

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วย
วิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด

THE INVESTIGATION ON THE EFFECT OF WIRE-EDM
PROCESS PARAMETERS OF NAK80 MOLD STEEL CUTTING

จิรายุ ศรีอัครี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ.2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วย
วิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ.2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด

The Investigation on the Effect of Wire-EDM Process Parameters of NAK80 Mold Steel Cutting

ชื่อ - นามสกุล

นายจิรายุ ศรีอเคราะห์

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.

ปีการศึกษา

2560

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทน์มณี, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อังกฤ อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 15 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด
ชื่อ-นามสกุล	นายจิรายุ กรือเครือ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชยะ ปรานิตพลกรัง, D.Eng.
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด (Wire-EDM) โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยทฤษฎีเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรในการตัดที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิว และศึกษาผลกระทบของกระบวนการที่มีผลต่อ การเกิดชั้นเคลือบผิว การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) ของชิ้นงานที่ตัดด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ทำการตัดชิ้นงานด้วยกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด โดยใช้ลวดอิเล็กโทรดทองเหลืองขนาด 0.25 มม. ตัดชิ้นงานให้ได้ขนาด 10 x 10 x 10 มม.³ ทำการทดลองโดยวิธีการของทฤษฎีแบบไขว้ตัวแปรตามตารางการทดลอง L9 สำหรับปัจจัยควบคุมที่ทำการศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) และ อัตราการป้อน (FA)

ผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จและอัตราการป้อน ไม่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวในการทดลองครั้งนี้และเงื่อนไขในการทดลองที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดจากการศึกษาครั้งนี้ คือ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ ที่ 3 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์และอัตราการป้อนที่ 6.1 มม/นาที ได้ค่าความหยาบผิวที่ 3.247 ไมโครเมตร จากทดลองในการเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จให้สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดชั้นผิวหลวมใหม่ลดลงและทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: เหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 วิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด ความหยาบผิว

Thesis Title	The Investigation on the Effect of Wire-EDM Process Parameters of NAK80 Mold Steel Cutting
Name – Surname	Mr. Jirayu Khuakhue
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Chaiya Praneetponggrung, D.Eng.
Academic Year	2017

ABSTRACT

The purposes of this research were 1) To investigate on the optimization of the cutting NAK 80 mold steel by the wire EDM method. The research used Taguchi's robust design analysis method in order to determine the optimum combination of process parameters that promote the surface roughness during its cutting procedure. 2) To identify the effect of the wire EDM parameter process promoting the new layers and micro-cracks.

In this research, the NAK80 mold steel was used as a specimen. Whilst a brass wire of 0.25 mm was used as a tool to cut the specimen size 10x10x10 mm³. There were 3 control factors used in the experiment under the Taguchi robust cross analysis of L9 orthogonal array: Discharge current (IP), gap voltage (VG) and feed rate address (FA).

The results showed that the discharge current was the most significant factor affecting surface roughness while the voltage gap and feed rate were not considering as the significant factors. The minimum surface roughness was obtained with discharge current at 3 amperes, voltage gap at 62 volt and feed rate address at 6.1 mm/min, respectively. The obtained results showed that the new layers decreased but micro cracks increased when the current discharge increasing. In addition, the Taguchi's robust design analysis proved to be an effective technique to optimize the machining parameters for the wire-EDM process of NAK80 steel.

Keywords: NAK80 mold steel, wire electric discharge machining (Wire-EDM), surface roughness

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชยะ ปราณีตพลกรัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำชี้แจงตลอดจนช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ ทางผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมาไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ในสาขาวิศวกรรมการผลิต ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มทร.ธัญบุรีที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มทร.รัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทางด้านเครื่องมือเครื่องจักรสำหรับศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ผู้ที่ให้ความรักและเป็นกำลังใจในการเรียน การศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



จิรายุ ศรีอเครีอ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	11
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	12
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	12
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 เทคโนโลยีการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า.....	14
2.2 การควบคุมการทำงานของเครื่องอัตโนมัติการตัดด้วยเส้นลวด.....	17
2.3 แหล่งจ่ายพลังงานดิสชาร์จ.....	18
2.4 เหล็กกล้าเครื่องมือ.....	20
2.5 ความเรียบผิวงาน.....	28
2.6 การออกแบบการทดลอง.....	31
2.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา.....	38
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
2.9 บทสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	43
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	46
3.3 หลักการออกแบบการทดลอง.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง.....	52
4.1 ผลการทดลองสำหรับค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน.....	52
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด...	57
4.3 ผลการตรวจสอบรอยแตกร้าวในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด	59
4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ	60
4.5 ผลการศึกษาความแข็งชั้นผิวเคลือบ.....	66
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลการทดลอง	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก.....	74
ภาคผนวก ข	90
ประวัติผู้เขียน.....	100

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80	28
ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบ สมบูรณ์และการออกแบบการทดลองตามแนวทางทฤษฎี	33
ตารางที่ 2.3 การออกแบบการทดลองชนิด $L_4(2^3)$	34
ตารางที่ 2.4 การออกแบบการทดลองชนิด $L_9(3^1)$	34
ตารางที่ 2.5 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80	46
ตารางที่ 3.2 แสดงระดับของตัวแปรในการทดลอง	48
ตารางที่ 3.3 ตารางการออกแบบการทดลอง OA, L_9	48
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน	52
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่า S/N Ratio ที่ได้จากการทดลอง	53
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า S/N Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบความ หยาบผิว (Ra)	54
ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra)	55
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแปรปรวนของความหยาบผิว (Ra)	56
ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลของค่าความหยาบผิว	56
ตารางที่ 4.7 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ	56
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2, 5, 8, 11 และ 14A	66

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปเครื่อง EDM.....	15
รูปที่ 2.2 รูปเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า	15
รูปที่ 2.3 ลักษณะรอยตัดของ Wire-cut EDM	16
รูปที่ 2.4 แสดงผังของระบบควบคุมแบบปรับค่าได้ที่เหมาะสมสำหรับอีดีเอ็มชนิดการตัดด้วย เส้นลวด	17
รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมสำหรับ ACO เพื่อควบคุมแรงเคลื่อนที่ดิสชาร์จ (V_d).....	18
รูปที่ 2.6 รูปคลื่นจินตภาพของแรงเคลื่อนดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จ	19
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมกรณีที่กำลังช่วงเวลาพัลส์คงที่.....	19
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะส่วนประกอบของผิว.....	30
รูปที่ 2.9 แสดงการวัดค่า Ra.....	30
รูปที่ 2.10 แสดงการวัดค่า Rz.....	30
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ	31
รูปที่ 2.12 หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง.....	32
รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	39
รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายจากกล้องเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS).....	39
รูปที่ 3.1 ลวดทองเหลืองขนาด 0.25 มม.	44
รูปที่ 3.2 เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA20S Advance	45
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงานยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ3-10	45
รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	46
รูปที่ 3.5 แสดงการจับยึดเหล็กกล้าแม่พิมพ์บน โต๊ะของเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า	49
รูปที่ 3.6 การเดินตัดชิ้นงานตามโปรแกรมที่ได้เขียนไว้.....	49
รูปที่ 3.7 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัดด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด	50
รูปที่ 3.8 แสดงการวัดค่าความหยาบผิว.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.9 การตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	51
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระดับต่าง ๆ ของปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการทดลอง กับค่า S/N Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิว (Ra)	54
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้า ดิสชาร์จ (a) 2 A, (b) 5 A, (c) 8 A, (d) 11 A และ (e) 14 A	57
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (a) 2 A, (b) 5 A, (c) 8 A, (d) 11 A และ (e) 14 A	58
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (a) 2 A, (b) 5 A, (c) 8 A, (d) 11 A และ (e) 14 A	60
รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2	61
รูปที่ 4.6 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 5 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2	62
รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 8 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2	63
รูปที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 11 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2	64
รูปที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 14 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2	65
รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งการกวดความแข็ง	65
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีต่าง ๆ ทางวิศวกรรมถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างสรรค์สิ่งทีก่อให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด ดังนั้นด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีจึงก่อให้เกิดการพัฒนาและค้นพบนวัตกรรมใหม่ๆ ทางด้านวัสดุศาสตร์ ซึ่งมีส่วนช่วยทำให้เกิดทางเลือกใหม่สำหรับการเลือกรูปแบบของวัสดุเมื่อนำไปใช้งาน ความเป็นไปได้ในการออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานก็มีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับวัสดุ NAK80 นับเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่ได้รับการนิยมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่นการทำเครื่องมือ ชิ้นส่วนในงานขึ้นรูปต่าง ๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น อาทิเช่น มีความเหนียวและความแข็งดีเยี่ยม ลดความเสี่ยงต่อความเสียหายและบิดงอที่เกิดจากการชุบแข็ง มีความทนทานสูง ในแง่ของด้านการผลิตนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำในการผลิตค่อนข้างสูงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมามีคุณภาพตามต้องการ จึงมีการนำเอาเทคโนโลยีต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้งานตั้งแต่การออกแบบ การเขียนแบบ จนถึงการผลิต จากการศึกษาสภาพโดยทั่วไปของเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ ที่นำเข้ามาใช้ในสถานประกอบการ ผลการศึกษาพบว่า โดยรวมทุกสถานประกอบการมีการนำเครื่องคอมพิวเตอร์มาช่วยในการทำงานทางด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะทางด้านการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบเขียนแบบและ โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการควบคุมเครื่องจักรอัตโนมัติ อย่างเช่นเครื่องตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire Electric Discharge Machining : Wire - EDM) ที่นำมาเป็นส่วนหนึ่งในการผลิต [1-2] กระบวนการตัดวัสดุด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire-EDM) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งในกลุ่มการตัดเนื้อวัสดุแบบใหม่ (Non-Traditional Machining Processes) ที่นิยมใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน เนื่องจากสามารถตัดวัสดุที่มีความแข็งสูงได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่าความแข็งของวัสดุ แต่วัสดุที่นำมาตัดจะต้องนำไฟฟ้า [3-5]

ที่ผ่านมาได้มีการแปรรูปชิ้นส่วน โดยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นกระบวนการแปรรูปชนิดพิเศษ ที่มีลักษณะการตัดรูปร่างแบบทะลุผ่านคล้ายกับการเลื่อยฉลุ ด้วยเส้นลวดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก 0.1 - 0.3 มิลลิเมตร ทำให้สามารถใช้ตัดรูปร่างชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและซับซ้อนได้แต่ยังไม่มีความรู้เกี่ยวกับการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 มากนักเพราะวัสดุชนิดนี้เป็นวัสดุชนิดใหม่ ทำให้มีปัญหาในการตัดค่อนข้างมาก เนื่องจากยังไม่มีค่ามาตรฐานที่จะใช้ในการปรับตั้งค่าปัจจัยในการแปรรูปที่เหมาะสม จึงทำให้เกิดการทำงานที่ล่าช้าและ

มีความไม่สม่ำเสมอในการแปรรูป ดังนั้นการหาแนวทางสำหรับควบคุมปัจจัยต่าง ๆ จึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการแปรรูปและเพื่อศึกษาพัฒนาการประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสม

ด้วยเหตุผลดังกล่าววิทยานิพนธ์นี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด เพื่อหาค่าตัวแปรในการตัดชิ้นงานที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน โดยการกำหนดปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP), แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG), อัตราป้อน (FA) โดยใช้วิธีการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi Method) ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานที่ทำการตัดขึ้นรูปด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด เพื่อการใช้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลกระทบของปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ตัดด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด โดยใช้วิธีการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi Method)

1.2.2 ศึกษาผลกระทบของกระบวนการที่มีผลต่อ การเกิดชั้นเคลือบผิว การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) ของชิ้นงานที่ตัดด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA20S Advance ใช้ลวดอีเล็กโทรดทอง เหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มม.

1.3.2 วัสดุที่ใช้คือเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ชิ้นงานทดสอบมีขนาดความกว้าง 10 มม ยาว 10 มม และหนา 10 มม

1.3.3 กำหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1.3.3.1 กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) มีค่า 2, 3 และ 4 แอมแปร์

1.3.3.2 แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) มีค่า 58, 60 และ 62 โวลต์

1.3.3.3 อัตราป้อน (FA) มีค่า 4.1, 5.1 และ 6.1 มม/นาที

1.3.4 ศึกษาการเกิดของชั้นเคลือบผิว รอยแตกร้าวขนาดเล็กและความแข็งของผิวชิ้นงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิว

1.4.2 ได้ความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของกระบวนการที่มีผลต่อ การเกิดชั้นเคลือบผิว การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) ของชิ้นงานเพื่อเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของชิ้นงาน

1.4.3 สามารถนำความรู้จากงานวิจัยไปพัฒนาและปรับปรุง เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการตัดวัสดุแม่พิมพ์ในโรงงานอุตสาหกรรม



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยเรื่องการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดเป็นการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด ได้ศึกษาค้นคว้าตำรา และงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัย อาทิเช่น เทคโนโลยีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า เหล็กกล้าเครื่องมือ ความหยาบผิว งานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีการกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน โลหะหรืออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไม่ว่าจะเป็นแม่พิมพ์สำหรับโลหะหรือแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกนั้น ล้วนแล้วแต่ต้องผ่านขั้นตอนการผลิตที่ใช้เครื่อง EDM หรือที่เรียกว่า Electrical Discharged Machine โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ Sink-EDM และ Wire-EDM ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมของไทยมีใช้อยู่เป็นจำนวนมากโดยที่การกัดเซาะโลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (Electrical Discharged Machining Technology) เป็นกระบวนการที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานเป็นอย่างมาก เพราะเป็นกระบวนการที่ต้องเก็บรายละเอียดของชิ้นงาน ซึ่งเกือบจะเป็นขั้นตอนสุดท้าย อีกทั้งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการผลิตนานมาก

2.1.1 การกัดเซาะ โลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining) ใช้ในงานผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ทำด้วยวิธีการตัดเฉือนทั่วไปได้ยาก สามารถตัดเฉือนชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้ว ใช้ผลิตส่วนเบาของแม่พิมพ์การตัดเฉือนโลหะจะใช้การกัดเซาะทางไฟฟ้ามีอิเล็กโทรดเป็นตัวนำไฟฟ้า ข้อเสีย คือในงานที่ต้องการความละเอียดจะต้องใช้ตัวอิเล็กโทรดหลายอัน และงานที่ซับซ้อนจะมีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง



รูปที่ 2.1 รูปเครื่อง EDM

2.1.2 เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire Cutting Machine) จัดเป็นเครื่องจักรประเภทเดียวกับเครื่อง EDM แต่เปลี่ยนจากการใช้อิเล็กโทรดเป็นตัวตัดเฉือนชิ้นงานมาใช้ลวดทองเหลืองเป็นตัวตัดให้ได้รูปร่างตาม ต้องการในแนวตั้ง เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นเครื่องที่ตัดงานด้วยความเที่ยงตรงขนาดสูงมาก สามารถควบคุมขนาดได้เล็กกว่า 5 ไมครอนเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงในการทำชิ้นงานจึงเหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง



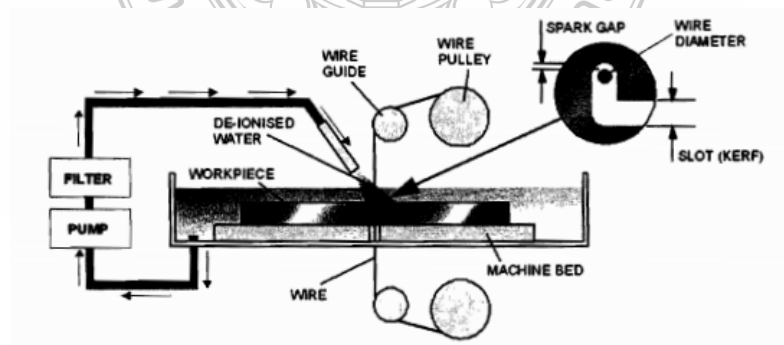
รูปที่ 2.2 รูปเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า

2.1.3 กรรมวิธีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด (Wire EDM) [8] เป็นส่วนหนึ่งของกรรมวิธีดีเอ็มที่นำมาใช้ในการตัดโลหะโดยอาศัยพลังงานจากการดีสชาร์จทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่องว่างระหว่างชิ้นงานและลวดอิเล็กโทรด โดยมีสารไดอิเล็กทริกเป็นตัวกลางการทำงาน การดีสชาร์จจะ

เกิดขึ้นเมื่อสภาพความเป็นฉนวนของตัวกลางถูกทำลายลง และเกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไหลผ่านระหว่างช่องว่าง มีผลทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายและเกิดการกัดเซาะออกไป ในขณะที่เดียวกันสารไดอิเล็กทริกที่ฉีดเข้าสู่ชิ้นงานจะช่วยในการหล่อเย็นและพัดพาเศษโลหะออกไปจากช่องว่าง และในการบวนการตัดอิเล็กโทรดจะมีการเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ อยู่ตลอดเวลาทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดนั้นคงที่เพื่อให้ได้ความกว้างของรอยตัดที่ได้มีความสม่ำเสมอ สำหรับการเคลื่อนที่ของเครื่องให้อิเล็กโทรดตัดชิ้นงานนั้น จะควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามรูปแบบที่ต้องการ

2.1.4 ของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric fluid) ของเหลวไดอิเล็กทริกที่ใช้กับเครื่อง EDM จะมีหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานแต่ในกรณีเกิดสภาพไอออนจะสูญเสียความเป็นฉนวนและเกิดการสปาร์ค ของเหลวไดอิเล็กทริกยังช่วยระบายความร้อน และจะพัดพาเศษโลหะที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับชิ้นงานให้หลุดออกไปเพื่อให้เกิดการตัดเซาะที่สมบูรณ์ ซึ่งของเหลวไดอิเล็กทริกที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ น้ำมันไฮโดรคาร์บอน น้ำกำจัดไอออน หรือน้ำกลั่น เป็นต้น

