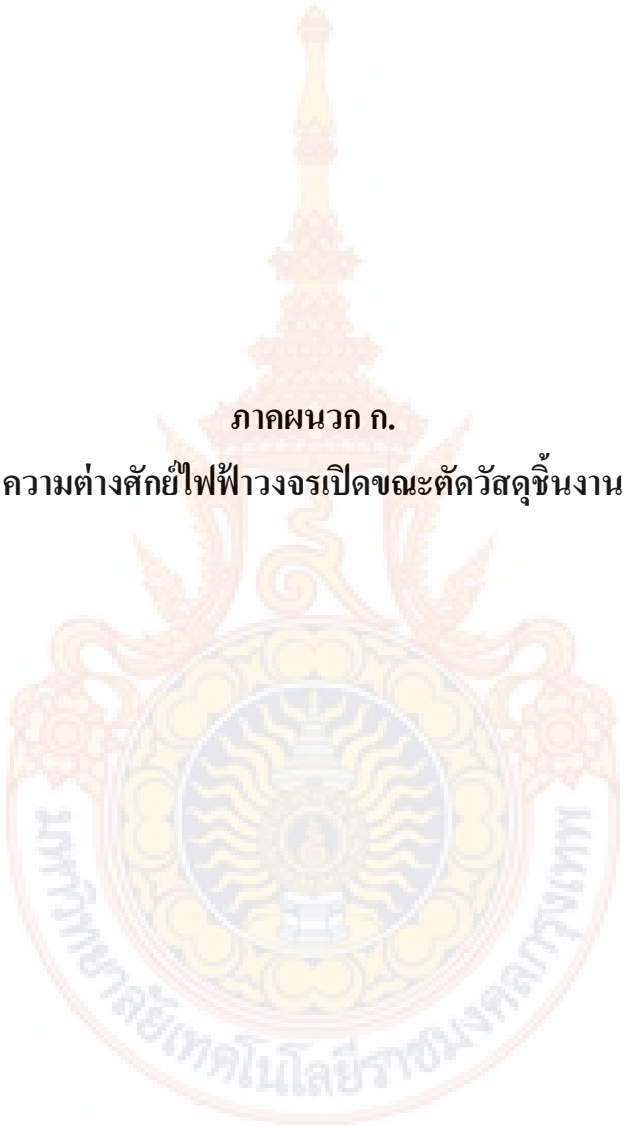
[12] John,K. “et al”, “EDM electrode manufacture using rapid tooling: a review” ,Springer Science Business Media (Electronic), 2008, Vol.43, pp2522-2535), Available : Springer (5 June 2008)

[13] Salonites, K. “et al”, “Thermal modeling of the material removal rate and surface roughness for die sinking EDM”, Springer – Verlag London Limited (Electronic), 2007, Available : Springer (3 August 2008)

[14] Lee, S.H. and Li, X.P. Study of the Surface Integrity of the Machined Workpiece in the EDM of Tungsten Carbide. Journal of Materials Processing Technology, Vol.139, 2003.

[15] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุทธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ .การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง บริษัท .สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด ,2551.

ภาคผนวก ก.
ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดขณะตัดวัสดุชิ้นงาน



จากการทดลองเพื่อเก็บผลและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 ด้วยลวดไฟฟ้า ในส่วนของความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าพบว่า ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจริงมีระดับที่ต่ำกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ดังแสดงในตารางที่ ก. 1 สำหรับการปรับความเร็วตัด ตารางที่ ก. 2 สำหรับการปรับความต่างศักย์วงจรไฟฟ้า ตารางที่ ก. 3 สำหรับการปรับความถี่ในการสปาร์ค และตารางที่ ก. 4 สำหรับการปรับปัจจัยประสิทธิภาพ

ตารางที่ ก.1 ความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าวงจรเปิดระหว่างวัสดุชิ้นงานกับเส้นลวดจากการปรับความเร็วตัด

ความเร็วสูงสุด (มม./นาที)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (มม/นาที)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
1	79	76	72	62
2	78	73	65	50
3	77	72	55	50
4	76	70	51	49
5	75	67	50	48
6	74	63	49	48

ตารางที่ ก.2 ความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าวงจรเปิดวัสดุชิ้นงานกับเส้นลวดจากการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (มม/นาที)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
70	61	53	48	48
75	66	59	49	48
80	70	63	49	48
85	75	67	49	48
90	80	71	50	48
95	84	75	50	48

ตารางที่ ก.3 ความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าวงจรเปิดวัสดุชิ้นงานกับเส้นลวดจากการปรับความถี่ในการสปาร์ค

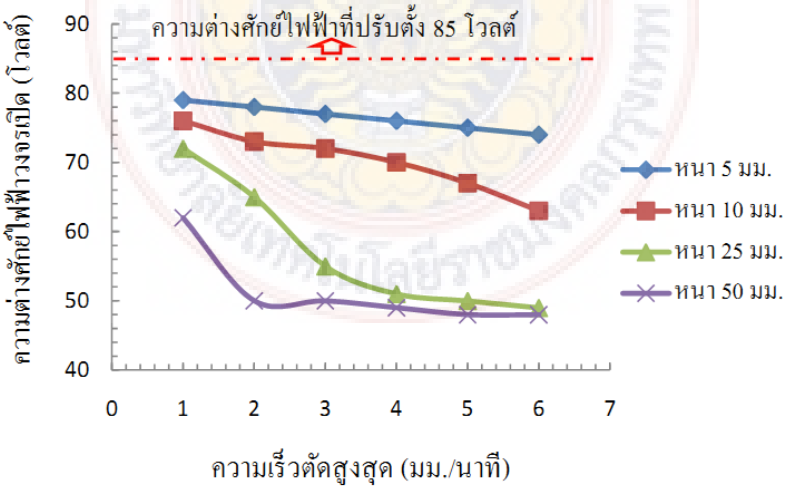
ความถี่ในการสปาร์ค (ครั้ง/วินาที)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (มม/นาที)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
62500	77	72	51	48
71429	77	72	50	48
83333	77	70	50	48
100000	76	69	50	48
125000	75	67	49	48

ตารางที่ ก.4 ความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าวงจรเปิดวัสดุชิ้นงานกับเส้นลวดจากการปรับปัจจัยประสิทธิภาพ