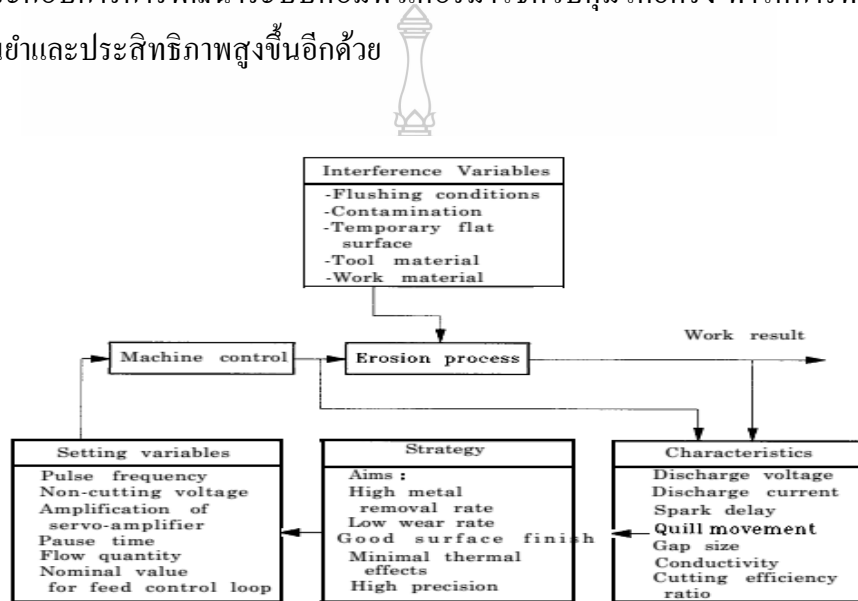
2.1.5 อิเล็กโทรด (Electrode) การเลือกใช้ลวดอิเล็กโทรดในวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดควรจะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เป็นตัวนำความร้อนที่ดี มีจุดหลอมละลายและจุดเดือดสูง ด้านทานการกัดเซาะจากไฟฟ้าหรือการสึกหรอตลอดจนมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ น้ำหนักเบา สำหรับวัสดุนิยมใช้ทำเป็นอิเล็กโทรดก็มีหลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ ทองแดง (Electrolytic Copper) อลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloys) ทองเหลือง (Brass) และเหล็กกล้า (Steel) แต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปเช่นกัน ส่วนขนาดของลวดที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มม. ถึง 0.3 มม. ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้



รูปที่ 2.3 ลักษณะรอยตัดของ Wire-cut EDM [8]

2.2 การควบคุมการทำงานของเครื่องอีดีเอ็มชนิดการตัดด้วยเส้นลวด[9]

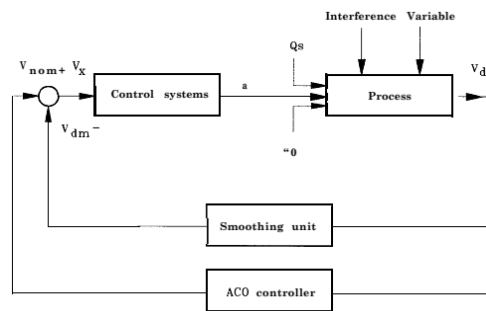
โดยทั่ว ๆ ไปการควบคุมการทำงานในอีดีเอ็มชนิดการตัดอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดเป็นการควบคุมกลไกในการป้อนชิ้นงานเพื่อรักษาช่องว่างระหว่างชิ้นงานและลวดอิเล็กโทรดให้คงที่ ในขณะที่เดียวกันก็เป็นการควบคุมแรงเคลื่อนคิซซาร์ระหว่างช่องว่างตามที่กำหนดอีกด้วย ปัจจุบันได้เอาระบบควบคุมอัตโนมัติแบบปรับค่าได้มาใช้ในเครื่องอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดเพื่อทำหน้าที่ดังกล่าว ครอบคลุมการพัฒนากระบวนการพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์มาใช้ควบคุมโดยตรง ทำให้การทำงานมีความถูกต้องแม่นยำและประสิทธิภาพสูงขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 2.4 แสดงผังของระบบควบคุมแบบปรับค่าได้ที่เหมาะสมสำหรับอีดีเอ็มชนิดการตัดด้วยเส้นลวด [9]

จากรูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบที่จำเป็นของระบบ ACO ของวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด สิ่งที่สำคัญก็คือ จะต้องมียุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Sensor) ที่เพียงพอต่อการตรวจวัดคุณสมบัติบางประการของตัวแปรที่บอกถึงสภาพต่าง ๆ ในขณะปฏิบัติงาน

การควบคุมแบบปรับค่าได้ที่ใช้สำหรับกรรมวิธีอีดีเอ็มนั้น เป็นลักษณะของการควบคุมเพื่อให้ได้เงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม โดยการรวบรวมเทคนิคต่าง ๆ ที่ได้จากประสบการณ์ของการทำงาน นำมากำหนดค่าตัวแปรที่จำเป็นต่อการให้ผลลัพธ์การทำงานที่ดีที่สุด ชุดควบคุมจะควบคุมด้วยการตรวจจับสัญญาณแรงเคลื่อนคิซซาร์แล้วนำมาประมวลผลและตัดสินใจปรับค่าควบคุมให้ได้ช่องว่างตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.5

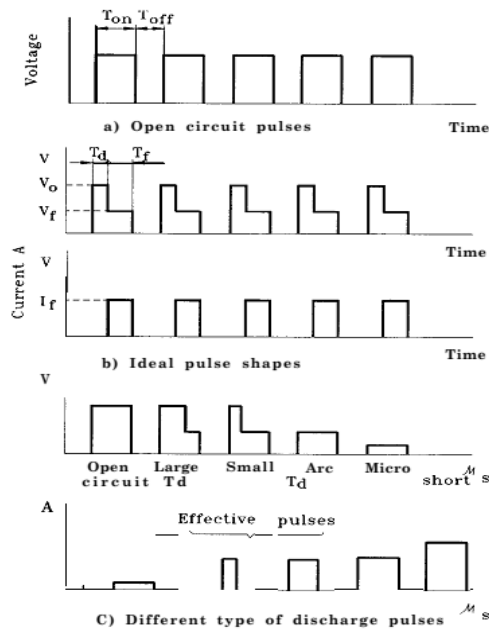


รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมสำหรับ ACO เพื่อควบคุมแรงเคลื่อนที่ดิสชาร์จ (V_d) [9]

สำหรับวงจรควบคุมการป้อนแรงเคลื่อน V_{nom} (Ideal Voltage) นั้น ตั้งค่าตามเงื่อนไขการแปรรูปอ้างอิงที่ต้องการไว้ก่อนการทำงานจริง ผลต่างระหว่างแรงเคลื่อนที่ต้องการ (V_{nom}) กับแรงดิสชาร์จเฉลี่ย (V_{dm}) ซึ่งได้มาจากการปรับส่วนเรียบในชุดป้อนกลับของแรงเคลื่อนดิสชาร์จที่เกิดจริง (V_d) คือ V_x จะนำไปใช้ปรับค่าเพื่อควบคุมชุดการทำงานของชุดกลไกการป้อนขึ้นงานให้ได้ช่องว่างระหว่างลวดคิเล็กโทรดกับชิ้นงานต่อไป

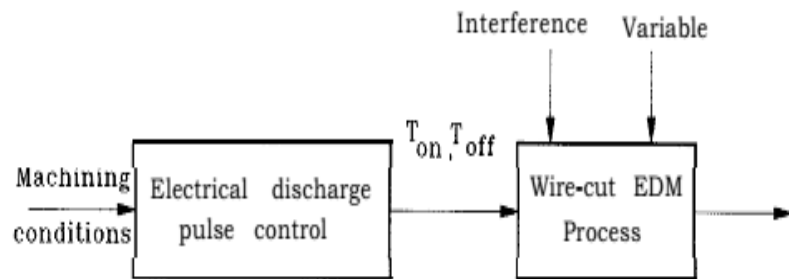
2.3 แหล่งจ่ายพลังงานดิสชาร์จ[9]

อุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของเครื่องอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด คือ แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Electrical Discharge Pulse Control) ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการจ่ายเป็นแรงเคลื่อนที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมอย่างเป็นจังหวะ (Pulse) ที่ต่อเนื่องกัน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นจินตภาพของแรงเคลื่อนดิสชาร์จและกระแสดิสชาร์จ [9]

2.3.1 กรณีที่ช่วงค่าพัลส์คงที่ (Constant Pulse Length) โดยปกติการกำหนดค่าช่วงเวลาพัลส์ในการทำงานมีความสำคัญมากซึ่งผู้ปฏิบัติงาน จะต้องเลือกค่าที่เหมาะสมในการทำงาน เพื่อให้การตัดมีความสม่ำเสมอมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมกรณีที่ใช้ค่าช่วงเวลาพัลส์คงที่ [11]

สำหรับวงจรควบคุมการจ่ายดิสชาร์จ (Electrical Discharge Pulse Control) สามารถตั้งช่วงเวลาพัลส์ต่าง ๆ (T_{on}, T_{off}) เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงตามที่ต้องการได้ ในขณะที่ปฏิบัติงานไม่สามารถที่จะปรับค่าเองได้ ต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานคอยทำหน้าที่ปรับค่าเงื่อนไขให้เหมาะสมตลอดเวลา เพื่อให้การตัดชิ้นงานกระทำได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในการกำหนดค่าเงื่อนไขต่าง ๆ ในการตัดชิ้นงานจึงต้อง

กำหนดให้เหมาะสม การทำงานในกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดมีปัญหาหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการขาดของลวดอิเล็กทรอนิกส์นั้นถือเป็นอุปสรรคที่สำคัญมาก เพราะมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานตลอดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องอีกด้วย

2.3.2 กรณีที่มีการปรับโดยอัตโนมัติ (Automatically Adjusted Pulse Length) เนื่องจากการทำงานของเครื่องอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด จึงจำเป็นต้องอาศัยผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญและประสบการณ์สูง เพื่อคอยควบคุมการปรับค่าช่วงเวลาพัลส์ให้เหมาะสมตลอดเวลา แต่มีข้อจำกัดในด้านความเร็วในการแก้ปัญหาประกอบกับความซับซ้อนของกรรมวิธี ทำให้การปฏิบัติงานไม่ต่อเนื่อง มีปัญหาการขาดของลวดอิเล็กทรอนิกส์อยู่บ่อย ๆ เกิดความเสียหายต่อผิวงานสำเร็จ สาเหตุที่ทำให้ลวดอิเล็กทรอนิกส์ขาดในขณะตัดงานนั้นเนื่องมาจากเกิดความเข้มข้นของดิสชาร์จที่จุดใดจุดหนึ่ง การเลือกเงื่อนไขในการแปรรูปไม่เหมาะสมการปรับค่าความถี่ของลวดอิเล็กทรอนิกส์โทรดมากเกินไป จากสาเหตุทั้ง 3 ประการ ดังกล่าว พอสรุปได้ว่า สาเหตุแรกนั้นมีผลมากที่สุดต่อการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องและการขาดของลวดอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนความเข้มข้นของดิสชาร์จนั้น เป็นกรณีที่มีการไหลของกระแสเกิดขึ้นในบางจุดของลวดอิเล็กทรอนิกส์โทรดมากกว่าปกติ ความร้อนจะเกิดขึ้นมากในบริเวณนั้นมีผลทำให้เกิดการไหม้ขึ้นได้

2.4 เหล็กกล้าเครื่องมือ [1]

สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย อธิบายว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ คือ เหล็กกล้าที่ใช้สำหรับงานเครื่องมือขึ้นรูปโลหะเป็นส่วนใหญ่ เช่น แบบหล่อโลหะในขบวนการอัดฉีดโลหะร้อน (Die casting) แม่พิมพ์สำหรับตีขึ้นรูปหรือตัดวัสดุต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงเหล็ก โลหะนอกกลุ่มเหล็ก และพลาสติก เหล็กกล้าเครื่องมือจัดเป็นเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนและธาตุผสมอื่น ๆ ในปริมาณสูง เพื่อให้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง และเพื่อสร้างคาร์ไบด์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการสึกหรอ

คุณสมบัติของเหล็กกล้าเครื่องมือ ความสามารถในการชุบแข็ง คือคุณสมบัตินี้จะขึ้นกับส่วนผสมทางเคมีและขนาดเกรนของเหล็กกล้า โดยเหล็กกล้าที่มีความสามารถในการชุบแข็งสูงจะสามารถทำการชุบแข็งได้ง่ายด้วยลม แต่เหล็กกล้าที่มีความสามารถในการชุบแข็งต่ำ การชุบแข็งด้วยลมจะไม่สามารถทำได้เฟสมาร์เทนไซต์ จึงอาจต้องทำการชุบแข็งด้วยน้ำหรือของเหลวอื่น ซึ่งมีผลต่อการบิดตัวของชิ้นงานที่ทำการชุบ คุณสมบัตินี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณธาตุผสม ดังนั้น การทำให้ได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูงตลอดชิ้น หรือสามารถชุบแข็งได้ลึก จึงควรใช้เหล็กกล้าที่มีธาตุผสมสูงโดยโคบอลต์เป็นเพียงธาตุเดียวที่ลดคุณสมบัตินี้

ความเหนียว (Toughness) คือ ความสามารถในการรับพลังงานของวัสดุก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เหล็กกล้าเครื่องมือที่ถือว่ามีคุณสมบัติด้านความเหนียวที่ดี คือ กลุ่มที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำหรือปานกลาง คุณสมบัตินี้จำเป็นสำหรับการใช้งานในสภาวะที่ต้องรับแรงกระแทก

ความทนต่อการเสียดสี (Wear resistance) คือ ความสามารถทนต่อการถูกขัดสี ซึ่งรวมถึงการเสียดสีของคมตัดด้วย คุณสมบัตินี้จะเกี่ยวข้องกับความแข็งของเหล็ก และปริมาณ คาร์ไบด์ที่ไม่ละลาย คาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวเมื่อมีการใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง โดยหากเหล็กกล้าเครื่องมือมีความแข็งสูงก็จะทนการเสียดสีได้ดี หรือหากมีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลาย (แม้อุณหภูมิสูง) ก็จะทำให้ทนการเสียดสีได้ดีขึ้นเช่นกัน เนื่องจากคาร์ไบด์จะมีความแข็งสูง

การรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (Red-hardness) เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือที่ต้องได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 480°C โดยธาตุผสมที่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่เสถียรจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัตินี้ ซึ่งจะช่วยให้เหล็กกล้าเครื่องมือไม่อ่อนลง (ความแข็งลดลง) อันเนื่องมาจากผลของความร้อนในขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง หรือในขณะทำการอบคืนตัว (Tempering)

ความสามารถในการกลึงไส (Machinability) คือ ความสามารถของโลหะที่จะกลึงไส ตกแต่งได้ง่าย และมีผิวที่เรียบภายหลังการกลึงไส

ความต้านทานการสูญเสียคาร์บอน (Resistance to decarburization) การสูญเสียคาร์บอนซึ่งจะเกิดเมื่ออบเหล็กที่อุณหภูมิสูงกว่า 704°C (1300°F) เป็นผลให้ความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบแข็งต่ำลง เหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคุณสมบัตินี้ต่ำจะต้องมีวิธีป้องกันควบคุมบรรยากาศในการอบชุบความร้อนเพื่อไม่ให้ชิ้นงานสูญเสียคาร์บอน โดยเฉพาะที่ผิว สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลักจะสามารถต้านทานการสูญเสียคาร์บอนได้ดี

การไม่เปลี่ยนรูปร่างหรือขนาด (Non deformation properties) คุณสมบัตินี้สัมพันธ์กับความสามารถในการชุบแข็ง โดยทั่วไปเหล็กกล้าที่สามารถชุบแข็งได้ด้วยลมจะมีการบิดตัวน้อยที่สุด ส่วนเหล็กกล้าที่ทำการชุบแข็งด้วยน้ำมันทำให้เกิดการบิดตัวปานกลาง และเหล็กกล้าที่ทำการชุบแข็งด้วยน้ำทำให้เกิดการบิดตัวสูงที่สุด ดังนั้นในการออกแบบเลือกเหล็กกล้าเครื่องมือจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านนี้ด้วย

2.4.1 การแบ่งกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือ[1]

เหล็กกล้าเครื่องมือเป็นเหล็กที่มีความหลากหลายในการใช้งาน การเลือกใช้ไม่จำกัดที่จะต้องเลือกเกรดใดเกรดหนึ่ง สามารถใช้งานแทนกันได้ อย่างไรก็ตาม หากแบ่งเหล็กกล้าเครื่องมือตามลักษณะการใช้งานจะสามารถแบ่งได้ 6 ประเภทดังนี้

2.4.1.1 เหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon) ที่ผสมคาร์บอน ตั้งแต่ 0.60-1.40% ดังนั้นคุณสมบัติด้านการชุบแข็ง หรือความลึกของผิวชุบแข็งจึงต่ำ และจำเป็นต้องชุบแข็งด้วยน้ำ ในบางเกรดอาจมีการผสม โครเมียมหรือวานาเดียมลงไปเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความสามารถในการชุบแข็ง และทนต่อการเสียดสี

2.4.1.2 เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold work tool steels) เป็นกลุ่มที่ใช้ผลิตเครื่องมือสำหรับนำไปใช้ในงานแปรรูปโลหะที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการแปรรูป เช่น แม่พิมพ์ตัดแผ่นโลหะเย็น ใบมีดตัดกระดาษ เฟืองกัดไม้ คัตเตอร์ เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญที่ต้องการสำหรับเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสดี เปลี่ยนแปลงขนาดน้อยหลังการชุบแข็ง เนื่องจากการชุบแข็งจะทำโดยการชุบน้ำมันหรือให้เย็นตัวในอากาศ ด้านทานการสึกหรอสูงและมีความเหนียวทนแรงอัดกระแทกได้ดี เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น ได้แก่

1) เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทชุบด้วยน้ำมัน เป็นกลุ่มที่มีคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอสูง และมีความแข็งสูง ซึ่งเป็นผลมาจากมีปริมาณคาร์บอนสูง และคาร์ไบด์ขนาดเล็กที่มีอยู่อย่างกระจาย ธาตุผสมเพียงเล็กน้อยของ โครเมียม โมลิบดีนัม และทังสเตน ทำให้สามารถชุบแข็งได้ด้วยน้ำมัน ซึ่งมีข้อดีกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำเนื่องจากการชุบแข็งด้วยน้ำมันจะทำให้ชิ้นงานบิดตัว และมีโอกาสแตกละเอียดน้อยกว่าการชุบแข็งด้วยน้ำอย่างมาก ตัวอย่างการใช้งานเหล็กกล้ากลุ่มนี้ ได้แก่ เครื่องทำเกลียว (Taps) เครื่องคว้าน (Reamers) ใบตัด (Circular cutters) เครื่องคว้านรู (Broaches) สว่าน (Drills) แม่พิมพ์เจาะรู (Blanking dies) หัวกด (Punches) แม่พิมพ์ขึ้นรูป (Forming dies) แม่พิมพ์สำหรับงานตัดขอบเย็น (Cold-trimming dies) ใบมีดตัดขนาดเล็ก (Small shear blades) แม่พิมพ์งานลากขึ้นรูป (Drawing dies) รวมถึงแม่พิมพ์สำหรับพลาสติกหรือยาง เป็นต้น โดยทั่วไปเกรดที่มีการใช้งานกันมาก ได้แก่ O1 เนื่องจากมีความสามารถในการชุบแข็งสูง และเกรนขยายตัวช้าที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีความเหนียวเหนือกว่าเกรดอื่น ๆ เล็กน้อย สำหรับเกรด O6 จะมีคุณสมบัติกลึงไสที่ดีในสภาพการอบอ่อน เนื่องจากการฟอร์มตัวของเกล็ดกราไฟต์ แต่คุณสมบัติการรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงยังต่ำพอ ๆ กับเหล็กกล้าเครื่องมือชุบแข็งด้วยน้ำสำหรับการใช้งานที่ต้องการอายุการใช้งานที่นานขึ้นอาจใช้เกรด O7 ซึ่งมีคุณสมบัติด้านทานการสึกหรอสูงที่สุด

2) เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทชุบด้วยลม เป็นกลุ่มที่มีธาตุผสมมากกว่าเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทชุบด้วยน้ำมัน โดยมีปริมาณคาร์บอนสูงและธาตุผสมสูงปานกลาง ซึ่งจากปริมาณธาตุผสมที่สูงทำให้เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้มีความสามารถในการชุบแข็งสูง ซึ่งเพียงพอที่จะชุบแข็งให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ด้วยลม การเย็นตัวในอัตราที่ต่ำจะทำให้ชิ้นงานบิดเบี้ยวน้อย ลดโอกาสที่ชิ้นงานจะแตกได้ และมีคุณสมบัติการไม่เปลี่ยนรูปร่างหรือขนาดได้

เยี่ยมมากในระหว่างการอบชุบความร้อน นอกจากนี้ปริมาณคาร์ไบด์จำนวนมากทำให้มีคุณสมบัติทนต่อการเสียดสีที่ดี อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีธาตุผสมที่สูง แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีคุณสมบัติความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงได้สูงพอที่จะใช้กับงานร้อน หรืองานตัดความเร็วสูง ดังนั้นส่วนใหญ่เหล็กกล้ากลุ่มนี้จึงเหมาะกับงานเย็นเท่านั้น การใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้สามารถใช้งานได้ประเภทเดียวกับกลุ่มที่ชุบด้วยน้ำมัน แต่คุณสมบัติที่เหนือกว่า คือความสามารถในการชุบแข็ง ซึ่งจะมีข้อได้เปรียบด้านการบิดเบี้ยวของชิ้นงานที่น้อยกว่าและเพิ่มความปลอดภัยในระหว่างการชุบแข็ง เกรดที่นิยมใช้งานกันมาก ได้แก่ A2 สำหรับเกรดอื่นที่มีการใช้งานอยู่บ้าง ได้แก่ A6 A8 และ A10 (มีกราฟต์อิสระในโครงสร้าง เพื่อเพิ่มความสามารถในการกลึงไส)

3) เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นประเภทคาร์บอนสูงและโครเมียมสูง เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในกลุ่มเหล็กกล้าเครื่องมือเย็น ธาตุผสมหลัก คือ คาร์บอน โครเมียม และโมลิบดีนัม โดยมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอและการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้สามารถรักษาคมตัดไว้ได้นาน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณคาร์ไบด์ในระดับสูง และโครงสร้างเทมเปอร์มาร์เทนไซต์ภายหลังจากชุบแข็งและอบคืนตัว (Tempering) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดประการสำคัญของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการกลึงไสที่ต่ำมากและมีความเหนียวที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นในกลุ่มอื่น การใช้งานเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้สามารถใช้กับงานเย็นได้ทุกประเภท เช่น แม่พิมพ์เจาะรู (Blanking dies) ใบมีดตัด (Slitting cutters) แม่พิมพ์ขึ้นรูป (Forming dies) แม่พิมพ์ลากขึ้นรูปลึก (Deep-drawing dies) แม่พิมพ์ดึงลวด (Wire drawing dies) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปเย็น (Cold-extrusion dies) ลูกกรีดสำหรับตัดโค้งและขึ้นรูป (Bending and forming rolls) ใบมีด (Shear blades) ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ทนต่อการสึกหรอ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่นิยมใช้งานสำหรับงานแม่พิมพ์ และหัวกดของงานขึ้นรูปเย็น งานเจาะรู (Blanking) เหล็กเกรด D2 จะหาซื้อได้ง่ายและมีการใช้งานมาก สำหรับการใช้งานที่ต้องการอายุยาวนานขึ้นอาจเลือกใช้ กลุ่มที่มีคาร์บอนสูงกว่า ได้แก่ D3 D4 และ D7 ซึ่งจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงกว่า D2 แต่จะมีข้อจำกัด คือ การกลึงไสทำได้ยากขึ้น

2.4.1.3 เหล็กกล้าเครื่องมือทนต่อแรงกระแทก (Shock resisting tool steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่พัฒนาให้มีความเหนียว ความแข็งแรง และความต้านทานการสึกหรอสูงเพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องรับแรงกระแทกซ้ำ ๆ กัน เช่น ค้อน (Chisel) หัวกด (Punch) และแม่พิมพ์ (Die) เป็นต้น โดยความเหนียวสูงเป็นผลจากปริมาณคาร์บอนในระดับปานกลางและทำให้ภายหลังจากอบความร้อนที่เป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์และมี คาร์ไบด์ละเอียดที่กระจุกกระจาย อยู่นอกเหนือจากนี้ธาตุแมงกานีส โครเมียม โมลิบดีนัม จะช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งและช่วยให้คงความแข็งไว้ได้

ดีในขณะที่อบคืนตัว (Tempering) ซิลิกอนจะเพิ่มความแข็งให้กับเฟอไรต์และช่วยให้คงความแข็งไว้ได้ดีในขณะที่อบคืนตัวด้วย แต่ข้อเสียของเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้เป็นผลจากปริมาณซิลิกอน ซึ่งจะเร่งให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนที่ผิวได้ง่าย ทำให้ความต้านทานต่อการสึกหรอและความต้านทานต่อความล้าต่ำลง ดังนั้นในการอบชุบความร้อนจะต้องระวังเรื่องนี้ให้มาก เกรดที่นิยมใช้งาน เช่น S1 S2 S5 และ S7 โดย S1 เป็นเกรดที่นิยมใช้งานมากเพราะจะมีส่วนผสมของทั้งสแตนดีย์ ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอ เพิ่มความเหนียว และเพิ่มความสามารถในการรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงให้ดีกว่าเกรด S อื่น ๆ จึงสามารถใช้งานในที่ที่ต้องทนต่อความร้อนได้ ลักษณะการใช้งาน เช่น สิว ใบมีดตัดแม่พิมพ์ขึ้นรูป เครื่องเจาะหิน เป็นต้น

2.4.1.4 เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot work tool steels) ในงานบางประเภทที่ต้องใช้อาศัยอุณหภูมิสูงในการแปรรูป เช่น งานทุบขึ้นรูปร้อน (Hot forging) งานหล่อแบบฉีด (Die casting) งานอัดขึ้นรูปร้อน (Hot extrusion) งานตัดร้อน (Hot shear blade) งานอัดร้อน (Hot press) สิ่งสำคัญคือเหล็กกล้าเครื่องมือจะต้องรักษาคุณสมบัติความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดี (Red hardness) ต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal shock) ต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูง และมีความเหนียวที่ดี ธาตุผสมที่จะทำให้ได้คุณสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ โครเมียม โมลิบดีนัม และทังสเตน ซึ่งผลรวมของธาตุเหล่านี้จะต้องมีปริมาณอย่างน้อย 5% เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนที่มีการใช้งาน

2.4.1.5 เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง (High speed tool steels) เป็นเหล็กกล้าเครื่องมือที่มีจุดมุ่งหมายหลัก เพื่อใช้เป็นวัสดุในการตัดโลหะด้วยความเร็วสูง เช่น ใบเลื่อย (Saws), ใบตัด (Milling cutters) เป็นต้น คุณสมบัติสำคัญของเหล็กกล้ากลุ่มนี้ คือ ความสามารถในการรักษาความแข็งของคมตัดที่อุณหภูมิสูง กว่าปกติไว้ได้ (ความแข็งของคมตัดยังคงสภาพเดิม แม้จะเกิดความร้อนจนร้อนจัดเป็นสีแดง) ซึ่งเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนจะรักษาความแข็งไว้ไม่ได้ เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีการใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1) เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีทังสเตนเป็นส่วนผสมหลัก ปริมาณทังสเตนที่สูงมาก (12-20%) จะเพิ่มคุณสมบัติความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง ปริมาณคาร์บอนกับธาตุผสมที่สูงมีผลทำให้ความสามารถในการชุบแข็งสูงและมีปริมาณคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง (ไม่สลายตัวที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งจะมีผลทำให้ต้านทานการสึกหรอดีเยี่ยม นอกจากนี้ส่วนผสมของวานาเดียมซึ่งฟอร์มตัวเป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง และกระจายตัวจะช่วยป้องกันการขยายตัวของเกรนได้ในช่วงที่อุณหภูมิสูงและทำให้เกรนมีความละเอียดซึ่งส่งผลถึงความเหนียวของเหล็กด้วย เกรดที่นิยมใช้งาน คือ T1

2) เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีโมลิบดีนัมเป็นส่วนผสมหลัก เป็นกลุ่มที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงที่มีทั้งสแตนเป็นส่วนผสมหลัก เนื่องจากโมลิบดีนัมส่งผลให้คุณสมบัติคล้ายคลึงกับการผสมทั้งสแตนด้วย โดยพบว่าคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น ความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง การทนต่อการเสียดสี หรือความเหนียวจะใกล้เคียงกัน โดยโมลิบดีนัม 1% จะแทนทั้งสแตนประมาณ 1.6-2.0% สำหรับข้อแตกต่างมีเพียงเล็กน้อย คือ กลุ่มที่ผสมโมลิบดีนัมจะต้องระวังการสูญเสียคาร์บอนในการอบชุบ เนื่องจากทั้งสแตนมีราคาสูงกว่าโมลิบดีนัมมาก ปัจจุบันการใช้งานส่วนใหญ่จึงนิยมกลุ่มที่ผสมโมลิบดีนัมเกรดที่นิยมใช้งาน เช่น M2 M4 และ M42 นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเติมธาตุโคบอลต์มากกว่า 10% เพื่อให้ได้คุณสมบัติความสามารถรักษาความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า 2 กลุ่มแรกทำให้ได้เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงประเภทซูเปอร์ (Super high-speed tool steels) แต่สิ่งที่ต้องระวัง คือ การสูญเสียคาร์บอนในระหว่างการอบชุบ และการสั่นและกระแทกแรง ๆ เนื่องจากเป็นเกรดที่เปราะมาก

2.4.1.6 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก (Plastic mold steels) เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 200-175°C ภายใต้อุณหภูมิสูง มีการกัดกร่อนจากสารเคมี และต้องรับแรงเสียดสีกับผงพลาสติกด้วย ดังนั้นคุณสมบัติสำคัญจะต่างไปจากเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มอื่น โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาถึง ได้แก่ ความสามารถในการกลึงไส ความต้านทานแรงอัด ความแข็งที่ผิวสูง ความแข็งแรงที่แกนสูง ความแน่นอนของขนาดภายหลังการชุบแข็ง ความสามารถในการขัดผิวให้เรียบ ความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิว ซึ่งจากคุณสมบัติข้างต้นหากนำเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มทำงานเย็นหรือทำงานร้อนมาใช้ก็อาจจะไม่ได้ผลดีเท่ากับการใช้งานของเหล็กกล้าที่ใช้งานเฉพาะสำหรับกลุ่มนี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถใช้ผลิตแม่พิมพ์งานหล่อแบบฉีดสำหรับโลหะผสมที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำยกตัวอย่าง เช่น สังกะสี และตะกั่ว เป็นต้น

สรุปกลุ่มหลักๆ ของเหล็กกล้าเครื่องมือและสัญลักษณ์ตาม AISI

- W = เหล็กกล้าเครื่องมือที่ชุบแข็งด้วยน้ำ (Water-hardening tool steels)
- S = เหล็กกล้าเครื่องมือทนแรงกระแทก (Shock-resisting tool steels)
- O = เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยน้ำมัน (Oil-hardening cold-work tool steels)
- A = เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นที่ชุบแข็งด้วยลม (Air-hardening, medium-alloy cold-work tool steels)

D	=	เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็นผสม โครเมียมและคาร์บอนสูง (High-carbon, high- chromium cold-work tool steels)
P	=	เหล็กทำแม่พิมพ์ (Mold steels)
H	=	เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อน (Hot-work tool steels, chromium, tungsten, and molybdenum)
T	=	เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงผสม (W Tungsten high-speed tool steels)
M	=	เหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงผสม (Mo Molybdenum high-speed tool steels)

2.4.2 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก (Plastic mold steels)[1]

เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติก (Plastic mold steels) เหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 175-200°C ภายใต้อุณหภูมิสูง มีการกัดกร่อนจากสารเคมี และต้องรับแรงเสียดสีกับผงพลาสติกด้วย ดังนั้นคุณสมบัติสำคัญจะต่างไปจากเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มอื่น โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาถึงได้แก่ ความสามารถในการกลึงไส ความต้านทานแรงอัด ความแข็งที่ผิวสูง ความแข็งแรงที่แกนสูง ความแน่นอนของขนาดภายหลังการชุบแข็ง ความสามารถในการขัดผิวให้เรียบ ความต้านทานการกัดกร่อนที่ผิว ซึ่งจากคุณสมบัติข้างต้น หากนำเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มทำงานเย็นหรือทำงานร้อนมาใช้ก็อาจจะไม่ได้ผลดีเท่ากับการใช้งานเหล็กกล้าที่ใช้งานเฉพาะสำหรับกลุ่มนี้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถผลิตแม่พิมพ์งานหล่อแบบฉีดสำหรับ โลหะผสมที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น สังกะสี และตะกั่วได้เช่นกัน เหล็กกล้าแม่พิมพ์ที่มีการใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

2.4.2.1 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติกกลุ่ม Pre-hardened steels เป็นกลุ่มที่มีคาร์บอนระดับ 0.20-0.30% มีโครเมียม นิกเกิล และ โมลิบดีนัมผสมในระดับปานกลาง เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติการกลึงไสดีมาก โดยในการผลิตแม่พิมพ์จะนำเหล็กมาชุบแข็งก่อนการเจาะหรือตัดให้เป็นช่องว่าง และภายหลังทำเป็นแม่พิมพ์แล้วก็ไม่จำเป็นต้องชุบแข็งอีก สามารถใช้งานได้เลย หรืออาจทำการชุบแข็งผิวด้วยวิธีคาร์บูไรซิ่งเพื่อเพิ่มความแข็งและการต้านทานต่อการสึกหรอ เกรดที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ P20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีธาตุผสมต่ำ ทำให้การใช้งานมีข้อจำกัดสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ P20 ยังเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทำแม่พิมพ์งานฉีดหล่อ (Die casting) โลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ เช่น สังกะสี ตะกั่ว และดีบุก อีกเกรดที่นิยม ได้แก่ P21 ซึ่งผสมนิกเกิล และอะลูมิเนียม ทำให้ในระหว่างการอบชุบความร้อนจะเกิดการตกตะกอนของสารประกอบนิก

เกิด-อะลูมิเนียมที่ช่วยเพิ่มความแข็งให้กับโครงสร้างชิ้นงานได้ ดังนั้นเกรดนี้จึงมีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอและมีความเหนียวมากกว่า P20 ที่ความแข็งเดียวกัน สำหรับการชุบแข็งผิวเหล็กกล้าเกรดนี้จะไม่สามารถทำได้ด้วยวิธีการบูโรซิง แต่จะใช้วิธีไนตรายดิ่งแทน

2.4.2.2 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับแม่พิมพ์กลุ่ม Case hardening steels กลุ่ม เป็นกลุ่มที่มีคาร์บอนต่ำระดับ 0.07-0.10% ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการผลิตแม่พิมพ์ด้วยการกัด โดยการผลิตจะนำเหล็กกล้ามาทำการอบอ่อนก่อนการกัด แล้วจึงนำไปชุบผิวแข็ง ซึ่งอาจทำได้ด้วยกระบวนการคาร์บูไรซิง หรือไนตรายดิ่งเนื่องจากเหล็กกลุ่มนี้ไม่สามารถทำการชุบแข็งได้) สุดท้ายจึงนำไปขัดผิวให้เรียบหรืออาจนำไปเคลือบผิวด้วย โครเมียมแข็งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อน เกรดที่นิยมใช้ได้แก่ P4 และ P6

2.4.2.3 เหล็กกล้าเครื่องมือสำหรับทำแม่พิมพ์พลาสติกที่ทนการกัดกร่อนสูง ในการใช้งานแม่พิมพ์ที่ต้องการคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนสูงสามารถทำได้โดยการชุบผิวด้วยโครเมียม แต่ก็จะมีปัญหาที่เกิดจากการแตกกร่อนของชั้นเคลือบเมื่อนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงมีการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิก เช่น เกรด 420 440C เป็นต้น โดยจะใช้ในสภาวะที่ต้องการคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนสูง เช่น การฉีดพลาสติกในกลุ่มพีวีซี อะซิเตท (ซึ่งอาจทำให้เกิด HCl ในระหว่างกระบวนการฉีดพลาสติก) หรือการงานที่มีความชื้นสูง ต้องการผิวงานที่สวยงาม โดยเหล็กกล้ากลุ่มนี้ จะมีความสามารถในการชุบแข็งสูง ด้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยม ด้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงและมีคุณสมบัติจลจลรูปจากการอบชุบความร้อนได้ดี นอกจากนี้ยังมีการใช้งานสำหรับทำแม่พิมพ์ฉีดแก้วด้วย เช่น แผ่นกระจกบนทีวี และคอมพิวเตอร์ ซึ่งในกระบวนการผลิตแก้วจะต้องการแม่พิมพ์ที่ด้านทานต่อการสึกหรอสูง ด้านทานต่อการเกิดสเกลที่อุณหภูมิสูง ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงและความสามารถในการขัดผิวให้เรียบได้

2.4.3 เหล็กที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก [1]

2.4.3.1 P20 และ P21 นิยมใช้สำหรับสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกกันมานานเป็นเหล็กเกรด Low Carbon Mold Steel ซึ่งมีคุณลักษณะที่เป็นการผสมผสานของความแข็งแรงความสามารถในการกลึง กัด และความเหนียวแต่คุณสมบัติของมันไม่คงที่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน และเป็นเหล็กแม่พิมพ์ที่ยุ่ยยากในการเชื่อมโลหะเพื่อแก้ไขข้อบกพร่อง

2.4.3.2 NAK55 เป็นเหล็ก Pre-Hardened Mold Steels ที่มีคุณสมบัติ (Machinability) สามารถทำการเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า (Weld ability) ได้ดี เหล็ก NAK ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนเหล็กเกรด P20 สำหรับสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก เหล็ก NAK 55 เป็นเหล็กแม่พิมพ์ที่มีคุณสมบัติใน

การขัดเงา (Mirror Finish) ได้ เช่นการสร้างเลนส์แว่นตาและสามารถทำการเชื่อมผิวโลหะที่เกิดความผิดปกติจากการแปรรูปได้ดีกว่าเหล็กเกรด P20

2.4.3.3 NAK 80 ใช้สำหรับผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่มีความทนทานสูง มีราคาต้นทุนต่อหน่วยสูง มีคุณสมบัติที่สามารถขัดผิวให้เงาแบบกระจกได้ดี เมื่อได้รับความร้อนสูงเกรนของโลหะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มาก

2.4.3.4 NAK 55 และ NAK 80 ถูกนำมาใช้สร้างแม่พิมพ์ในประเทศญี่ปุ่นมากกว่า 90% ที่ต้องผ่านวิธีการอบผิวแข็ง และเป็นวัสดุแม่พิมพ์ที่กลายเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับนิยมนำสำหรับผู้ผลิตแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในประเทศญี่ปุ่น และทั่วโลก