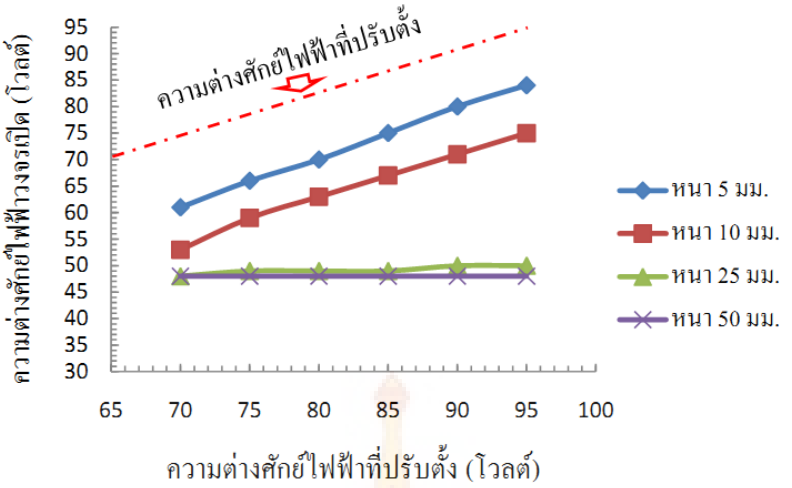
ปัจจัยประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (มม/นาที)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
29	69	56	49	48
36	73	62	49	48
43	75	68	50	48
50	77	72	50	48
57	78	74	51	48

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อชิ้นงานมีระดับความหนามากขึ้นจะทำให้ความต่างศักย์วงจรไฟฟ้ามีความแตกต่างจากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปรับตั้งมากขึ้น ซึ่งเกิดจากพื้นที่แนวสปาร์คระหว่างผิววัสดุชิ้นงานกับเส้นลวดจึงทำให้ต้องลดแรงดันไฟฟ้าเพื่อรักษาระยะห่างของผิววัสดุชิ้นงาน กับเส้นลวดเช่นเดียวกับการปรับความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าลดลงดังแสดงในรูปที่ ก. 1

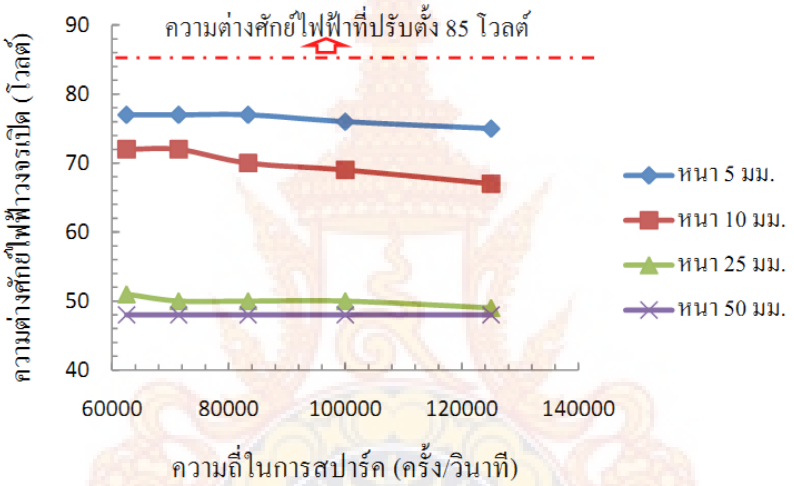
จากรูปที่ ก. 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปรับตั้ง กับความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด พบว่าความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าวงจรเปิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปรับตั้ง แต่เมื่อชิ้นงานมีความหนาเพิ่มมากขึ้นความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปรับตั้งจะมีผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดน้อยลง ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ ก. 2 ในส่วนของความถี่ในการสปาร์คนั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าน้อยมาก ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ ก. 3 ทั้งนี้เมื่อปัจจัยประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มตาม ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ ก. 4



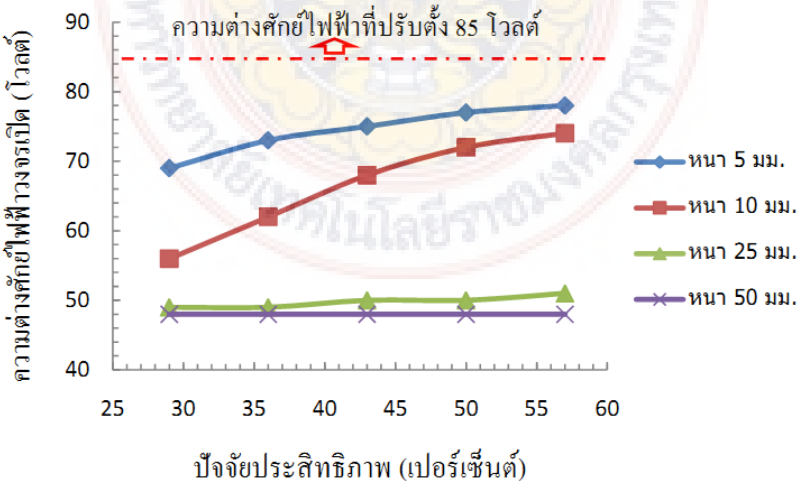
รูปที่ ก. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างต่างศักย์วงจรไฟฟ้ากับระดับความเร็วตัด



รูปที่ ก. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างต่างศักย์วงจรไฟฟ้าวงจรเปิดกับระดับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปรับตั้ง



รูปที่ ก. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างต่างศักย์วงจรไฟฟ้าวงจรเปิดกับระดับความถี่ในการสปาร์ค



รูปที่ ก. 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์วงจรไฟฟ้าวงจรเปิดกับระดับปัจจัยประสิทธิภาพ

ภาคผนวก ข.

อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรด (เปอร์เซ็นต์)

จากการทดลองเพื่อเก็บผลและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการตัดวัสดุเหล็กกล้าแม่พิมพ์ SKD 11 ด้วยลวดไฟฟ้า โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ พบว่า ระดับค่าพารามิเตอร์มีผลต่อการสึกหรอของเส้นลวดอิเล็กโตรด ซึ่งในที่นี้ประเมินอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์การสึกหรอ โดยคำนวนน้ำหนักของลวดอิเล็กโตรดที่ตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานด้วยระดับพารามิเตอร์ต่างๆ เทียบกับน้ำหนักของเส้นลวดเดิม (ความยาวของลวดที่ใช้เท่ากับ 2 เมตร) ซึ่งระดับน้ำหนักของเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงต่อน้ำหนักเดิมจะเท่ากับสัดส่วนการสึกหรอของเส้นลวด และสามารถประเมินให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์การสึกหรอโดยใช้สมการ ข-1 ทั้งนี้ผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ข. 1 สำหรับการปรับความเร็วตัด ตารางที่ ข. 2 สำหรับการปรับความต่างศักย์วงจรไฟฟ้า ตารางที่ ข. 3 สำหรับการปรับความถี่ในการสปาร์ค และตารางที่ ข. 4 สำหรับการปรับปัจจัยประสิทธิภาพ

$$\text{อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรด} = \frac{[\text{น้ำหนักลวดก่อนตัด(กรัม)} - \text{น้ำหนักลวดหลังตัด(กรัม)}]\text{x}100}{\text{น้ำหนักลวดก่อนตัด (กรัม)}} \quad \text{(ข-1)}$$