คุณลักษณะทั่วไป

จัดเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มงานแม่พิมพ์พลาสติก จำหน่ายในสภาพผ่านการชุบแข็งและอบคืนตัวมีความแข็งอยู่ในช่วง 280-325 HB (29-34 HRC) จึงมีความแข็งแรงสูง และไม่มีปัญหาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน ภายหลังจากการชุบแข็งเหมาะสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์พลาสติกที่มีความหนาไม่เกิน 400 mm มีความสามารถในการขัดเงาดีมาก เหมาะกับงานแม่พิมพ์พลาสติกที่ต้องการให้มีผิวมันเงา หรือต้องการทำลวดลายที่ผิว

การใช้งาน

NAK80 จะมีความแข็งแรงประมาณ $1,000 \text{ N/mm}^2$ จึงเหมาะที่จะใช้ในงานแม่พิมพ์พลาสติกและชิ้นส่วนเครื่องมือในงานขึ้นรูปโลหะ ตัวอย่างของการใช้งาน ได้แก่ ทำแม่พิมพ์ฉีด หรือเป่าพลาสติกโดยเฉพาะ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกประเภทที่ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนแม่พิมพ์ ทำกรอบแม่พิมพ์ (Mold frames) สำหรับแม่พิมพ์พลาสติก และแม่พิมพ์ไดคาสต์ปริมาณการผลิตน้อย ปลอกสวม (Sleeves) และเบ้าสวมดายส์ (Die holder) สำหรับงานอัดขึ้นรูปโลหะ (Extrusion)

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 [10]

C	Si	Mn	Cr	Mo
0.4	0.4	1.5	1.9	0.2

2.5 ความเรียบผิวงาน

ความเรียบผิวของชิ้นงานมีความหยาบละเอียดแตกต่างกัน โดยเกิดจากกรรมวิธีการผลิตและความต้องการจะทำให้พื้นผิวมีความเรียบขนาดใด นอกจากนั้นยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ชนิดของวัสดุ ความคมของเครื่องมือตัด การหล่อเย็นและสภาพของเครื่องจักร ความหยาบละเอียดของผิว มีผล

ต่อการนำไปใช้งาน ถ้าสภาพผิวไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานอาจทำให้อายุการใช้งานสั้นลง หรือผิวงานมีความเรียบละเอียดขัดมันเกินกว่าการนำไปใช้งาน ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต ดังนั้นจำเป็นต้องระบุความเรียบผิว เพื่อกำหนดค่าความเรียบผิวที่เหมาะสมต่อการพิจารณาเลือกไปใช้งาน

2.5.1 ความเรียบของผิวสำเร็จในการตัดวัสดุ [11] การตัดวัสดุเมื่อมองในแง่ของความประณีต ความละเอียดแม่นยำหรือความเรียบของพื้นผิวสำเร็จนั้นคือพื้นผิวที่ได้จากกรรมวิธีการผลิต จำแนกความเรียบของพื้นผิวสำเร็จ แบ่งเป็น 4 ประเภท

1) การตัดหยาบ (Rough Cutting) หมายถึงการตัดที่ต้องการให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ไม่เน้นเรื่องการทำให้ค่าความขรุขระต่ำ ไม่เน้นความแม่นยำหรือความละเอียดของพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน

2) การตัดปานกลาง (Medium Cutting) หรือการตัดทั่วไปเป็นการตัดที่ประนีประนอมระหว่างการตัดหยาบและตัดละเอียด คือต้องการให้งานเสร็จเร็ว โดยที่ต้องการให้พื้นผิวขรุขระน้อยด้วย ซึ่งทำได้ในบางกรณี โดยเลือกค่าความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัดที่เหมาะสม

3) การตัดละเอียด (Fin Cutting) หมายถึงการตัดที่ต้องการให้ค่าความขรุขระต่ำ เน้นความแม่นยำหรือความละเอียดของผิวงานสำเร็จ ไม่เน้นให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเสร็จรวดเร็วก็จะเป็นการดี

4) การตัดละเอียดยิ่ง (Ultra-Fin Cutting) ในการตัดชิ้นงานบางอย่าง เช่น การกลึงเลนส์ การกลึงอลูมิเนียมให้พื้นผิวสำเร็จเป็นมันวาวคล้ายกระจก ค่าความขรุขระจะน้อยมากเป็นพิเศษ

2.5.2 ส่วนประกอบของผิว

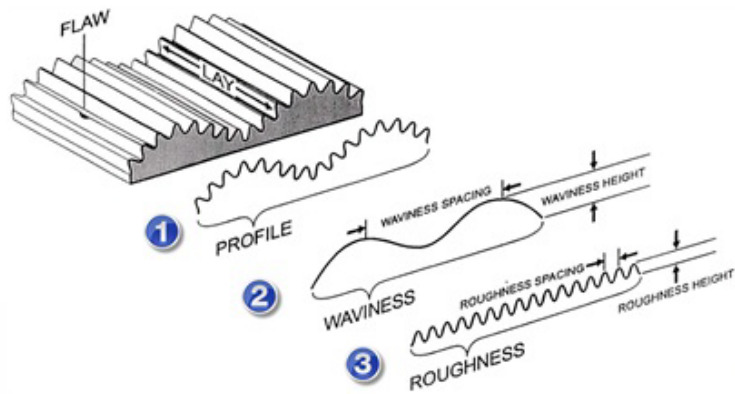
1) Profile หมายถึง เส้นแสดงลักษณะของผิวงานตลอดหน้าตัดที่นำมาพิจารณา

2) Waviness หมายถึง ความผิดปกติของผิวงาน ที่มีระยะในการพิจารณากว้างกว่าช่วงความหยาบผิว ที่เกิดจากการโค้งตัวของชิ้นงาน การหลวมคลอนของเครื่องจักรและการสั่นสะเทือนจากการขึ้นรูป

3) Roughness หมายถึง ความผิวปกติของผิวงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต

4) Surface หมายถึง ขอบเขตหรือบริเวณที่แยกออกจากส่วนเนื้อหรือวัสดุงาน 5) Flaw หมายถึง ความผิดปกติของผิวงาน ที่เกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งของผิวงาน

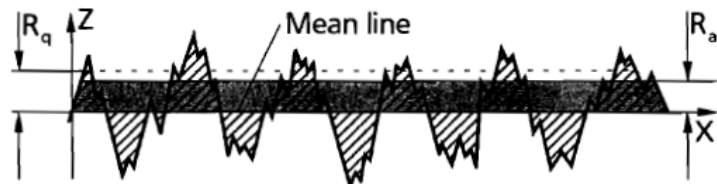
6) Lay หมายถึง แนวทิศทางของรอยสัน ส่วนยอดความเรียบผิวที่ทำการตรวจสอบหรือรอยทางเดินของเครื่องมือตัด



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะส่วนประกอบของผิว

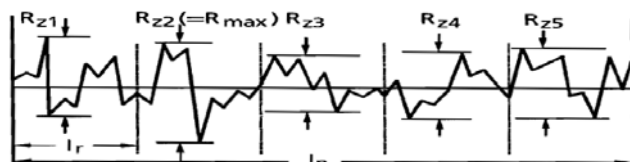
2.5.3 การวัดค่าความเรียบผิวงาน [12] การวัดค่าความเรียบผิว ประกอบด้วยค่า R_a , R_t , R_z หน่วยวัดเป็นไมโครเมตร

1) ค่าความเรียบ R_a หมายถึงค่าที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ของพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้น กึ่งกลาง (M-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเส้นใต้กึ่งกลาง หารด้วยความยาวเฉลี่ย (L_m) โดยที่ค่า ของ R_a มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร



รูปที่ 2.9 แสดงการวัดค่า R_a

2) ค่าความเรียบ R_z หมายถึง ค่าที่หาได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่ากัน 5 ช่วง แล้วนำค่าที่วัดได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ R_z มีหน่วยเป็นไมโครเมตร

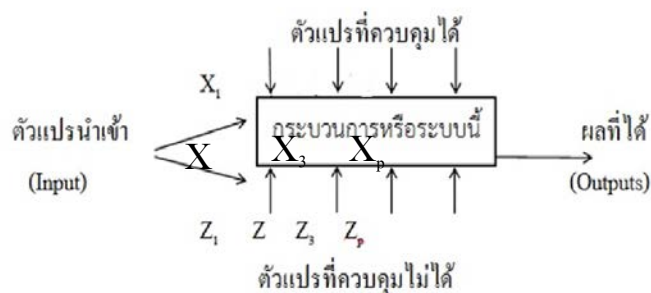


รูปที่ 2.10 แสดงการวัดค่า R_z

2.6 การออกแบบการทดลอง [13]

การออกแบบ (Design) หมายถึง การเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการศึกษาระบบที่สนใจ การทดลอง (Experiments) หมายถึง สิ่งที่ทำขึ้นเพื่อการค้นหาองค์ความรู้หรือข้อมูลส่วนที่ยังขาดไปเกี่ยวกับกระบวนการหรือระบบที่สนใจโดยผู้ทำการศึกษาในสาขานั้น

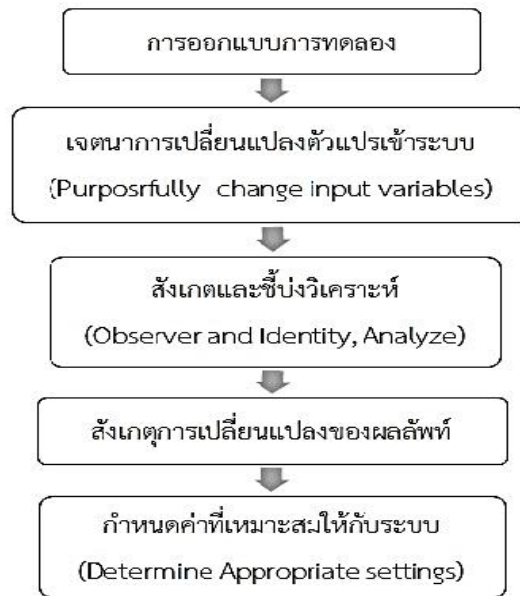
การออกแบบแผนการทดลอง (Experiment Design or Design of Experiments) คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่องโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจจะศึกษาจะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้นโดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า “ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมได้” (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้” (Design variable's or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้เรียกว่า “ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่รบกวนระบบ” (Uncontrollable or Noise Variables Factors) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ [12]

การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบซึ่งโดยหลักแล้วตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวน (Noise Variables) มักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอกหรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากต่อการควบคุม เนื่องจากในการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูงเพราะเมื่อชำรุดอาจส่งถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม ซึ่งในบางระบบอาจพิจารณาให้เป็น “ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้” อุณหภูมิที่ใช้

ในการผลิต เป็นต้น ในทุกกระบวนการนั้นสามารถที่จะระบุและบันทึกไว้เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ต่อไปได้โดยสรุปในการออกแบบการทดลองมีหลักการสำคัญดังสรุปได้ในรูปที่ 2.12 ดังนี้



รูปที่ 2.12 หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง [13]

ในภาพรวมของการออกแบบการทดลองจึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในส่วนของ การออกแบบกระบวนการในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์หรือค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการซึ่งในทางวิศวกรรมจะเรียกขั้นตอนนี้ว่า “Parameter Design” ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบกระบวนการ (Design Process) ในระยะกลาง

2.6.1 แผนการออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi) [15] ปัจจุบันทฤษฎีหรือแนวทางปฏิบัติของ “ทาคุชิ” ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นลักษณะงานหรือลักษณะปัญหาเชิงเดี่ยวหรือไม่ซับซ้อน จนถึงการนำไปประยุกต์ใช้กับงานหรือลักษณะปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อนและรวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานด้านบริหารจัดการ รวมถึงหลักเศรษฐศาสตร์ และการบริหารธุรกิจ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะค้นหาวิธีการหรือคำตอบที่ดีที่สุด แต่ใช้ขณะเดียวกันก็ไม่ลืมที่จะพิจารณาวิธีการหรือทางออกอื่น ๆ หรือทางเลือกอื่นซึ่งมีความได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทฤษฎีอื่น ๆ ในการแก้ปัญหาหรือแนวทางของ “ทาคุชิ” นั้น สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การระดมความคิด คือ การที่บุคลากรในหน่วยงานซึ่งมีความรับผิดชอบในแต่ละด้านและรวมไปถึงผู้ดูแลและรับผิดชอบในด้านการตลาดมานั่งปรึกษา และออกความคิดเห็นเพื่อที่จะค้นหาลักษณะทางด้านคุณรูปที่สำคัญของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อลูกค้า รวมถึงการช่วยกันออกแบบปัจจัยหรือตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ

ขั้นตอนที่ 2 ทำการออกแบบการทดลอง และทำการทดลองจริง

ขั้นตอนที่ 3 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองรวมถึงการกำหนดค่าที่ดีที่สุดของตัวแปร

ขั้นตอนที่ 4 ทำการผลิจจริงหรือปฏิบัติจริงเพื่อพิสูจน์ว่าตัวแปรที่เรากำหนดค่าที่ดีที่สุดนั้นสามารถนำมาซึ่งการแก้ไขปัญหา ที่แท้จริงได้หรือไม่

ตัวอย่างการออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ 5 ตัวแปร สำหรับตัวแปรหรือปัจจัยแต่ละตัวสามารถกำหนดค่าระดับความแตกต่างได้ถึง 3 ระดับ เมื่อนำเอาข้อกำหนดข้างต้นมาพิจารณาแล้ว เราสามารถทำการทดลองได้ทั้งหมด $3^5 = 243$ การทดลอง โดยที่ไม่ซ้ำกัน ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ เราเรียกว่าการทดลองแบบสมบรูณ์ แต่ในขณะเดียวกันหากใช้วิธีการทดลองของทากูชิโดยใช้หลักการ OA's ในการออกแบบการทดลองซึ่งผลที่ได้คือ $L_{27}(3^5)$ ซึ่งหมายถึงจำนวนครั้งในการทดลองจะมีเพียง 27 การทดลองเท่านั้น โดยตารางที่ 2.2 จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบรูณ์ กับการออกแบบการทดลองตามแนวทฤษฎีทากูชิ และตารางที่ 2.3 ถึง 2.4 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างตารางการออกแบบการทดลองแบบ L_4 , L_9 และ L_{27}

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบจำนวนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบสมบรูณ์ และการออกแบบการทดลองตามแนวทางทากูชิ

OA	Factors	Level	Full Factorial
L_4	3	2	8
L_8	7	2	128
L_9	4	3	81
L_{12}	11	2	2,048
L_{17}	13	3	1,594,323
L_{64}	21	4	4.41×10^{12}
L_{81}	40	4	1.2×10^{19}

ตารางที่ 2.3 การออกแบบการทดลองชนิด $L_4(2^3)$

Run	Factor		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

หมายเหตุ $L_4(2^3)$ หมายถึงการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ

ตารางที่ 2.4 การออกแบบการทดลองชนิด $L_9(3^4)$

Run	Factor			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

หมายเหตุ $L_9(3^4)$ การออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 4 ปัจจัยและแต่ละปัจจัยกำหนดให้มี 3 ระดับ

การทดลองจริงเป็นการทำให้บรรลุซึ่งผลสำเร็จและการปฏิบัติการทดลองนี้เป็นการหาค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์ โดยใช้กระบวนการ ผลการทดลองดิบจะถูกนำไปใส่ในตาราง โดยที่เครื่องชี้วัดการปฏิบัติสำหรับการทดลองทั้งหมด จะทำการแปลงให้อยู่ในรูปของ อัตราส่วนของ Signal to Noise (S/N Ratio) โดยที่คุณลักษณะของ S/N Ratio สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ Smaller – the – better type problem , Nominal – the – best – type problem และ Larger – the – better type problem

1) Smaller – the – better type problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ เช่น ต้องการให้เกิดข้อบกพร่องน้อยที่สุดในการผลิตคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์ ต้องการให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุดจากโรงงาน และต้องการให้เกิดการรั่วของกระแสไฟน้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งเป็นความต้องการในปริภูมิพหุนัยเช่นกัน

2) Nominal – the – best – type problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้ หรือเป็นค่าที่จำกัดไว้ เช่น ความหนาของโพลีซิลิคอนที่ต้องการมีค่าตามที่ได้กำหนดไว้ในลักษณะที่มีคุณภาพคือ สำหรับปัญหาแบบนี้เมื่อค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ความแปรปรวนก็จะเป็นศูนย์ด้วย ค่ามากที่สุดของ Nominal – the – best S/N Ratio จะใช้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของ y_i เมื่อ i คือจำนวนครั้งของการทดลองที่อยู่ในช่วงจาก 1 ถึง n ครั้งสำหรับการนำมาใช้กับกระบวนการ Wire – EDM เช่น ตั้งค่ากระบวนการอย่างไรให้มีค่า Ra ตรงกับที่กำหนดไว้

3) Larger – the – better type problem คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่าให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น ต้องการให้ความแข็งแรงของสายไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดมีค่าให้มากที่สุด หรืออีกตัวอย่างหนึ่งคือ ต้องการให้น้ำมันของรถบรรทุกของสามารถขับเคลื่อนรถบรรทุกได้จำนวนไมล์มากที่สุด เป็นต้น สำหรับการนำมาใช้ในกระบวนการ Wire – EDM เช่น ต้องการให้มีอัตราการตัดมาก

แผนการออกแบบการทดลองอื่น ๆ มีดังนี้

- 1) แผนการออกแบบการทดลองลาตินสแควร์ (Latin Square Design)
- 2) แผนการออกแบบการทดลองเนสต์เต็ด (Nested Design)
- 3) แผนการออกแบบการทดลองสปีทพล็อต (Split – Plot - Design)
- 4) แผนการออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

2.6.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความผันแปรที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อย ๆ ตามแหล่งที่คาดว่าการทำให้เกิดความผันแปร ความผันแปรที่เกิดในข้อมูลเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความผันแปรทั้งหมด} = \text{ความผันแปรจากปัจจัย} + \text{ความผันแปรโดยธรรมชาติ} \quad (2.2)$$

สมการที่ 2.2 ได้ข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความผันแปร โดยธรรมชาติ หรือที่เรียกกันว่าความผิดพลาดแบบสุ่มของข้อมูลเพียงอย่างเดียวแต่น่าจะมาจาก

ปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลาย ๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปร ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูล จึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยของธรรมชาติของข้อมูลปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความผันแปรของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่ได้มีเพียงค่าเดียวแต่จะมีหลายค่าซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริง ๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่าง ๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้น ๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญ หรือไม่เมื่อเทียบกับความผันแปร โดยธรรมชาติของตัวแปรตามและเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองมักจะต้องการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจงรูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปเฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปเฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดลอง แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกสุ่ม รูปแบบของการทดลองจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดลองจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จากความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรเนื่องจากปัจจัย + ความผันแปรโดยธรรมชาติของข้อมูลหรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_r = SS_{tr} + SSE \quad (2.3)$$

โดยที่ SS_r คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด
 SS_{tr} คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย
 SS_E คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความผันแปรของข้อมูลในการทดลองนั้นจะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรปรวน (Variance) ที่ดีที่สุด คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square : Ms) โดยที่ค่า Ms สามารถคำนวณได้จาก

$$Ms = SS/DF \quad (2.4)$$

เมื่อ SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)
 DF คือ ชั้นของความอิสระ

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าความผันแปรคือ

$$F = MSTY/MEE \quad (2.5)$$

เมื่อ MS_{TY} คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย
 ME_E คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า F_{α, v_1, v_2}

ถ้า $F \geq F_{\alpha, v_1, v_2}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha, v_1, v_2}$ ยอมรับ H_0

เมื่อ α คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

v_1 คือ ชั้นของความอิสระปัจจัย

v_2 คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

2.6.3 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง การออกแบบการทดลอง เป็นเครื่องมือที่สำคัญในงานด้านวิศวกรรมสำหรับการเพิ่มสมรรถนะของวิธีการผลิตของกระบวนการ ซึ่งมักจะทำให้เกิดการพัฒนาในกระบวนการใหม่ การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองพัฒนากระบวนการสามารถพิจารณาในรูปแบบต่อไปนี้

- 1) การเพิ่มผลผลิตของกระบวนการ
- 2) การลดความผันแปรของกระบวนการและกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมาย

ที่ต้องการ

- 3) การลดเวลาที่ต้องใช้ในการพัฒนา
- 3) การลดต้นทุนโดยรวมของกระบวนการ

วิธีการออกแบบการทดลองมีบทบาทอย่างมากในการออกแบบทางวิศวกรรมทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมา การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการออกแบบวิศวกรรมจะรวมถึงสิ่งดังต่อไปนี้

- 1) การประเมินและเปรียบเทียบของพื้นฐานการออกแบบ
- 2) การประเมินทางเลือกของวัสดุ

3) เลือกพารามิเตอร์ของการออกแบบที่เมื่อพารามิเตอร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงจะไม่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์

การใช้การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ สามารถส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายกว่า มีความน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า และระยะเวลาในการออกแบบและผลิตภัณฑ์ใหม่สั้นกว่า

การทดลองเพื่อยืนยันผล จากการกำหนดเงื่อนไขการทดลองที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว ความกว้างของรอยตัด และขนาดของชิ้นงาน เมื่อได้เงื่อนไขที่ดีที่สุด ควรมีการทดลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Predict Taguchi Results ในการคำนวณผลเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่วิเคราะห์ได้

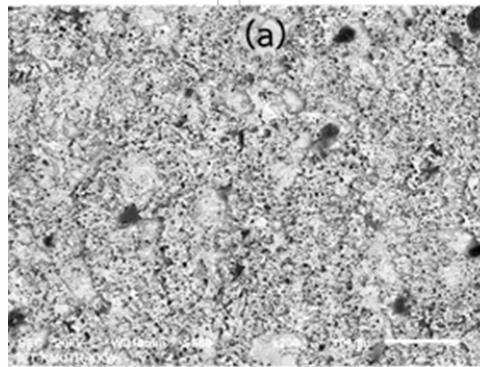
2.7 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา [16]

2.7.1 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ Electron เป็นแหล่งกำเนิดแสงเป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก เนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษาและกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตรและให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

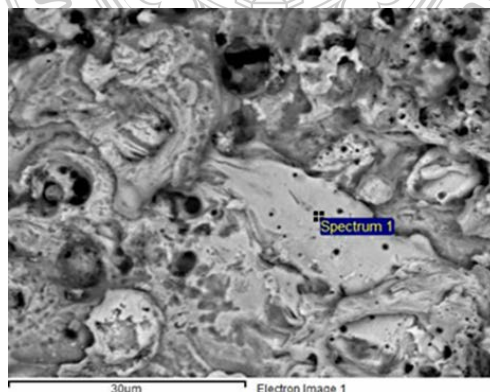
หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่ม

อิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้ แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 200 เท่า ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 200 เท่า

2.11.2 การตรวจสอบส่วนผสมของธาตุที่ตกค้างบนพื้นผิวชิ้นงานภายหลังการอีดีเอ็มด้วยกล้องเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS) และกราฟแสดงปริมาณธาตุเชิงคุณภาพ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายจากกล้องเอกซเรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)

ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ห้อยประกอบและการมีอยู่ของธาตุนบนพื้นผิวงาน โดยการใช้งานมักจะใช้ร่วมกับกระบวนการ SEM ซึ่งจะให้การวิเคราะห์และการตรวจสอบสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไว้ ดังต่อไปนี้

ขรศักดิ์ โหมสิตและคณะ (2012) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ด้วยวิธี Wire-EDM ด้วยปัจจัย 5 ปัจจัย ละ 3 ระดับ ได้แก่ กระแสดีสชาร์จ (4, 7, 10 A) เวลาหยุดดีสชาร์จ (8, 12, 16 μ s) ความเร็วของเส้นลวด (8, 10 12 m/min) ความตึงลวด (9, 10, 11 N) และระยะห่างลวด (150, 160, 170 μ m) โดยการออกแบบการทดลองแบบ Orthogonal array (OA) L27 ตามวิธีของทากูชิ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเงื่อนไขที่จะทำให้งานมีความกว้างของรอยตัดน้อยที่สุด ความเรียบผิวดีที่สุด และอัตราการตัดชิ้นงานมากที่สุด โดยใช้การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM) และการวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเรียบผิวที่ดีที่สุดคือ กระแสดีสชาร์จ สำหรับเวลาหยุดดีสชาร์จ ความเร็วลวด และความตึงเส้นลวด มีผลปานกลาง ส่วนระยะห่างลวดไม่มีผล ปัจจัยที่มีผลต่อความกว้างรอยตัดของชิ้นงานมากที่สุดคือ กระแสดีสชาร์จ และระยะห่างลวด สำหรับความเร็วลวด และความตึงลวด มีผลปานกลาง ส่วนเวลาหยุดดีสชาร์จ ไม่มีผล ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตัดชิ้นงานมากที่สุดคือ กระแสดีสชาร์จ ส่วนเวลาหยุดดีสชาร์จ ความเร็วลวด ความตึงลวด ส่วนระยะห่างลวด ไม่มีผล [17]

Pardeep Kumar¹ และ Jatinder Kumar² (2014) ได้ศึกษาการตัดวัสดุผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีส่วนผสมตัวประสาน โคบอลต์ 24% และทั้งสแตน 76% ด้วยวิธี Wire-EDM ในขั้นตอนการตัดหยาบด้วยปัจจัยป้อนเข้า 4 ปัจจัย ละ 2 ระดับ คือ ชีพจรเวลาเปิด (Ton), ชีพจรเวลาปิด (Toff), แรงดันไฟฟ้าเซอร์โว (VS), และกระแสไฟฟ้า (IP) โดยออกแบบการทดลองแบบ Orthogonal array (OA) L30 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อความเร็วตัดและการคลาดเคลื่อนขนาด และได้วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามวิธีมาตรฐาน Response surface metrology (RSM) ที่เรียกว่า Central composite design (CCD) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความเร็วตัดสูงสุดที่เหมาะสม สำหรับตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ชนิดนี้ และเขาพบว่าสมการกำลังสองของ (VS) มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย (Two factor interactive, 2FI) จากเส้นโค้งที่เปลี่ยนแปลงแสดงให้เห็นชัดเจนว่าความเร็วการตัดที่เพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มของเวลาเปิด และกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ ในขณะที่ไม่มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนขนาดความคลาดเคลื่อนขนาดนั้นลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้า และเวลาปิด [18]

Sanjiv Kumar¹ และ Jatinder Kumar² (2014) ได้ศึกษาการตัดวัสดุผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มี ส่วนผสมทั้งสแตน (WC) 94% และตัวประสานโคบอลต์ (Co) 6% ด้วยวิธี Wire-EDM ด้วยปัจจัย ป้อนเข้า 4 ปัจจัยๆ ละ 2 ระดับ คือ เวลาเปิด (Ton), เวลาปิด (Toff), แรงดันไฟฟ้าเซอร์โว (VS), และ กระแสไฟฟ้า (IP) โดยการออกแบบการทดลองแบบ Orthogonal array (OA) L30 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อ ความเร็วตัด และการคลาดเคลื่อนขนาด และได้วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ตามวิธี มาตรฐาน Response surface metrology (RSM) ที่เรียกว่า Central Composite Design (CCD) ซึ่งเป็น ฟังก์ชันของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าตอบสนองในกระบวนการ และแสดงออกมาในลักษณะของ กราฟฟิก โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความเร็วตัดสูงสุด ที่เหมาะสมสำหรับตัดทั้งสแตนคาร์ไบด์ ชนิดนี้ และเขาพบว่าสมการกำลังสองของ (VS) มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย (Two factor interactive, 2FI) ความเร็วการตัดที่เพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มของเวลาเปิด และกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ ในขณะที่ไม่มีผลกระทบกับความคลาดเคลื่อนขนาด ค่าแรงดันไฟฟ้าเซอร์โว และเวลาปิดที่น้อยที่สุด มีผลทำให้ค่าความเร็วตัดที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ซึ่งมีผลที่ดีในทางตรงกันข้ามกับค่าความคลาดเคลื่อน ขนาด ในการออกแบบการทดลองค่าความเร็วตัดที่คาดการณ์ไว้สูงสุด อยู่ที่ 0.8695 ในขณะที่ค่ายืนยัน ผลออกมาเป็น 0.819174 และสำหรับค่าความคลาดเคลื่อนขนาดที่คาดการณ์ไว้ที่ 0.028 ในขณะที่ค่า ยืนยันผลเป็น 0.0466 [19]

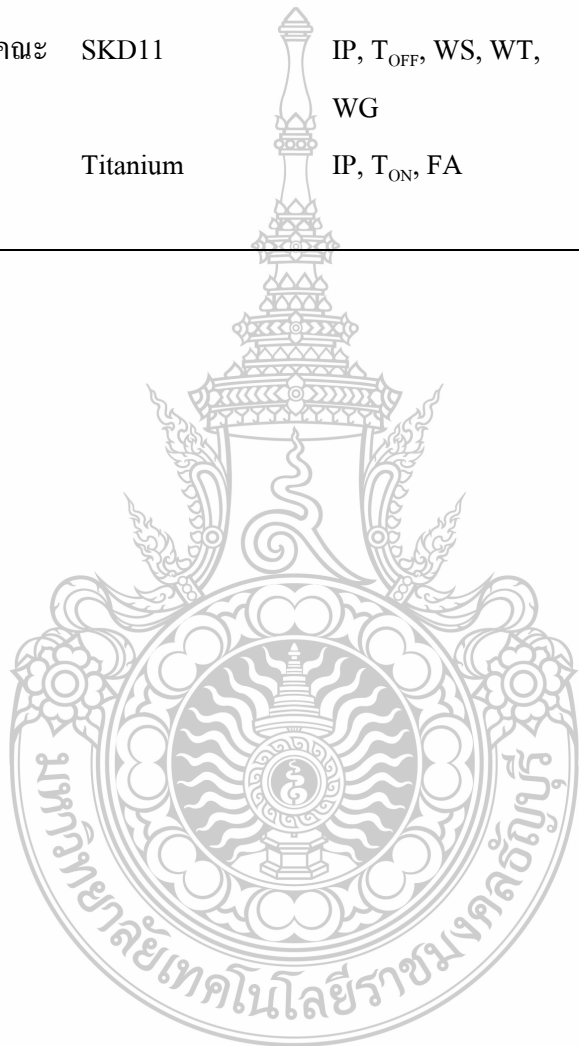
ในงานวิจัยของนิวัฒน์ มูเก็ม ได้ทำการศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมของการตัดไทเทเนียมด้วย วิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวดโดยใช้วิธีของทาภูเขาและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์จาก ตัวแปร คือระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์กและอัตราป้อนลวดซึ่งผล การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้พิจารณาตัวแปรที่เหมาะสมกับกรณี ปัญหาสองผลตอบแทนได้แก่ ค่าความหยาบผิวและระยะการตัดเกินได้ดี โดยผลมีค่าเฉลี่ยเกรด ความสัมพันธ์แบบเกรย์เท่ากับ 0.6418, 0.5904 และ 0.6751 ตามลำดับ สำหรับตัวแปรเงื่อนไขการตัดที่ เหมาะสมได้จากการกำหนดระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ 12 μ s กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการ สปาร์กที่ 15 A และอัตราการป้อนลวดที่ 2 mm/sec ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์จึง เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเลือกตัวแปรที่เหมาะสมในกรณีปัญหาแบบ หลายผลตอบแทนได้ โดยมีจำนวนการทดลองน้อยกว่าวิธีที่จำเป็นต้องมีการทดลองซ้ำเช่น วิธีการ พื้นผิวผลตอบแทน [20]

2.9 บทสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชรรัชชัย โนมสิตและคณะ (2012) ได้กล่าวไว้ว่าเพื่อหาเงื่อนไขที่จะทำให้ชิ้นงานมีความกว้างของรอยตัดน้อยที่สุด ความเรียบผิวดีที่สุด และอัตราการตัดชิ้นงานมากที่สุด โดยใช้การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM) และการวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวที่ดีที่สุดคือ กระแสไฟฟฟ้า สำหรับเวลาหยุดดิสชาร์จ ความเร็ว ลวด และความตึงเส้นลวด มีผลปานกลาง ส่วนระยะห่างลวดไม่มีผล ปัจจัยที่มีผลต่อความกว้างรอยตัดของชิ้นงานมากที่สุดคือ กระแสไฟฟฟ้า และระยะห่างลวด สำหรับความเร็วลวด และความตึงลวด มีผลปานกลาง ส่วนเวลาหยุดดิสชาร์จไม่มีผล ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการตัดชิ้นงานมากที่สุดคือ กระแสไฟฟฟ้า ส่วนเวลาหยุดดิสชาร์จ ความเร็วลวด ความตึงลวด ส่วนระยะห่างลวด ไม่มีผล ซึ่ง Pardeep Kumar และ Jatinder Kujmar เสนอว่าสมการกำลังสองของ VG มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย (Two factor interactive, 2FI) จากเส้นโค้งที่เปลี่ยนแปลงแสดงให้เห็นชัดเจนว่าความเร็วการตัดที่เพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มของเวลาเปิด และกระแสไฟฟฟ้าดิสชาร์จ ในขณะที่ไม่มีผลกระทบกับความคลาดเคลื่อนขนาด ความคลาดเคลื่อนขนาดนั้นลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้า และเวลาปิด และ Sanjiv Kumar ได้กล่าวเช่นเดียวกันคือ ความเร็วการตัดที่เพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มของเวลาเปิด และกระแสไฟฟฟ้าดิสชาร์จ ในขณะที่ไม่มีผลกระทบกับความคลาดเคลื่อนขนาด ค่าแรงดันไฟฟ้าเซอร์โว และเวลาปิดที่น้อยที่สุด มีผลทำให้ค่าความเร็วตัดที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ซึ่งมีผลที่ดีในทางตรงกันข้ามกับค่าความคลาดเคลื่อน ในงานวิจัยของนิวัฒน์ มูเก็มพบว่าระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟฟ้า กระแสไฟฟฟ้า สูงสุดในการสปาร์คและอัตราป้อนลวดซึ่งผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้พิจารณาตัวแปรที่เหมาะสมกับกรณีปัญหาสองผลตอบสนอง ได้แก่ ค่าความหยาบผิวและระยะเวลาการตัดเกินได้ดี และ Niwat และคณะ ได้ทำการศึกษาหาระยะการตัดเกิน (Over Cut) ด้วยวิธีของ ทากูชิ ผ่านกรรมวิธีการตัดด้วย Wire – EDM สรุปได้ว่าการใช้วิธีของทากูชิมาเป็นตัวช่วยในการออกแบบการทดลองทำให้ผลการทดลองนั้นช่วยให้การทดลองสะดวกมากขึ้นเนื่องจากช่วยลดขั้นตอนการทดลองออกไปได้มาก แต่สามารถทำการทดลองได้อย่างครอบคลุม

ตารางที่ 2.5 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	ชนิดวัสดุ	ตัวแปรอิสระ	ผลตอบสนอง
Sanjiv Kumar และคณะ	WC-6%Co	IP, T _{ON} , T _{OFF} , VG	Cutting speed and Dimension deviation
Pardeep Kumar และคณะ	WC-24%Co	IP, T _{ON} , T _{OFF} , VG	Cutting speed and Dimension deviation
ขรรค์ชัย โมลีต และคณะ	SKD11	IP, T _{OFF} , WS, WT, WG	MRR, Ra and Kerf
นิวัฒน์ มูเก็ม	Titanium	IP, T _{ON} , FA	Surface integrity and Overcut



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้จะวิจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด เพื่อหาค่าตัวแปรในการตัดชิ้นงานที่ทำให้ค่าความหยาบผิว น้อยที่สุด ความกว้างของชิ้นงานน้อยที่สุด และให้ขนาดของชิ้นงานมีความใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากที่สุด จากค่าตัวแปรที่กำหนด จะมีกรรมวิธีการทดลองวัสดุและขั้นตอนต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งเป็นหัวข้อหลัก ๆ ได้ดังนี้

- 1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
- 2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
- 3 หลักการออกแบบการทดลอง
- 4 ขั้นตอนการทดลองการเก็บบันทึกข้อมูล
- 5 เครื่องมือทางสถิติในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ลวดสำหรับตัดงาน ในกรรมวิธีการตัดงานของเครื่อง Wire - EDM ขนาดลวดที่นิยมใช้ในการตัดงานของเครื่อง Wire - EDM จะมีขนาดตั้งแต่ 0.1 มม, 0.2 มม, 0.25 มม, 0.3 มม, 0.5 มม และ 1 มม เป็นต้น ในส่วนการทดลองที่ใช้จะเป็นลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มม



รูปที่ 3.1 ลวดทองเหลืองขนาด 0.25 มม.๒

3.1.2 เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire EDM) เป็นเครื่องยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA20S Advance มีระบบไฮดรอลิกในการขับเคลื่อน แกน XYZ และระบบควบคุมโดยใช้ระบบการสัมผัสบนหน้าจอแผงควบคุม ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติ ขนาดสูงสุดของชิ้นงานที่สามารถนำมาใช้งานได้ 1050 x 800 x 295 (มม.) สามารถจับยึดงานได้น้ำหนักสูงสุด 1500 Kg. ระยะการเคลื่อนที่ของ แกน XYZ 500 x 350 x 300 น้ำหนักรวมของเครื่อง 3500 Kg.