ตารางที่ ข.1 อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรดจากการปรับความเร็วตัดสูงสุด

ความเร็วสูงสุด (มม./นาที)	อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรด (เปอร์เซ็นต์)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
1	0.42	1.62	6.60	9.11
2	2.05	4.00	11.75	12.07
3	2.83	5.25	14.37	13.60
4	4.09	7.67	17.80	14.86
5	5.72	9.86	19.19	15.19
6	9.22	11.11	21.73	14.82

ตารางที่ ข.2 อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรดจากการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า

ความต่างศักย์ (โวลต์)	อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรด (เปอร์เซ็นต์)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
70	3.75	6.69	15.97	11.50
75	5.31	8.42	16.51	17.70
80	5.73	10.02	17.07	18.51
85	6.83	12.15	20.57	21.57
90	7.03	13.67	21.46	24.00
95	6.58	14.27	23.13	25.21

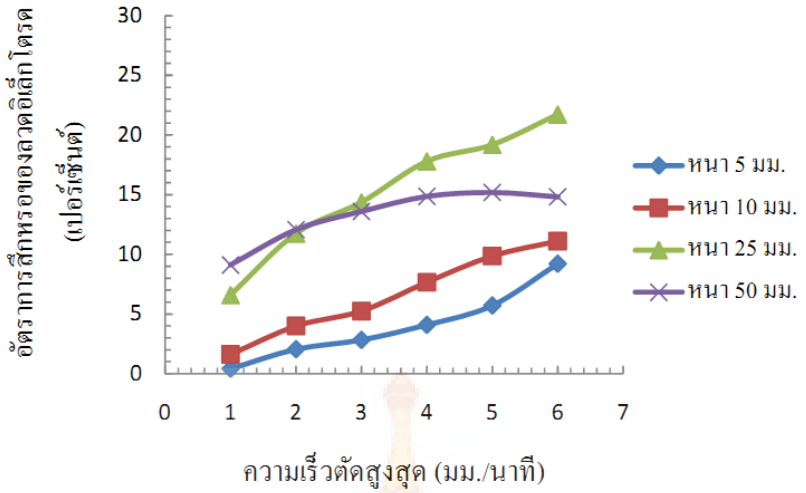
ตารางที่ ข.3 อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรดจากการปรับความถี่ในการสปาร์ค

ความถี่ในการสปาร์ค (ครั้ง/วินาที)	อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรด (เปอร์เซ็นต์)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
62500	8.70	9.83	26.24	23.38
71429	5.69	8.06	21.72	18.95
83333	5.88	10.09	19.17	16.61
100000	7.45	9.87	17.70	14.42
125000	6.16	9.43	14.97	13.62

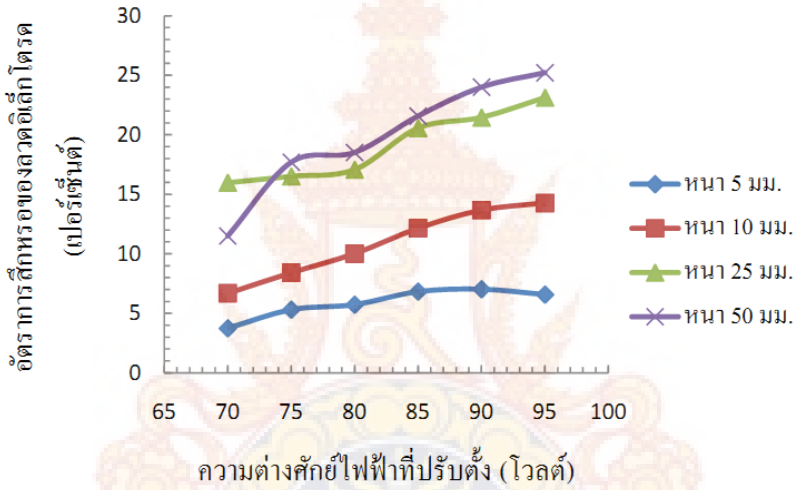
ตารางที่ ข.4 อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรดจากการปรับปัจจัยประสิทธิภาพ

ปัจจัยประสิทธิภาพ (เปอร์เซ็นต์)	อัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรด (เปอร์เซ็นต์)			
	หนา 5 มม.	หนา 10 มม.	หนา 25 มม.	หนา 50 มม.
29	6.38	10.92	22.63	24.09
36	6.10	10.91	22.58	18.99
43	5.66	10.29	18.72	16.82
50	4.07	9.08	14.72	12.35
57	3.17	6.47	9.01	8.43

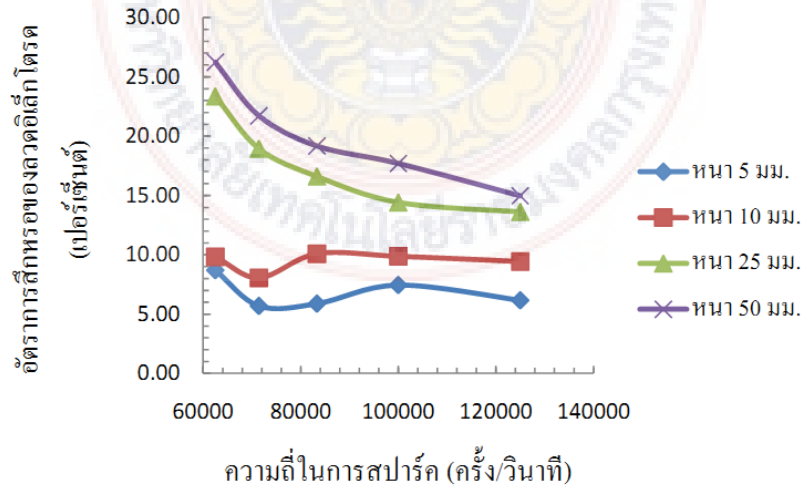
จากผลการทดลองพบว่า อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดจะเพิ่มขึ้นตามระดับความหนาของวัสดุชิ้นงาน เนื่องจากเกิดจากชิ้นงานที่มีความหนามากขึ้นในขณะที่ความเร็วในการเคลื่อนตัวในแนวแกนของเส้นลวดอิเล็กโตรดคงเดิม ย่อมหมายถึงระยะเวลาในการอาร์กของพื้นผิวเส้นลวดที่ยาวนานซึ่งจะทำให้การสึกกร่อนเพิ่มมากขึ้น และจากการทดลองปรับระดับความเร็วในการตัดและความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่า อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดแปรผันตาม ดังแสดงในรูปที่ ข. 1 และรูปที่ ข.2 ทั้งนี้การปรับความถี่ในการสปาร์คและปัจจัยประสิทธิภาพ พบว่า อัตราการสึกหรอของอิเล็กโตรดผกผันกับความถี่ในการสปาร์คและปัจจัยประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ ข. 1 และรูปที่ ข.2