รูปที่ 3.2 เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire EDM) ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA20S Advance

3.1.3 เครื่องวัดความหยาบผิวชิ้นงาน เป็นเครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการสปาร์กด้วยเครื่อง Wire – EDM และเป็นเครื่องที่สามารถวัดค่าความหยาบผิวได้ในระดับ μm เป็นเครื่องยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ310



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดความหยาบผิวของชิ้นงานยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ310

3.1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) JSM-6510 Iv

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 เป็นเหล็กทำแม่พิมพ์พลาสติกชั้นสูง มีความสามารถในการกลึงดีเยี่ยม แม้จะมีความแข็งสูงถึง 40 HRC มีอายุการใช้งานยาวนานเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความงามเป็นเลิศ มีความใสมาก เงาเหมือนกระจก โดยมีส่วนผสมทางเคมี แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80

เหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80					
Al	Si	Mn	Fe	Ni	Cu
2.80	1.41	1.19	83.55	9.41	1.63

3.3 หลักการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองที่ใช้เครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire – EDM) เป็นเครื่องในการทดสอบนั้น จะต้องเป็นไปตามขั้นตอนต่าง ๆ ที่ได้วางแผนไว้แล้ว จากการกำหนดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองจะนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบความสามารถในการตัดด้วยตัวแปรต่างชนิดกัน เนื่องจากมีปัจจัยที่ใช้ในการศึกษามากกว่า 1 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีอยู่ด้วยกันหลายระดับที่ต้องการทดลอง โดยในการทดลองนี้มีปัจจัยภายในที่ใช้ใน

การทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์ก (IP) แรงดันไฟฟ้า (VG) และอัตราป้อน (FA) โดยแต่ละปัจจัยจะมี 3 ระดับ

3.3.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา ปัญหาเป็นแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง ในปริญญาโทนี้ต้องการการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วยวิธีอีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) แรงดันไฟฟ้า (VG) และอัตราป้อน (FA)

ปัจจัยที่ควบคุมได้

ในการออกแบบการทดลองเราแบ่งปัจจัยที่สามารถควบคุมได้มาใช้ในการทดลอง เพื่อป้องกันการผิดพลาดของผลการทดลอง โดยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ในการทดลองนี้ ได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ อัตราการป้อนช่วงระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการสปาร์ก ซึ่งปัจจัยทั้งสามตัวนี้ สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างแม่นยำโดยการสั่งการจากคอมพิวเตอร์ ที่อยู่ในเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire – EDM)

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เป็นปัจจัยที่ไม่อยากให้เกิดขึ้นในการทดลอง เพราะเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง ทำให้ผลของการทดลองผิดพลาดไป และสร้างความไม่น่าเชื่อถือให้กับรูปแบบของการทดลองโดยปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ความผิดพลาดของเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire – EDM) อุณหภูมิสภาพแวดล้อม ความผิดพลาดจากผู้ทำการทดลอง เป็นต้น

3.3.2 เลือกพารามิเตอร์ ระดับ และขอบเขต จากงานวิจัยของบรรคัชชัย โหมสิต และคณะพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วที่ตัดดีที่สุดคือ กระแสดิสชาร์จ สำหรับเวลาหยุดดิสชาร์จ ความเร็วลวด และความตึงเส้นลวด มีผลปานกลาง ส่วนระยะห่างลวดไม่มีผล ปัจจัยที่มีผลต่อความกว้างรอยตัดของชิ้นงานมากที่สุดคือ กระแสดิสชาร์จ ในส่วนของนิวัฒน์ ภูเก็มพบว่าระยะเวลาที่ปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์กและอัตราป้อนลวดซึ่งผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้พิจารณาตัวแปรที่เหมาะสมกับกรณีปัญหาสองผลตอบแทนได้แก่ ค่าความหยาบผิวและระยะการตัดเกินได้ดีและ Sanjiv Kumar ได้กล่าวเช่นเดียวกันคือ ความเร็วการตัดที่เพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มของเวลาเปิด และกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ ในขณะที่ไม่มีผลกระทบกับความคลาดเคลื่อนขนาด ค่าแรงดันไฟฟ้าเซอร์โว และเวลาปิดที่น้อยที่สุด มีผลทำให้ค่าความเร็วตัดที่ได้เป็นที่น่าพอใจ ซึ่งมีผลที่ดีในทางตรงกันข้ามกับค่าความคลาดเคลื่อน จากงานวิจัยดังกล่าวจึงพอสรุปได้ว่า กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์กและความตึงลวดและแรงดันไฟฟ้า จะเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการตัดชิ้นงานมากที่สุด ทำให้ผู้วิจัยมั่นใจว่าค่าตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะเป็นปัจจัยที่

นำมาใช้ในการทดลองในครั้งนี้ ส่วนระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองนั้นจะอ้างอิงจากค่าที่ใช้ในการตัดเหล็กกล้าเนื่องจากในกลุ่มมือของเครื่องยังไม่มีค่าที่ใช้สำหรับตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติก

3.3.3 เลือกรอกแบบการทดลอง ในการเลือกรอกแบบการทดลองได้เลือกรอกแบบการทดลองแบบทาคูชิ เนื่องจากการทดลองมีค่าใช้จ่ายน้อยและสามารถตัดตัวอย่างการทดลองได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองอื่น ๆ จำนวนของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมี 3 ปัจจัย เลือก OA L₉ และกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง n = 3

3.3.4 แผนการทดลองตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง คือกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) แรงดันไฟฟ้า (VG) และ อัตราป้อน (FA) โดยมีระดับดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งค่าดังกล่าวได้มาจากค่ามาตรฐานในการตัดเหล็กกล้าของเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire EDM) ส่วนตัวแปรที่นอกเหนือจากตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นนั้น จะกำหนดเป็นค่าคงที่ตลอดการทดลอง

ตารางที่ 3.2 แสดงระดับของตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปร	Level 1	Level 2	Level 3
กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP)	2	3	4
อัตราป้อน (FA)	4.1	5.4	6.1
แรงดันไฟฟ้า (VG)	58	60	62

ตารางที่ 3.3 ตารางการออกแบบการทดลอง OA, L₉

ลำดับการทดลอง	กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (แอมแปร์)	อัตราป้อน (มม./นาที)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
1	2	4.1	58
2	2	5.1	60
3	2	6.1	62
4	3	4.1	60
5	3	5.1	62
6	3	6.1	58
7	4	4.1	62
8	4	5.1	58
9	4	6.1	50

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 ขั้นตอนการตัดชิ้นงาน ก่อนที่จะทำการทดลองต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้ นำแผ่นเหล็กกล้าแม่พิมพ์มาจับยึดกับโต๊ะเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Wire – EDM) ให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.5

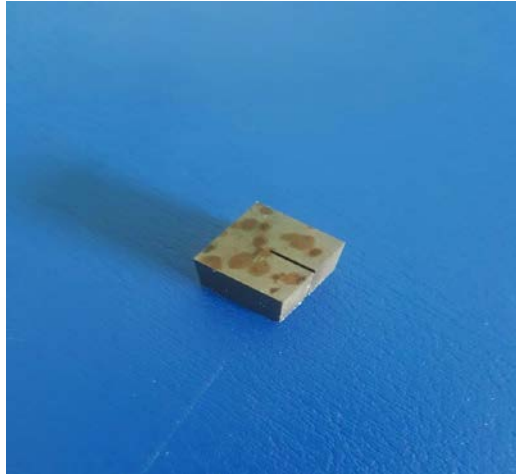


รูปที่ 3.5 แสดงการจับยึดเหล็กกล้าแม่พิมพ์บน โต๊ะของเครื่องตัดโลหะด้วยไฟฟ้า

หลังจากจับยึดชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ต่อมาทำการตั้งค่าศูนย์ของระบบพิกัดแกนทั้ง 3 แกน (X, Y, Z) ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงการเคลื่อนที่ของลวด เมื่อตั้งศูนย์เสร็จเรียก NC Program ที่บันทึกไว้ขึ้นมาเพื่อทำการตัดชิ้นทดลองดังรูปที่ 3.6 หลังการทดสอบโปรแกรมจึงป้อนค่าตัวแปรตามลำดับการสุ่ม โดยกำหนด VG, IP และ FA



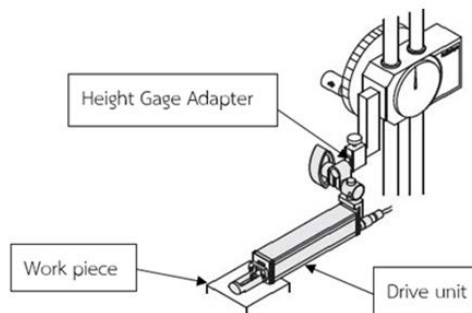
รูปที่ 3.6 การเคลื่อนตัดชิ้นงานตาม โปรแกรมที่ได้เขียนไว้



รูปที่ 3.7 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตัดด้วยวิธีอีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด

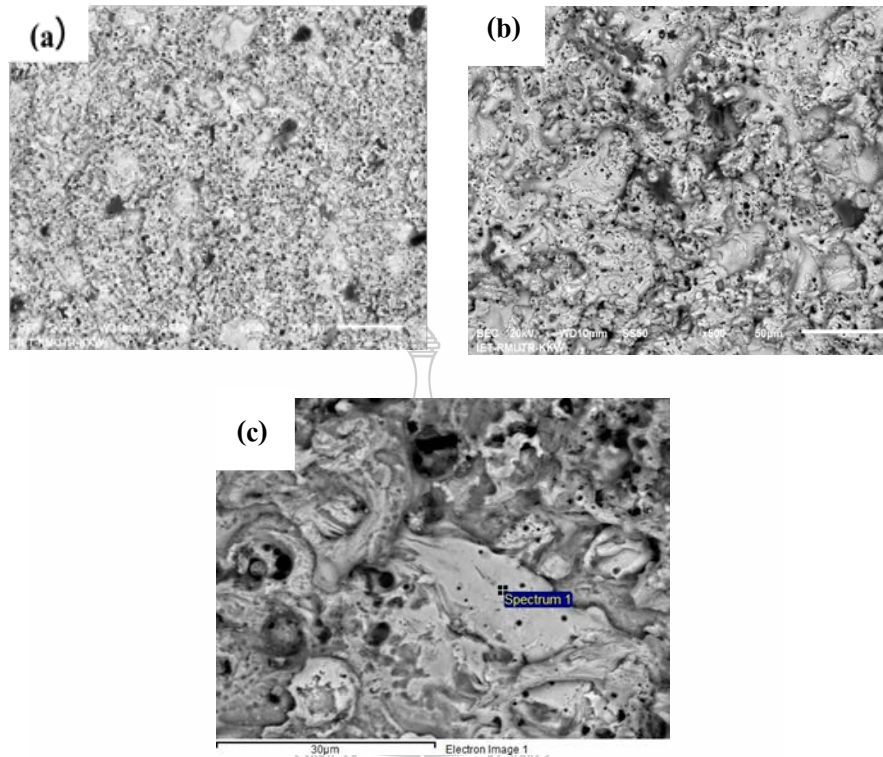
3.4.2 ขั้นตอนการตรวจสอบผลการตัด

ในขั้นตอนนี้จะตรวจสอบความหยาบผิวซึ่งอยู่ในรูปแบบ Ra และนำค่าที่ได้วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab-16 การตรวจสอบค่าความหยาบผิว โดยนำชิ้นงานแต่ละตัวแปรนำมาใช้ในการวัดค่าความหยาบผิวในรูปแบบ Ra วัดโดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ310 โดยทำการวัดซ้ำขึ้นละ 3 ค่าเพื่อลดค่าความแปรปรวนจากการทดลอง ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงการวัดค่าความหยาบผิว

3.4.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy) วิเคราะห์รอยแตกร้าวในระดับจุลภาคและวิเคราะห์ห้องค้ำประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (A) วิเคราะห์รอยแตกร้าวในระดับจุลภาค (B) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (C)



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลอง

ในการดำเนินการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ทำได้โดยการกำหนดปัจจัยที่จะให้ในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) และอัตราป้อน (FA) โดยใช้วิธีการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi Method) ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานและศึกษาผลกระทบของกระบวนการที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล การเกิดชั้นเคลือบผิว การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) ของชิ้นงานที่ตัดด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด เปรียบเทียบกันระหว่างตัวแปร 3 ชนิดแต่ละตัวแปรมี 3 ระดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีดังนี้

4.1 ผลการทดลองสำหรับค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

4.1.1 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ค่าความหยาบผิวของแต่ละเงื่อนไขการทดลอง แสดงดังตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ลำดับการทดลอง	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง			ความหยาบผิว (ไมโครเมตร)
	กระแสไฟฟ้า ดิสชาร์จ (แอมป์)	อัตราป้อน (มม./นาที)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	
1	2	4.1	58	3.783
2	2	5.1	60	3.986
3	2	6.1	62	3.473
4	3	4.1	60	3.817
5	3	5.1	62	3.412
6	3	6.1	58	3.346
7	4	4.1	62	4.000
8	4	5.1	58	3.854
9	4	6.1	60	3.886

4.1.2 ค่าอัตราส่วน S/N Ratio

ค่าความหยาบผิวในตารางที่ 4.1 จํานํามาใช้หาค่า S/N Ratio โดยใช้วิธี Taguchi ในการหาค่า โดยค่า S/N Ratio จะเป็นชนิด Smaller the better type problem (ค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่า S/N Ratio ที่ได้จากการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง			ความหยาบผิว (ไมโครเมตร)	S/N Ratio
	กระแสไฟฟ้า	อัตราป้อน	แรงดันไฟฟ้า		
	ดิสชาร์จ (แอมแปร์)		ดิสชาร์จ (โวลต์)		
1	2	4.1	58	3.783	-11.557
2	2	5.1	60	3.986	-12.011
3	2	6.1	62	3.473	-10.814
4	3	4.1	60	3.817	-11.634
5	3	5.1	62	3.412	-10.660
6	3	6.1	58	3.346	-10.491
7	4	4.1	62	4.000	-12.041
8	4	5.1	58	3.854	-11.718
9	4	6.1	60	3.886	-11.790

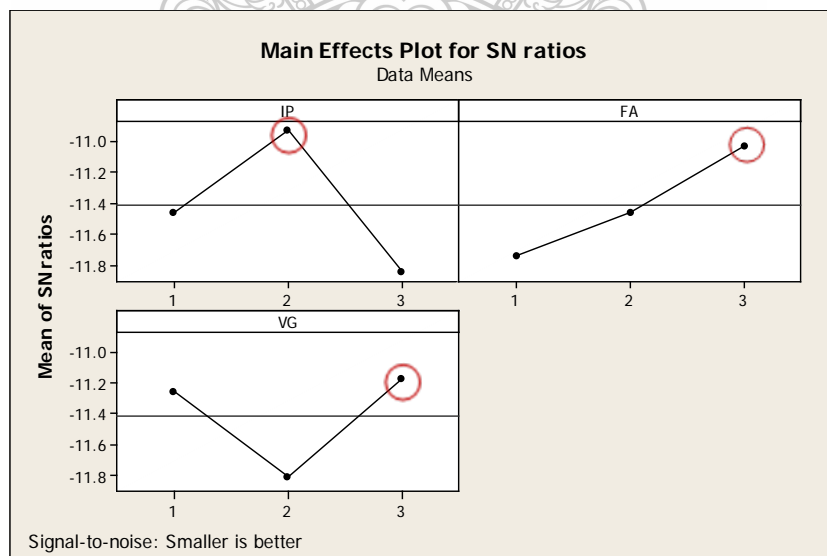
4.1.3 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย

ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ผลต่างของ S/N Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมที่แตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio หรือเรียกว่าอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุม ใช้อธิบายผลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่มีค่าตอบสนอง (ความหยาบผิว) ในรูปแบบของ S/N Ratio โดยเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio กล่าวคือ ถ้าค่า S/N Ratio ของแต่ละระดับปัจจัยควบคุมมีค่ามาก หมายถึง ระดับของปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้ชิ้นงานมีความหยาบผิวน้อย ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาจากค่า S/N Ratio เฉลี่ยของ IP จากตารางที่ 4.3 พบว่าที่ระดับ 2 มีค่า S/N Ratio เฉลี่ยมากที่สุด หมายความว่าถ้า IP ที่ระดับ 2 เป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองจะมีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ IP ที่ระดับ 1 และ 3 เป็น

องค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเดียวกัน ส่วน FA และ VG มีค่า S/N Ratio เล็กมากที่สุดคือ ระดับที่ 3 และระดับที่ 3 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระดับต่าง ๆ ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N Ratio เล็กของความหยาบผิว (Ra) พบว่าเงื่อนไขของแต่ละปัจจัยที่ให้ค่า S/N Ratio เล็กมากที่สุดประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) ที่ 3 แอมแปร์ อัตราป้อน (FA) ที่ 6.1 มม./นาที และแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) 62 โวลต์

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า S/N Ratio เล็กของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบความหยาบผิว (Ra)

ระดับของปัจจัย	ค่า S/N Ratio เล็ก		
	กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (แอมแปร์)	อัตราป้อน (มม./นาที)	แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (โวลต์)
1	-11.460	-11.740	-11.260
2	-10.930	-11.460	-11.810
3	-11.850	-11.030	-11.170



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระดับต่าง ๆ ของปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N Ratio เล็กของความหยาบผิว (Ra)

ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM) ผลต่างของ S/N-Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมที่แตกต่างกันไปจากค่าเฉลี่ยรวมของ S/N-Ratio หรือเรียกว่าอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุม ใช้อธิบายผลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมที่มีต่อค่าตอบสนอง ในรูปของ S/N-Ratio โดยเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรวมของ S/N-Ratio ถ้าค่าอิทธิพลของระดับของปัจจัยควบคุมใดมีค่าไปทางบวก หมายความว่าถ้าใช้ระดับของปัจจัยควบคุมนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองก็จะมีผลทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยรวมของ S/N-Ratio และถ้าค่าอิทธิพลของระดับของปัจจัยควบคุมใดมีค่าไปทางลบ หมายความว่าถ้าใช้ระดับของปัจจัยควบคุมนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ก็จะมีผลทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยรวมของ S/N-Ratio ผลต่างของ S/N-Ratio เฉลี่ย [16] แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Ra)

ระดับของปัจจัย	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง		
	กระแสไฟฟ้าคิซซาร์จ (แอมแปร์)	อัตราป้อน (มม./นาที)	แรงดันไฟฟ้า คิซซาร์จ (โวลต์)
1	-0.0471	-0.3271	0.1529
2	0.4829	-0.0471	-0.3971
3	-0.4371	0.3829	0.2429

4.1.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของค่าความหยาบผิว (Ra) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ด้วยวิธี General Linear model ในโปรแกรม Minitab 16 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือความเชื่อมั่นที่ 95% โดยพิจารณาค่า P-value ถ้า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะยอมรับสมมติฐานนั้นคือ ที่ปัจจัยใด ๆ ที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จะเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองของการทดลอง ยกเว้นอัตราป้อน (FA) และแรงดันไฟฟ้าคิซซาร์จ (VG) ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อความหยาบผิว (Ra) เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความแปรปรวนของความหยาบผิว (Ra)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
IP	2	0.22779	0.22779	0.113895	20.04	0.048
FA	2	0.28432	0.22779	0.067852	11.94	0.077
VG	2	0.1357	0.12827	0.064136	11.28	0.081
Error	2	0.01137	0.01137	0.005684		
Total	8	0.50314				

S = 0.1059 R-Sq = 98.2% R-Sq (adj) = 92.9%

4.1.5 การทดลองเพื่อยืนยันผล

จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ได้เงื่อนไขในการตัดชิ้นงาน ที่ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) ที่ 3 แอมแปร์ อัตราป้อน(FA) ที่ 6.1 มม./นาที และแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) 62 โวลต์ พบว่าเงื่อนไขในการทดลองดังกล่าวไม่ตรงตามเงื่อนไขในการทดลองจึงใช้โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Predict Taguchi Results ในการคำนวณผลเพื่อยืนยันผลจากการทดลองค่าความหยาบผิว พบว่าค่าความหยาบผิวมีความใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลของค่าความหยาบผิว