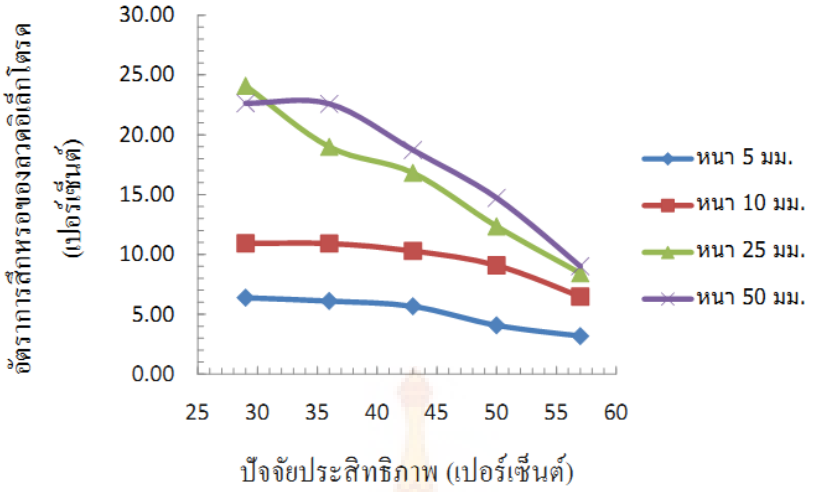
รูปที่ ข. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรดกับระดับความเร็วตัด



รูปที่ ข. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรดกับความต่างศักย์ไฟฟ้า



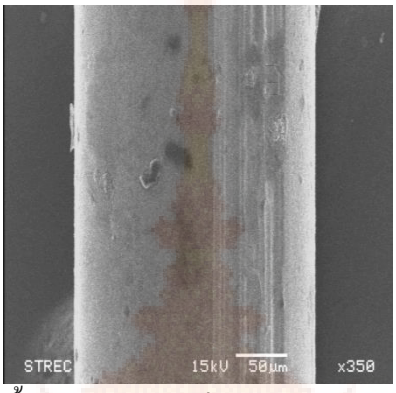
รูปที่ ข. 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรดกับความถี่ในการสปาร์ค



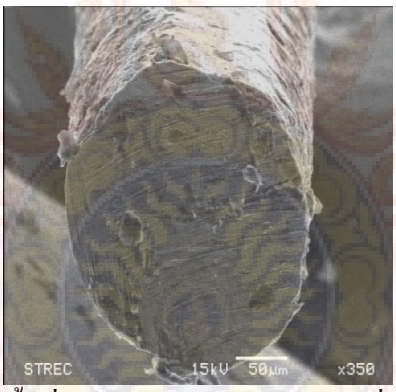
รูปที่ ข. 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอของลวดอิเล็กโตรดกับระดับปัจจัยประสิทธิภาพ

ภาคผนวก ค.
ลักษณะการสึกกร่อนบนพื้นผิววัสดุอิเล็กโตรด

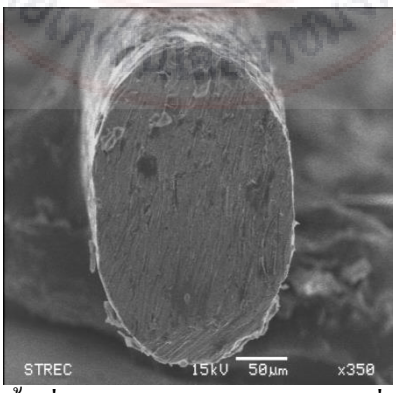
ลักษณะการสึกกร่อนของพื้นผิววัสดุลวดอิเล็กโตรดที่เกิดจากการปรับพารามิเตอร์อันประกอบด้วย การปรับความเร็วในการตัด (Cutting Speed) ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Voltage) ความถี่ในการสปาร์ค (Frequency) และปัจจัยประสิทธิภาพ (Duty Factor) เป็นลักษณะพื้นผิวที่ได้จากการถ่ายภาพกำลังการขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เพื่อแสดงให้เห็นถึงความรุนแรงของการกัดอาร์กวัสดุชิ้นงาน และผลกระทบที่มีต่อพื้นผิววัสดุเส้นลวดอิเล็กโตรด โดยแบ่งตามระดับความหนาของวัสดุชิ้งาน และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



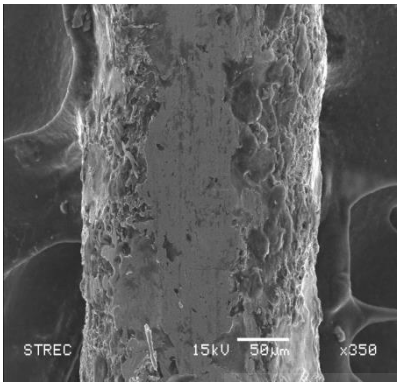
รูปที่ ค.1 ลักษณะพื้นผิววัสดุลวดอิเล็กโตรดก่อนทำการตัดวัสดุชิ้นงาน



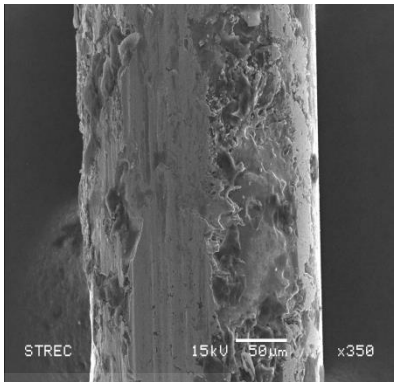
รูปที่ ค.2 ลักษณะพื้นที่หน้าตัดวัสดุลวดอิเล็กโตรดที่เกิดการสึกหรอต่ำ