ผลการพยากรณ์ (μm)	การยืนยันผลการทดลอง (μm)	ค่าผิดพลาด (%)
3.264	3.2478	1.0052

จากผลการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวข้างต้น พบว่า กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ มีผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วยกระบวนการตัดวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำตัวแปรนี้มาใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นผิวเคลือบ รอยแตกร้าวในระดับจุลภาค และความแข็งผิว ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดแผนการทดลองดังต่อไปนี้

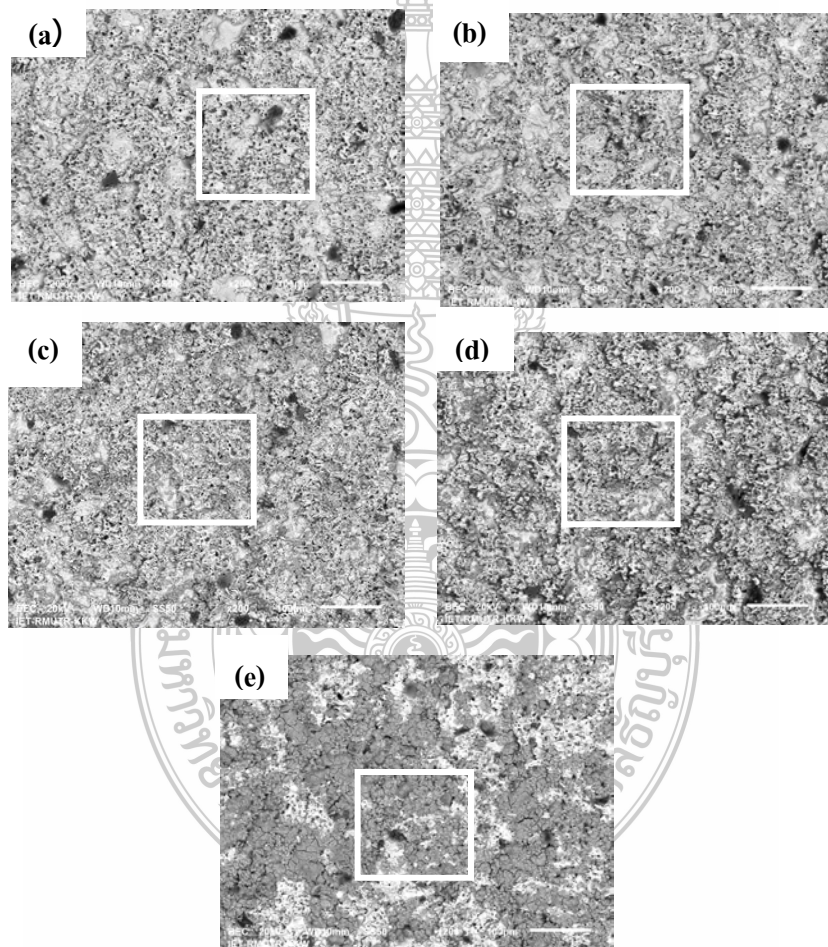
ตารางที่ 4.7 แผนการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นผิวเคลือบ รอยแตกร้าวในระดับจุลภาค และความแข็งผิว

ระดับ	1	2	3	4	5
กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (A)	2	5	8	11	14

สำหรับตัวแปรอื่นที่ใช้ในกระบวนการทดลองจะกำหนดคงที่ โดยเลือกจากระดับที่ทดลองแล้วให้ค่าความหยาบผิวต่ำสุด คือ แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อนลวด 6.1 มม./นาที

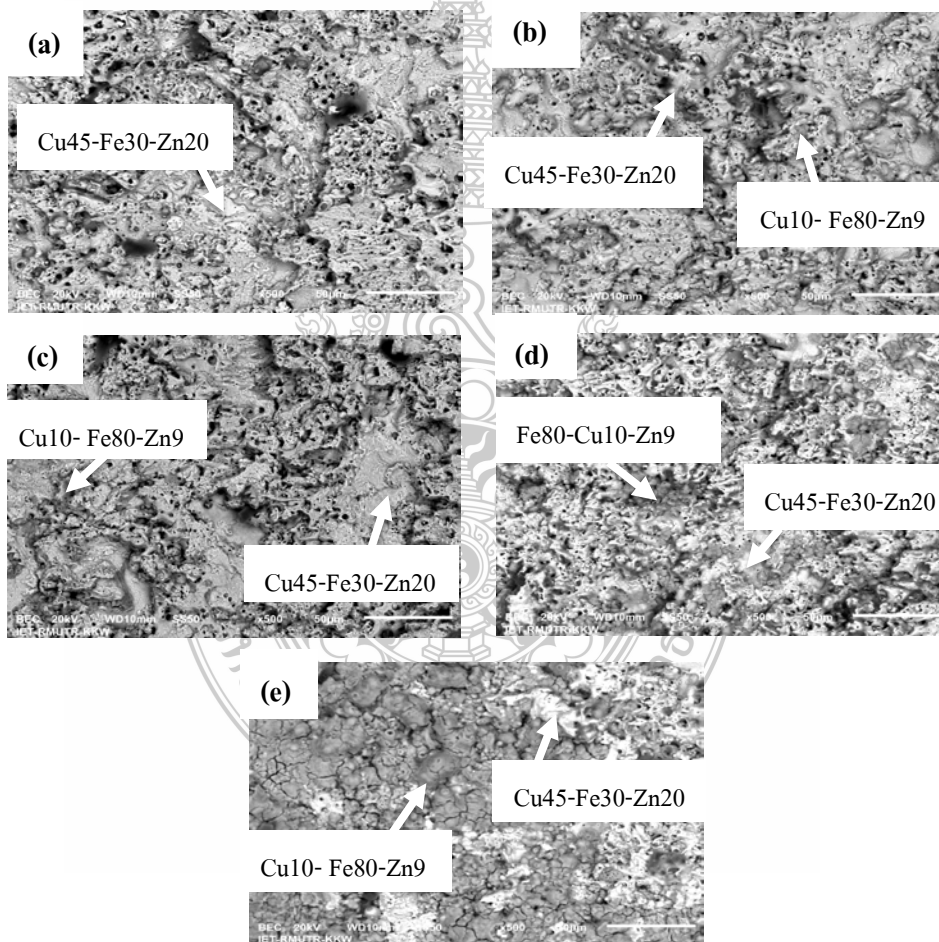
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่มีผลต่อการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วยกระบวนการตัดแบบวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire-EDM) ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (a) 2 A, (b) 5 A, (c) 8 A, (d) 11 A และ (e) 14 A โดยกำหนดตัวแปรอื่นคงที่ คือ แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาที

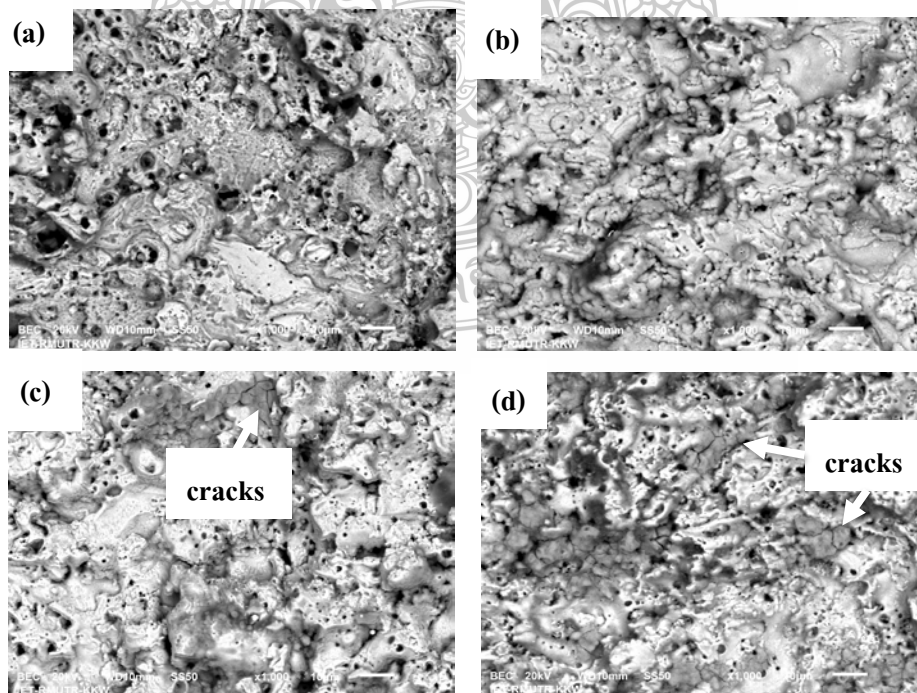
โดยผลจากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในการตัดจะส่งผลให้ชั้นผิวเคลือบ Cu45-Fe30-Zn20%Atomic ถูกแทนที่ด้วยเฟส Cu10-Fe80-Zn9%Atomic แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งรูป a คือ โครงสร้างจุลภาคของการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ที่กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 A จะเห็นได้ว่า พื้นผิวเหล็กจะถูกปกคลุมด้วยชั้นผิวเคลือบ Cu45-Fe30-Zn20%Atomic เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 5 A รูป b ปรากฏว่า บริเวณชั้นผิวเคลือบเริ่มเกิดเฟส Cu10-Fe80-Zn9%Atomic และเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในการตัด 8 A รูป c ชั้นผิวเคลือบ Cu45-Fe30-Zn20%Atomic จะมีปริมาณลดลงและถูกแทนที่ด้วยเฟส Cu10-Fe80-Zn9%Atomic ซึ่งเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 14 A รูป e จะเห็นได้ชัดว่า เฟส Cu45-Fe30-Zn20%Atomic จะมีปริมาณน้อยและถูกแทนด้วยพื้นที่เฟส Cu10-Fe80-Zn9%Atomic ที่มีปริมาณมากขึ้น

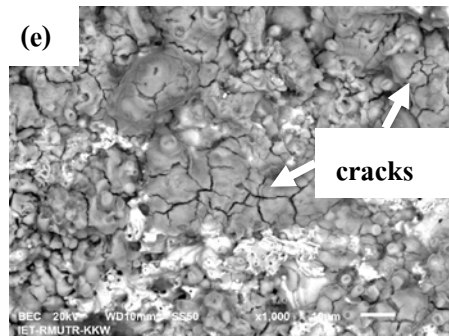


รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (a) 2 A, (b) 5 A, (c) 8 A, (d) 11 A และ (e) 14 A โดยกำหนดตัวแปรอื่นคงที่ คือ แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาที

4.3 ผลการตรวจสอบรอยแตกร้าวในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการวิเคราะห์รอยแตกร้าวในระดับจุลภาค (Micro-crack) จากการศึกษาอิทธิพลของไฟฟ้าในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วยกระบวนการตัดแบบวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด แสดงผลดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะพบว่า รอยแตกร้าวในระดับจุลภาคจะเกิดขึ้นบริเวณเฟส Cu10-Fe80-Zn9%Atomic ซึ่งการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการตัดจะส่งผลให้พื้นที่เฟส Cu10-Fe80-Zn9%Atomic เกิดมากขึ้นเป็นผลให้พื้นที่ของรอยแตกร้าวมีปริมาณมากขึ้นตามเฟส Cu10-Fe80-Zn9%Atomic โดยที่ใช้กระแสไฟฟ้าคิซาร์จที่ 2 และ 5 A จะไม่เกิดพื้นผิวที่มีรอยแตกร้าวเนื่องจากผิวเคลือบ Cu45-Fe30-Zn20%Atomic เป็นเฟสที่มีความเหนียว สาเหตุของการเกิดรอยแตกร้าวในระดับจุลภาคของเฟส Cu10-Fe80-Zn9%Atomic คือ อิทธิพลทางความร้อนที่เกิดจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าคิซาร์จในการตัด จะส่งผลให้ความร้อนในการตัดเพิ่มขึ้นทำให้อะตอมของ Cu และ Zn มีอัตราในการเกาะผิวเหล็กน้อยลง ซึ่งสมบัติของเหล็กหรือ Fe เมื่อได้รับความร้อนสูงและเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้เหล็กเปลี่ยนสถานะจากเหนียวเป็นแข็ง แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวนั้นรวดเร็วเกินไปจะทำให้เหล็กนั้นเกิดความเครียดแข็งเปลี่ยนสถานะจากแข็งเป็นเปราะ นอกจากนี้กระบวนการนี้เป็นวิธีการตัดโลหะไดน้ำ ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการตัดที่โลหะมีอัตราการเย็นตัวสูง ยิ่งใช้กระแสไฟฟ้าคิซาร์จในการตัดเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้อัตราการเย็นตัวยิ่งสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้การใช้กระแสไฟฟ้าคิซาร์จในการตัด 14 A จึงเกิดรอยแตกร้าวหรือ Micro-crack มากที่สุด



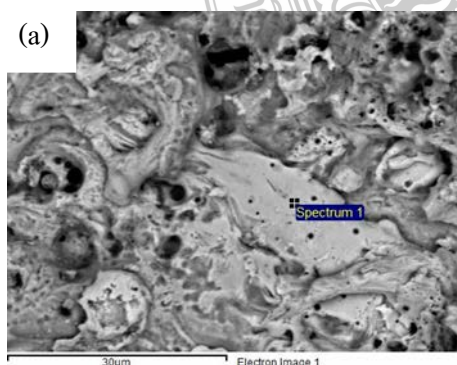


รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของการสึกกร่อนอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (a) 2 A, (b) 5 A, (c) 8 A, (d) 11 A และ (e) 14 A โดยกำหนดตัวแปรอื่นคงที่ คือ แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาที

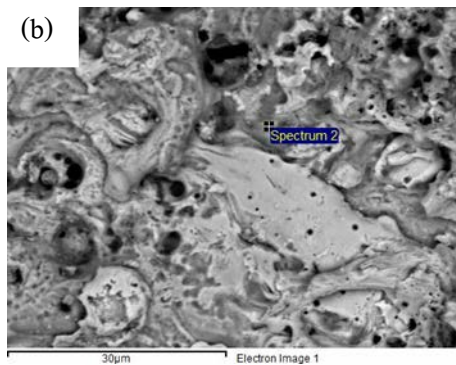
4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) ซึ่งได้ศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2, 5, 8, 11 และ 14 A สามารถสรุปผลได้ดังนี้

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 A จากการวิเคราะห์ EDS แสดงผลดังในรูปที่ 4.5 โดยผลการตรวจสอบสเปกตรัมที่ 1 คือ เฟสที่มี $\text{Cu}_{45}\text{-Fe}_{30}\text{-Zn}_{20}\%$ Atomic ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสดังรูปที่ 4.5 a และรูปที่ 4.5 b แสดงองค์ประกอบทางเคมีของผลการตรวจสอบในสเปกตรัมที่ 2 พบว่าเป็นเฟส $\text{Fe}_{80}\text{-Cu}_{10}\text{-Zn}_{9}\%$ Atomic



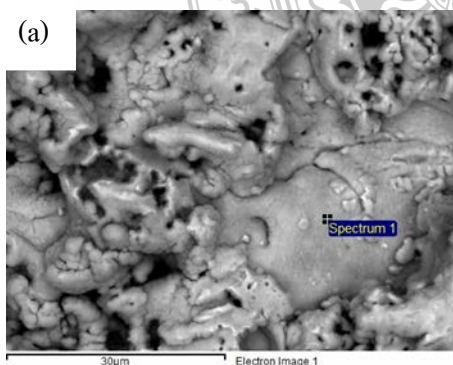
Element	Weight%	Atomic%
Al K	0.64	1.33
Si K	0.28	0.57
Cr K	0.20	0.22
Mn K	1.36	1.39
Fe K	83.00	83.63
Ni K	2.70	2.59
Cu K	10.71	9.49
Zn K	0.52	0.45
Mo L	0.58	0.34
Totals	100.00	



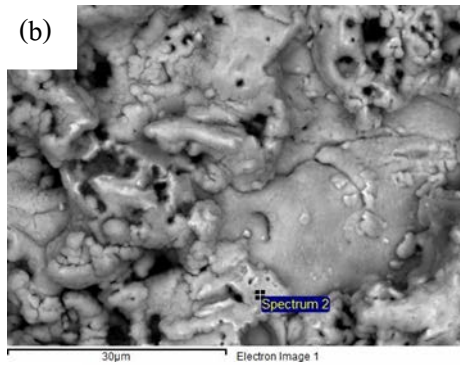
Element	Weight%	Atomic%
Al K	0.64	1.33
Si K	0.28	0.57
Cr K	0.20	0.22
Mn K	1.36	1.39
Fe K	83.00	83.63
Ni K	2.70	2.59
Cu K	10.71	9.49
Zn K	0.52	0.45
Mo L	0.58	0.34
Totals	100.00	

รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 5 A จากการวิเคราะห์ EDS แสดงผลดังในรูปที่ 4.6 โดยผลการตรวจสอบสเปกตรัมที่ 1 คือ เฟส $\text{Cu}_{10}\text{-Fe}_{80}\text{-Zn}_9\% \text{Atomic}$ ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสดังรูปที่ 4.6 a และรูปที่ 4.6 b แสดงองค์ประกอบทางเคมีของผลการตรวจสอบในสเปกตรัมที่ 2 พบว่าเป็นเฟสที่มี $\text{Cu}_{45}\text{-Fe}_{30}\text{-Zn}_{20}\% \text{Atomic}$



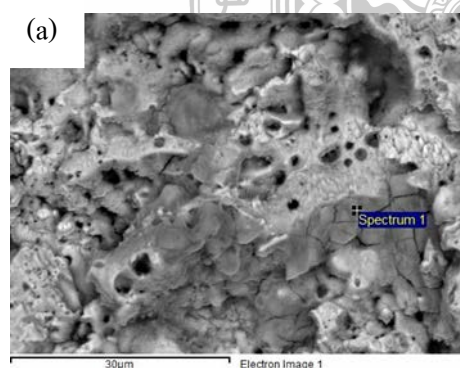
Element	Weight%	Atomic%
Al K	0.84	1.77
Si K	0.56	1.13
Cr K	0.24	0.26
Mn K	1.13	1.16
Fe K	74.97	76.02
Ni K	2.40	2.32
Cu K	8.33	7.43
Zn K	11.24	9.74
Mo L	0.29	0.17
Totals	100.00	



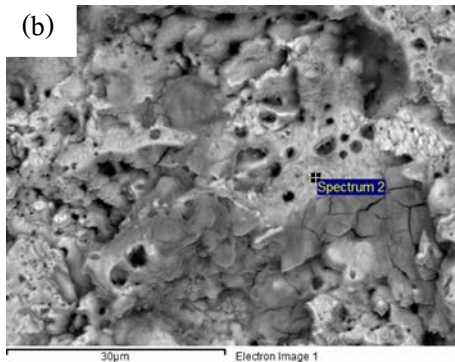
Element	Weight%	Atomic%
Al K	0.41	0.86
Si K	0.61	1.24
Cr K	0.27	0.29
Mn K	0.68	0.70
Fe K	79.02	80.21
Ni K	2.10	2.03
Cu K	8.82	7.87
Zn K	7.32	6.34
Mo L	0.76	0.45
Totals	100.00	