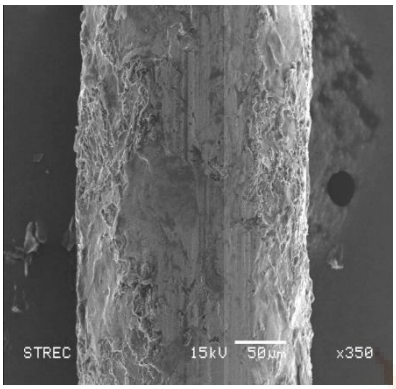
รูปที่ ค.3 ลักษณะพื้นที่หน้าตัดวัสดุลวดอิเล็กโตรดที่เกิดการสึกหรอสูง



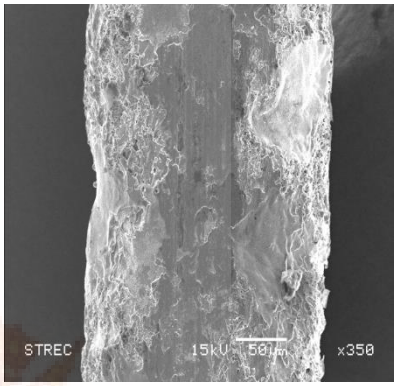
ก) ความเร็วในการตัด 1 มม./นาที ความหนา 5 มม. สึกหรอ 0.42%



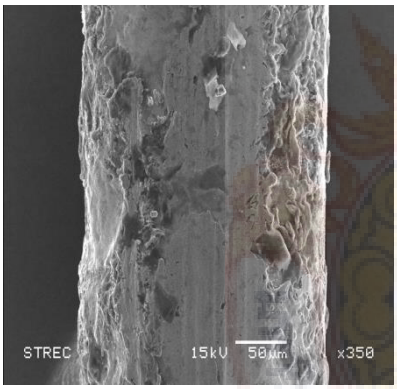
ข) ความเร็วในการตัด 6 มม./นาที ความหนา 5 มม. สึกหรอ 9.22%



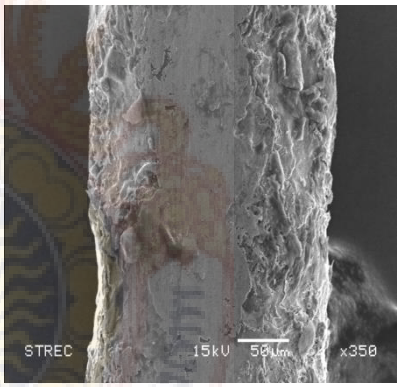
ค) ความเร็วในการตัด 1 มม./นาที ความหนา 10 มม. สึกหรอ 1.62%



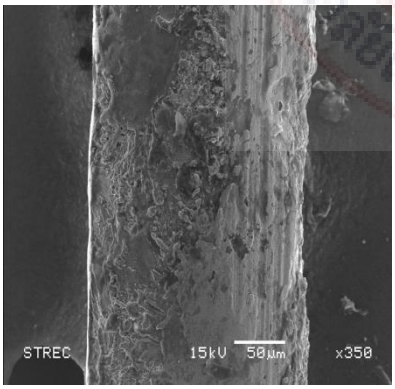
ง) ความเร็วในการตัด 6 มม./นาที ความหนา 10 มม. สึกหรอ 11.11%



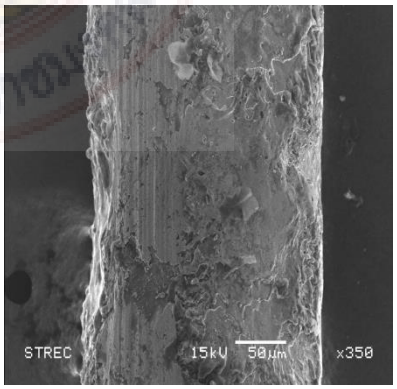
จ) ความเร็วในการตัด 1 มม./นาที ความหนา 25 มม. สึกหรอ 6.60%



ฉ) ความเร็วในการตัด 6 มม./นาที ความหนา 25 มม. สึกหรอ 21.73%

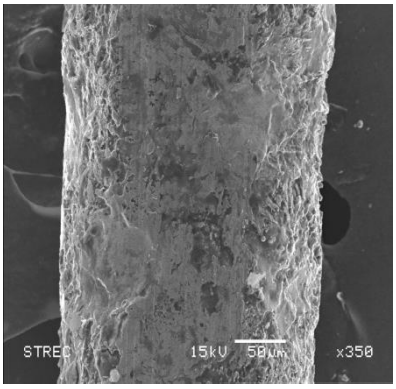


ช) ความเร็วในการตัด 1 มม./นาที ความหนา 50 มม. สึกหรอ 9.11%

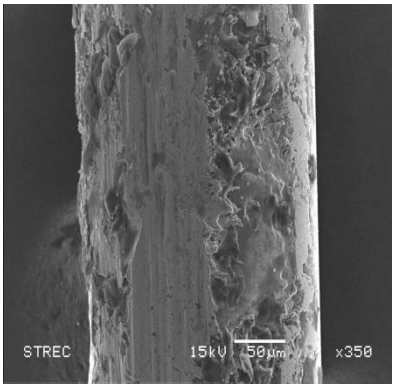


ซ) ความเร็วในการตัด 6 มม./นาที ความหนา 50 มม. สึกหรอ 14.82%

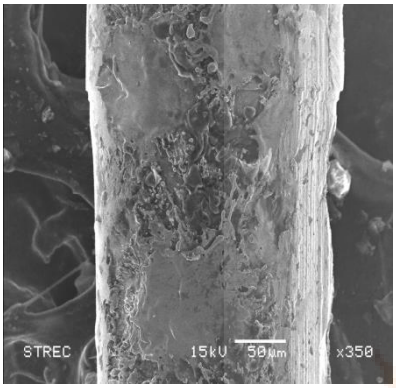
รูปที่ ค.4 การสึกหรอของพื้นผิวลวดอิเล็กโตรดจากการปรับความเร็วตัดสูงสุด



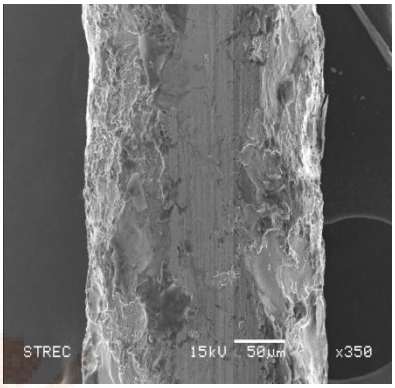
ก) ความต่างศักย์ 70 โวลต์ ความหนา 5 มม. สึกหรอ 3.57%



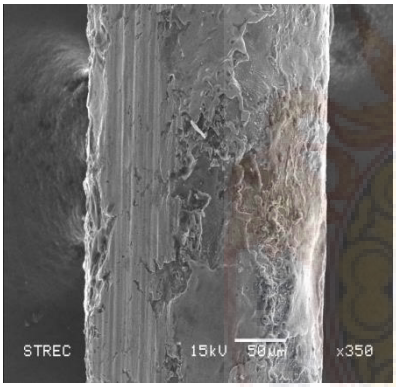
ข) ความต่างศักย์ 95 โวลต์ ความหนา 5 มม. สึกหรอ 6.58%



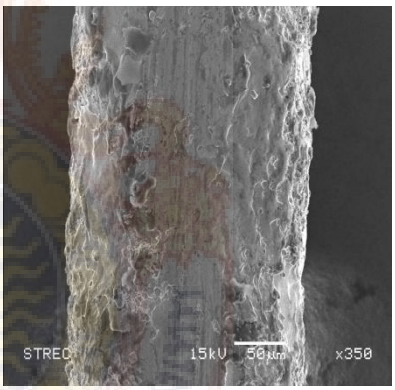
ค) ความต่างศักย์ 70 โวลต์ ความหนา 10 มม. สึกหรอ 6.69%



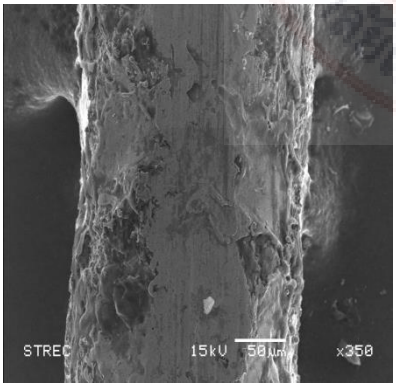
ง) ความต่างศักย์ 95 โวลต์ความหนา 10 มม. สึกหรอ 14.27%



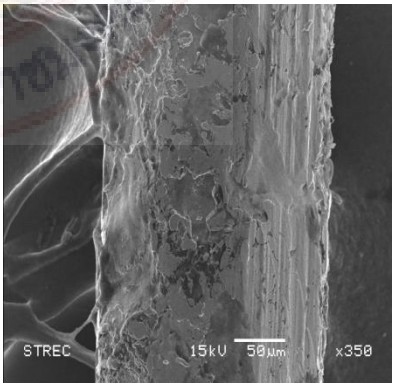
จ) ความต่างศักย์ 70 โวลต์ ความหนา 25 มม. สึกหรอ 15.97%



ฉ) ความต่างศักย์ 95 โวลต์ ความหนา 25 มม. สึกหรอ 23.13%

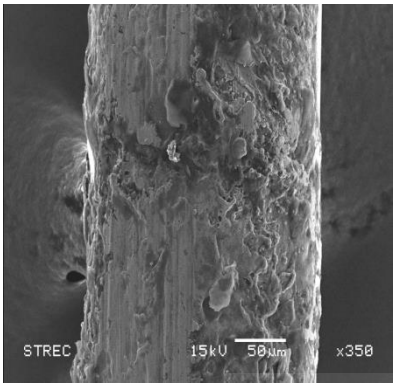


ช) ความต่างศักย์ 70 โวลต์ ความหนา 50 มม. สึกหรอ 11.50%

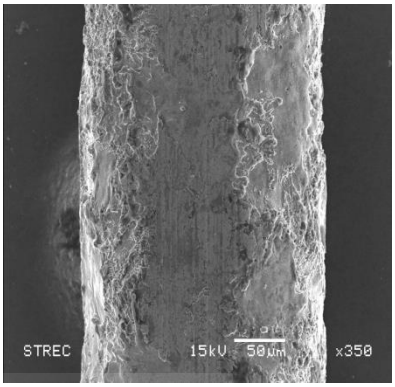


ซ) ความต่างศักย์ 95 โวลต์ ความหนา 50 มม. สึกหรอ 25.21%

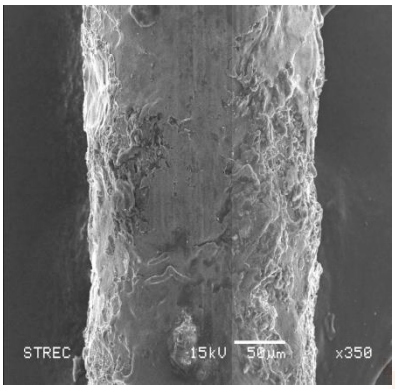
รูปที่ ค.5 การสึกหรอของพื้นผิวลวดอิเล็กโตรดจากการปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า



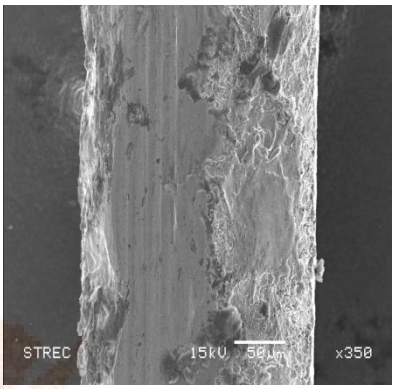
ก) ความถี่ 62,500 ครั้ง/นาที ความหนา 5 มม. สึกหรอ 8.70%



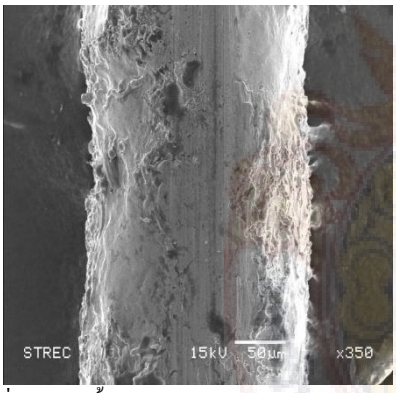
ข) ความถี่ 125,000 ครั้ง/นาที ความหนา 5 มม. สึกหรอ 6.16%



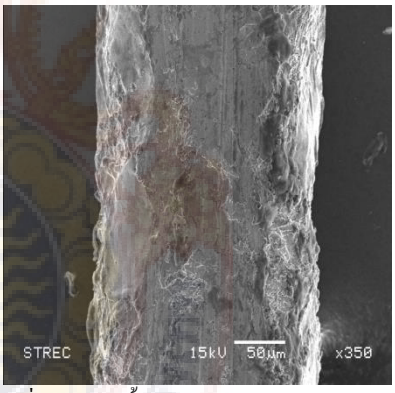
ค) ความถี่ 62,500 ครั้ง/นาที ความหนา 10 มม. สึกหรอ 9.83%



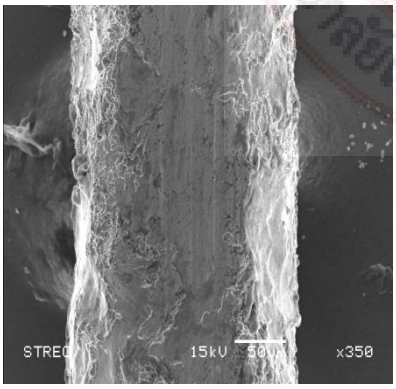
ง) ความถี่ 125,000 ครั้ง/นาที ความหนา 10 มม. สึกหรอ 9.43%



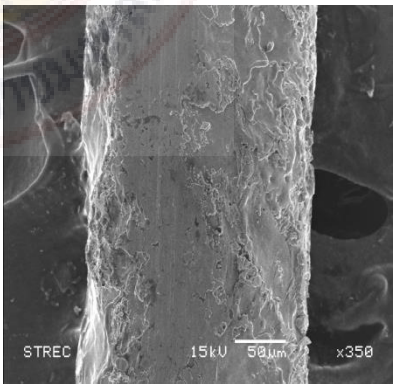
จ) ความถี่ 62,500 ครั้ง/นาที ความหนา 25 มม. สึกหรอ 26.24%



ฉ) ความถี่ 125,000 ครั้ง/นาที ความหนา 25 มม. สึกหรอ 14.97%

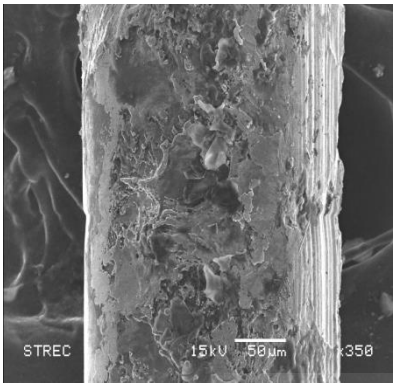


ช) ความถี่ 62,500 ครั้ง/นาที ความหนา 50 มม. สึกหรอ 23.38%

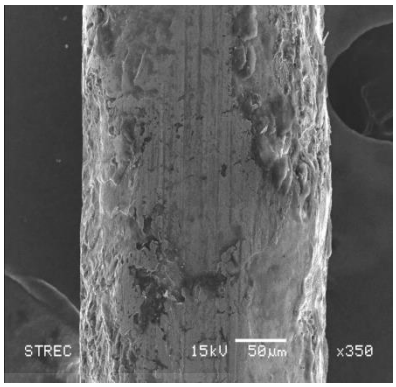


ซ) ความถี่ 125,000 ครั้ง/นาที ความหนา 50 มม. สึกหรอ 13.63%

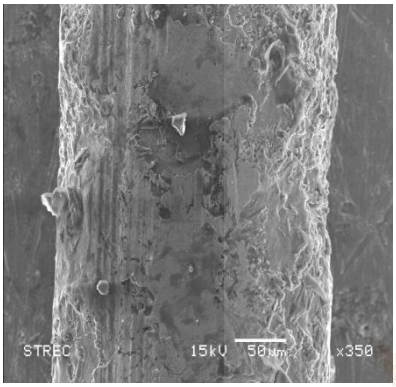
รูปที่ ค.6 การสึกหรอของพื้นผิวลวดอิเล็กโตรดจากการปรับความถี่ในการสปาร์ค



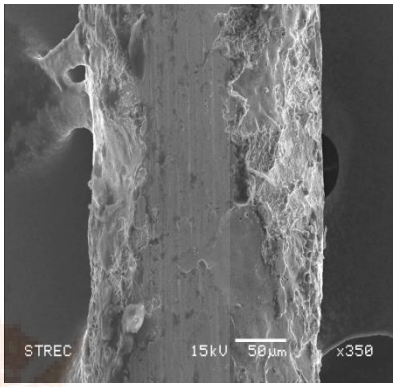
ก) ปัจจัยประสิทธิภาพ 29% ความหนา 5 มม. สึกหรอ 6.38%



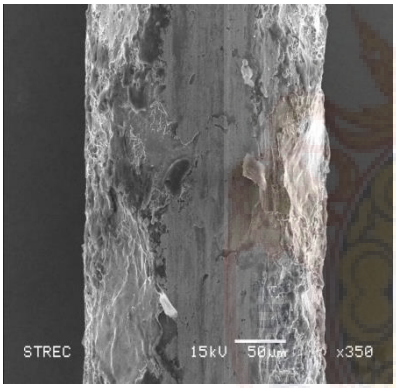
ข) ปัจจัยประสิทธิภาพ 57% ความหนา 5 มม. สึกหรอ 3.17%



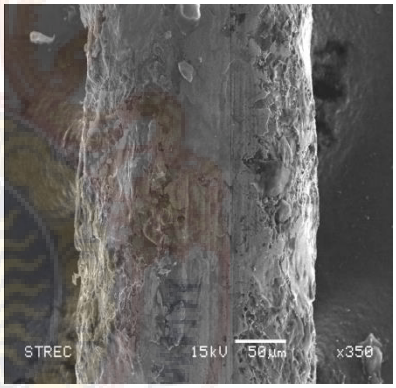
ค) ปัจจัยประสิทธิภาพ 29% ความหนา 10 มม. สึกหรอ 10.92%



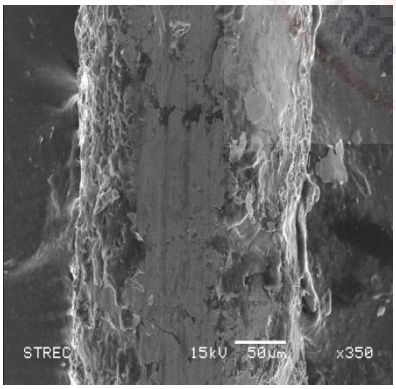
ง) ปัจจัยประสิทธิภาพ 57% ความหนา 10 มม. สึกหรอ 6.47%



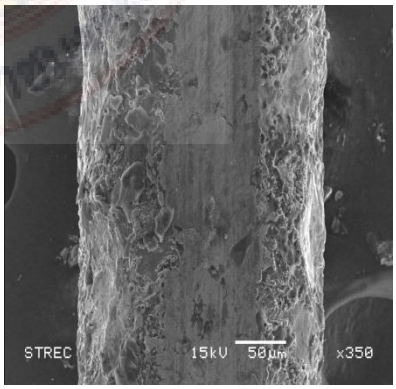
จ) ปัจจัยประสิทธิภาพ 29% ความหนา 25 มม. สึกหรอ 22.63%



ฉ) ปัจจัยประสิทธิภาพ 57% ความหนา 25 มม. สึกหรอ 9.01%



ช) ปัจจัยประสิทธิภาพ 29% ความหนา 50 มม. สึกหรอ 24.09%



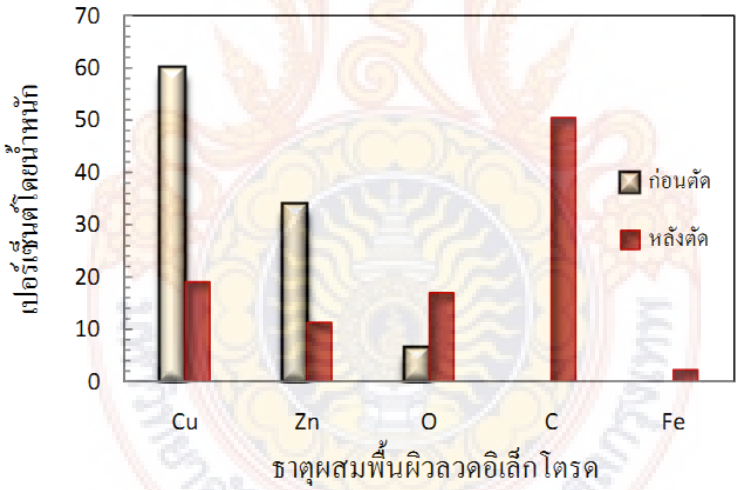
ซ) ความถี่ 125,000 ครั้ง/นาที ความหนา 50 มม. สึกหรอ 8.43%

รูปที่ ค.7 การสึกหรอของพื้นผิวลวดอิเล็กโตรดจากการปรับปัจจัยประสิทธิภาพ

จากการตัดวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าสำหรับใชในงานแม่พิมพ์งานเย็น SKD 11 โดยใช้ลวดอิเล็กโตรดเป็นทองเหลือง ตัดด้วยกระบวนการกัดอาร์กด้วยลวดไฟฟ้า (WEDM) ซึ่งพบว่าจะเกิดการกัดกร่อนของทั้งวัสดุชิ้นงาน และวัสดุลวดอิเล็กโตรดไฟฟ้า ซึ่งจากการตรวจสอบธาตุผสมบนพื้นผิววัสดุลวดอิเล็กโตรดทองเหลืองด้วยกระบวนการตรวจสอบสเป็กตั้มของธาตุ (EDX) พบว่า ลวดที่ผ่านการกัดกร่อนแล้วนอกจากจะสึกกร่อนแล้ว ส่วนผสมของธาตุพื้นผิววัสดุลวดอิเล็กโตรดมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงในตารางที่ ค.1

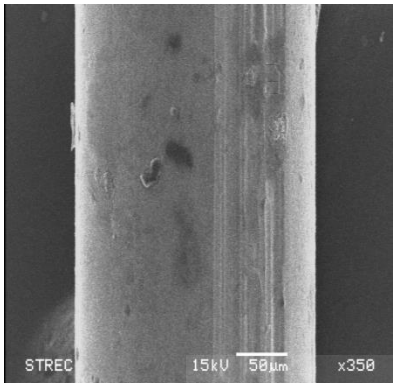
ตารางที่ ค.1 เปรียบเทียบธาตุผสมบริเวณพื้นผิววัสดุอิเล็กโตรดก่อนและหลังการตัดวัสดุชิ้นงาน

ลวดอิเล็กโตรดทองเหลืองก่อนการตัด			ลวดอิเล็กโตรดทองเหลืองที่ผ่านการตัด		
Element	Weight%	Atomic%	Element	Weight%	Atomic%
Cu	59.86	50.83	Cu	19.03	5.32
Zn	33.84	27.94	Zn	11.28	3.07
O	6.30	21.23	O	16.94	18.43
C	-	-	C	50.48	72.48
Fe	-	-	Fe	2.27	0.70
รวม (%)	100.00	100.00	รวม (%)	100.00	100.00

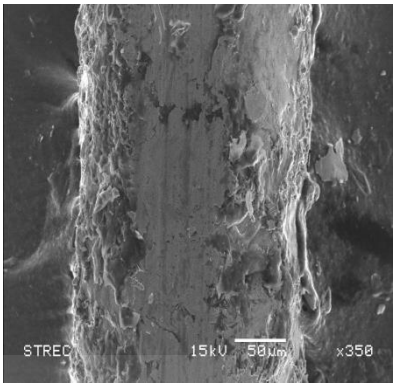


รูปที่ ค.8 เปรียบเทียบปริมาณธาตุผสมบนพื้นผิววัสดุอิเล็กโตรดก่อน และหลังกระบวนการตัดวัสดุชิ้นงาน

จากการเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของปริมาณธาตุบนพื้นผิววัสดุลวดอิเล็กโตรดก่อน และหลังกระบวนการตัดพบว่า ปริมาณของธาตุอ๊อกซิเจน (O) ซึ่งเป็นธาตุที่ทำให้เกิดชั้นอ๊อกไซด์ (Oxide) มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่วนธาตุทองแดงและทองเหลืองมีปริมาณลดลง เนื่องจากในกระบวนการตัดด้วยลวดไฟฟ้าจะทำให้เกิดการหลอมละลายของวัสดุชิ้นงาน และวัสดุลวดอิเล็กโตรดทำให้คาร์บอน และเหล็กซึ่งเป็นธาตุหลักที่ผสมอยู่ในวัสดุชิ้นงานหลอมละลาย และถูกขจัดออกเข้ามารวมตัวกับพื้นผิววัสดุเส้นลวดอิเล็กโตรดที่เกิดการหลอมละลายและสึกกร่อน ทำให้พื้นผิววัสดุลวดอิเล็กโตรดมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ ค.9



ก) พื้นผิวก่อนการตัดวัสดุชิ้นงาน



ข) พื้นผิวหลังการตัดวัสดุชิ้นงาน

รูปที่ ค.9 เปรียบเทียบลักษณะพื้นผิววัสดุอิเล็กโตรดก่อน และหลังกระบวนการตัดวัสดุชิ้นงาน