รูปที่ 4.6 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 5 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 8 A จากการวิเคราะห์ EDS แสดงผลดังในรูปที่ 4.7 โดยผลการตรวจสอบสเปกตรัมที่ 1 คือ เฟส $\text{Cu}_{10}\text{-Fe}_{80}\text{-Zn}_9\% \text{Atomic}$ ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสดังรูปที่ 4.7 a และรูปที่ 4.7 b แสดงองค์ประกอบทางเคมีของผลการตรวจสอบในสเปกตรัมที่ 2 พบว่าเป็นเฟสที่มี $\text{Cu}_{45}\text{-Fe}_{30}\text{-Zn}_{20}\% \text{Atomic}$



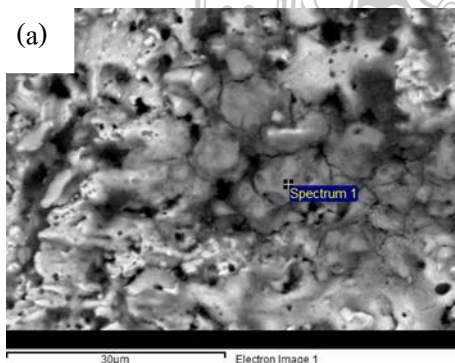
Element	Weight%	Atomic%
Al K	0.17	0.39
Si K	0.47	1.01
Cr K	0.07	0.09
Mn K	0.40	0.44
Fe K	32.31	35.11
Ni K	0.96	0.99
Cu K	41.26	39.41
Zn K	24.18	22.45
Mo L	0.17	0.11
Totals	100.00	



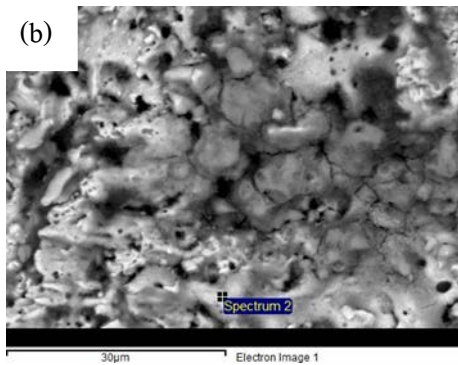
Element	Weight%	Atomic%
Al K	0.84	1.87
Si K	0.32	0.67
Cr K	0.21	0.24
Mn K	0.53	0.58
Fe K	36.89	39.48
Ni K	0.94	0.95
Cu K	44.61	41.96
Zn K	15.40	14.08
Mo L	0.26	0.16
Totals	100.00	

รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 8 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 11 A จากการวิเคราะห์ EDS แสดงผลดังในรูปที่ 4.8 โดยผลการตรวจสอบสเปกตรัมที่ 1 คือ เฟส $\text{Cu}_{10}\text{-Fe}_{80}\text{-Zn}_9\% \text{Atomic}$ ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสดังรูปที่ 4.8 a และรูปที่ 4.8 b แสดงองค์ประกอบทางเคมีของผลการตรวจสอบในสเปกตรัมที่ 2 พบว่าเป็นเฟสที่มี $\text{Cu}_{45}\text{-Fe}_{30}\text{-Zn}_{20}\% \text{Atomic}$



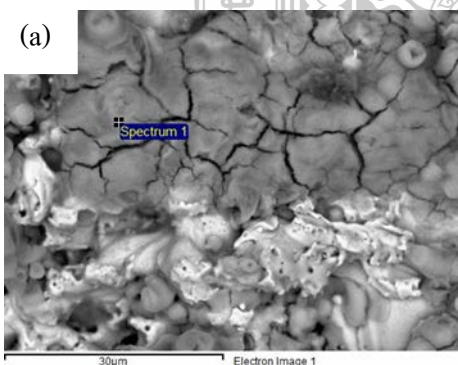
Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.61	7.27
Si K	1.12	2.17
Cr K	0.02	0.02
Mn K	0.57	0.57
Fe K	79.61	77.49
Ni K	1.07	0.99
Cu K	2.07	1.77
Zn K	11.21	9.32
Mo L	0.71	0.40
Totals	100.00	



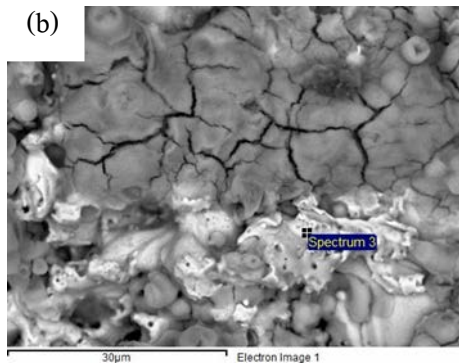
Element	Weight%	Atomic%
Al K	0.84	1.87
Si K	0.32	0.67
Cr K	0.21	0.24
Mn K	0.53	0.58
Fe K	36.89	39.48
Ni K	0.94	0.95
Cu K	44.61	41.96
Zn K	15.40	14.08
Mo L	0.26	0.16
Totals	100.00	

รูปที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ 11 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2

อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ 14 A จากการวิเคราะห์ EDS แสดงผลดังในรูปที่ 4.9 โดยผลการตรวจสอบสเปกตรัมที่ 1 คือ เฟส Cu10-Fe80-Zn9%Atomic ซึ่งแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเฟสดังรูปที่ 4.9 a และรูปที่ 4.9 b แสดงองค์ประกอบทางเคมีของผลการตรวจสอบในสเปกตรัมที่ 2 พบว่าเป็นเฟสที่มี Cu45-Fe30-Zn20%Atomic



Element	Weight%	Atomic%
Al K	0.04	0.08
Si K	0.38	0.77
Cr K	0.01	0.01
Mn K	0.69	0.71
Fe K	90.58	91.34
Ni K	2.04	1.96
Cu K	0.99	0.88
Zn K	4.66	4.01
Mo L	0.68	0.40
Totals	100.00	



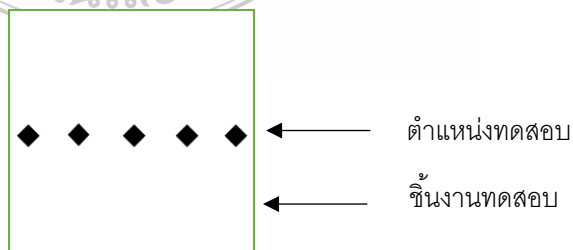
Element	Weight%	Atomic%
Al K	0.61	1.36
Si K	0.39	0.84
Cr K	0.15	0.17
Mn K	0.47	0.52
Fe K	31.51	34.03
Ni K	0.96	0.99
Cu K	48.05	45.61
Zn K	17.85	16.47
Mo L	0.01	0.00
Totals	100.00	

รูปที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ EDS อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 14 A (a) สเปกตรัมที่ 1 และ (b) สเปกตรัมที่ 2

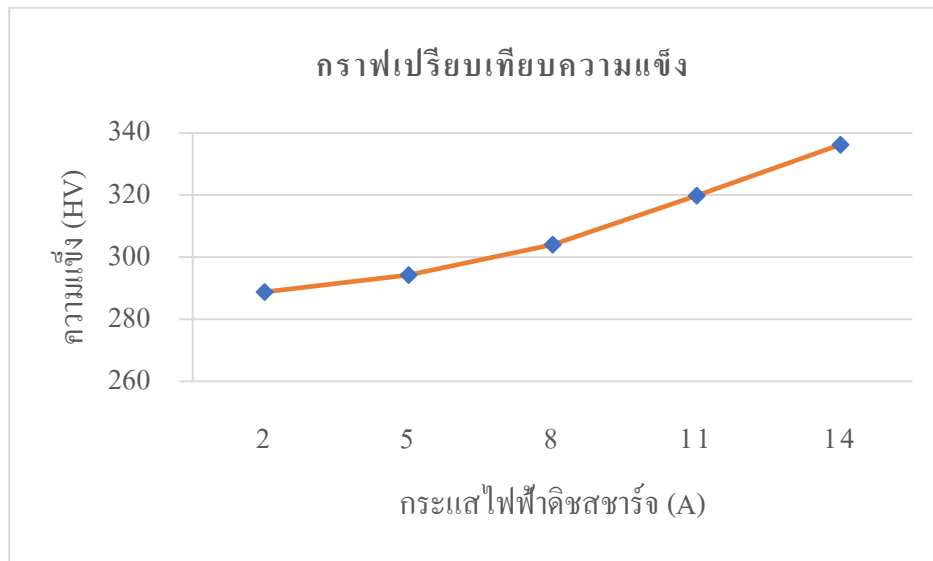
ผลจากการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีของชั้นสารประกอบเชิงโลหะด้วยเทคนิคการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงานของธาตุ (EDS) จากการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2, 5, 8, 11 และ 14 A พบว่า เกิดชั้นผิวเคลือบใหม่ หรือเฟสเหมือนกันคือ เกิดเฟส Cu45-Fe30-Zn20%Atomic และ Cu10-Fe80-Zn9%Atomic ทุกเงื่อนไขในการทดลอง

4.5 ผลการศึกษาความแข็งชั้นผิวเคลือบ

จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและรอยแตกร้าวในระดับจุลภาคจากข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความแข็งผิวเพิ่มเติม เพื่ออธิบายสมบัติเชิงกลของ โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นของอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2, 5, 8, 11 และ 14 A ตามลำดับ โดยการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness test) แสดงดังรูปที่ 4.10 และผลการทดสอบความแข็งผิวแสดงดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งการกดความแข็ง



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิซซาร์จ

ผลการศึกษาความแข็งจากข้อมูลข้างต้น พบว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิซซาร์จในการตัดเหล็ก NAK80 ด้วยวิธีอีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด ส่งผลให้ความแข็งของผิวชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น โดยชิ้นงานที่ให้ความแข็งต่ำสุด คือ กระแสไฟฟ้าดิซซาร์จในการตัด 2 A และความแข็งผิวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าดิซซาร์จ 5, 8 และ 11 A ตามลำดับ และชิ้นงานที่ให้ความแข็งมากที่สุด คือ กระแสไฟฟ้าดิซซาร์จ 14 A มีค่าความแข็ง 336 HV

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งของการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิซซาร์จ 2, 5, 8, 11 และ 14 A

ชั้นที่	จุดที่1	จุดที่2	จุดที่3	จุดที่4	จุดที่5	เฉลี่ย
1	286.7	303.4	314	242.6	297.3	288.8
2	308	295.2	276.3	301.1	299.8	294.28
3	304.7	303.2	298.8	303.8	310	304.1
4	322.8	318.4	324.4	315.4	318.4	319.88
5	340	330.9	337.2	339.3	334	336.28

สรุปผลการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ

ผลจากการศึกษาอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่มีผลต่อคุณภาพผิวตัดของเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 สำหรับตัดด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดพบว่า การใช้กระแสไฟฟ้าในการตัดในช่วง 2-5 A ผิวชิ้นงานจะถูกปกคลุมด้วยเฟส Cu45-Fe30-Zn20%Atomic ซึ่งเป็นเฟสที่มีความเหนียวไม่เกิดรอยแตกร้าวในระดับจุลภาคแต่จะมีค่าความแข็งต่ำ และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ จะพบว่าชั้นผิวเคลือบของ Cu45-Fe30-Zn20%Atomic จะน้อยลงและถูกแทนที่ด้วยเฟสที่ประกอบด้วยธาตุ Cu10-Fe80-Zn9%Atomic ซึ่งเป็นเฟสที่มีค่าความแข็งสูงกว่า ทำให้เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการตัดจึงมีผลให้ผิวชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ทำให้ที่กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 14 A จึงเป็นชิ้นงานที่มีความแข็งมากที่สุด



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การดำเนินการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานและศึกษาผลกระทบของกระบวนการที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล การเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) ของชิ้นงานที่ตัดด้วยวิธีการอัติโนมัติชนิดตัดด้วยเส้นลวด เปรียบเทียบกันระหว่างตัวแปร 3 ชนิดแต่ละตัวแปรมี 3 ระดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีดังนี้

5.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยการกำหนดปัจจัยที่จะให้ในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) และอัตราป้อน (FA) โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ OA₃L₉ พบว่าเงื่อนไขในการตัดชิ้นงาน ที่ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) ที่ 3 แอมแปร์, อัตราป้อน (FA) ที่ 6.1 มม./นาทีและแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) 62 โวลต์ ซึ่งได้ค่าความหยาบผิวที่ดีที่สุด ที่ 3.247 ไมโครเมตร

5.1.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยผลจากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในการตัดจะส่งผลให้ชั้นผิวเคลือบ Cu₄₅-Fe₃₀-Zn₂₀%Atomic ถูกแทนที่ด้วยเฟส Cu₁₀-Fe₈₀-Zn₉%Atomic ที่กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 A จะเห็นได้ว่า พื้นผิวเหล็กจะถูกปกคลุมด้วยชั้นผิวเคลือบ Cu₄₅-Fe₃₀-Zn₂₀%Atomic เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 5 A รูป b ปรากฏว่า บริเวณชั้นผิวเคลือบเริ่มเกิดเฟส Cu₁₀-Fe₈₀-Zn₉%Atomic และเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในการตัดชิ้นผิวเคลือบ Cu₄₅-Fe₃₀-Zn₂₀%Atomic จะมีปริมาณลดลง และถูกแทนที่ด้วยเฟส Cu₁₀-Fe₈₀-Zn₉%Atomic ซึ่งเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จจะเห็นได้ชัดว่าเฟส Cu₄₅-Fe₃₀-Zn₂₀%Atomic จะมีปริมาณน้อยและถูกแทนที่ด้วยเฟส Cu₁₀-Fe₈₀-Zn₉%Atomic ที่มีปริมาณมากขึ้น

5.1.3 ผลการตรวจสอบรอยแตกร้าวในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดผลการวิเคราะห์รอยแตกร้าวในระดับจุลภาค (Micro-crack) จากการศึกษาคู่ผิวของไฟฟ้าในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วยกระบวนการตัดแบบวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด แสดงผลดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะพบว่า รอยแตกร้าวในระดับจุลภาคจะเกิดขึ้นบริเวณเฟส Cu₁₀-Fe₈₀-Zn₉%Atomic ซึ่งการเพิ่มกระแสไฟฟ้าในการตัดจะส่งผลให้พื้นที่เฟส เฟส Cu₁₀-Fe₈₀-Zn₉%Atomic เกิดมากขึ้นเป็นผลให้พื้นที่ของรอยแตกร้าวมีปริมาณมากขึ้นตามเฟส Cu₁₀-Fe₈₀-Zn₉%Atomic โดยที่

การใช้กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จที่ 2 และ 5 A จะไม่เกิดพื้นผิวที่มีรอยแตกร้าวเนื่องจากผิวเคลือบ Cu45-Fe30-Zn20%Atomic เป็นเฟสที่มีความเหนียว

สาเหตุของการเกิดรอยแตกร้าวในระดับจุลภาค คือ อิทธิพลทางความร้อนที่เกิดจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในการตัดจะมีผลให้ความร้อนในการตัดเพิ่มสูงขึ้นทำให้อะตอมของ Cu และ Zn มีอัตราในการเกาะผิวเหล็กน้อยลง ซึ่งสมบัติของเหล็กหรือ Fe เมื่อได้รับความร้อนสูงและเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้เหล็กเปลี่ยนสถานะจากเหนียวเป็นแข็ง แต่ถ้าอัตราการเย็นตัวนั้นรวดเร็วเกินไปจะทำให้เหล็กนั้นเกิดความเครียดแข็งเปลี่ยนสถานะจากแข็งเป็นเปราะ นอกจากนี้กระบวนการนี้เป็นวิธีการตัดโลหะได้น้ำดังนั้นกระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการตัดที่โลหะมีอัตราการเย็นตัวสูงยิ่งใช้กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในการตัดเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้อัตราการเย็นตัวยิ่งสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้การใช้กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จในการตัด 14 A จึงเกิดรอยแตกร้าวหรือ Micro-crack มากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาในครั้งนี้ พบว่าวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุมาแล้วนั้น ซึ่งในการตัดเฉือนด้วยกระบวนการ EDM นั้น จำเป็นต้องใช้อิเล็กโทรดที่มีคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าที่ดีมีจุดหลอมเหลวสูง อาทิเช่น Graphite เป็นต้น จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานด้วยกระบวนการ EDM ความถี่การใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทำงานหรือการทดลอง

บรรณานุกรม

- [1] Copyright 1980 Daido Steel Co. Ltd, NAK55 NAK80 40 HRC Pre-hard Type High Performance, High Precision Plastic Mold Steel, 1980 Daido Steel Co. Ltd
- [2] ศรายุทธ ทองอุทัย. 2544, การศึกษาสภาพ ความต้องการและปัญหาของการใช้คอมพิวเตอรืของสถานประกอบการอุตสาหกรรม แม่พิมพ์เขตกรุงเทพและปริมณฑล, วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] N. M. Abbas, D.G. Solomon, and M.F. Bahari, "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)", *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 2007, pp. 1214-1228.
- [4] J.A. Sanchez, J.L. Rodil, A.Herrero, L.N. Lopez de Lacalle and A. Lamikiz, "On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire EDM corner-cutting", *Journal of Materials Processing Technology* 182, 2007, pp. 574-579.
- [5] N. Tosun, C. Cogun and G. Tosun, "A study on kerf and material removal rate in wire electrical Discharge machining based on Taguchi method", *Journal of Materials Processing Technology* 152, 2004, pp. 316-322.
- [6] S. Sarkar, S.Mitra and B.Bhattacharyya, "Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminide alloy", *Journal of Materials Processing Technology* 159, 2005, pp. 286-294.8
- [7] เทคโนโลยีการกัดเซาะ โลหะด้วยตัวนำไฟฟ้า, <http://app.eng.ubu.ac.th.1> กันยายน. 2555.
- [8] Inoue, K.,1977, *Fundament of Electrical Discharge Machining*, Tokyo, Society of Non-Traditional Technology, p 270
- [9] ประสพ อนุชาติ. การเปรียบเทียบผลของการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดระหว่างกรณีที่กำลังช่วงพัลส์คงที่และกรณีมีการปรับอัตราโนมิต.สาขาวิศวกรรมระบบการผลิต, ภาควิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [10] ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า และเหล็กหล่อต่าง ๆ. <http://heattreatment.sut.ac.th/>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] เฉลิมพล คล้ายนิล. การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการกลึงเหล็กกล้าสแตนเลสด้วยใบมีดคาร์ไบด์ ที่มีผลต่อการสึกหรอใบมีดตัดและความขรุขระของผิว,วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.2549.
- [12] ปวดี เพชรไพรินทร์, 2549, การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวและความสึกหรอของคมตัด ในการกัดทองเหลืองผสม, วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิตอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [13] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์, 2551, การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, หน้า 1-31.15
- [14] กิตติภักดิ์ รัตนจันทร์ และ สถาพร ชาดาคม. ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล / วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.16
- [15] ประเมศ ชูติมา, 2545, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, บริษัทด้านสุทธาคารพิมพ์ จำกัด, หน้า 269-273.17
- [16] วิชญ์วัฒน์ เกตุอู๊ด. อิทธิพลของผงอะลูมิเนียมที่มีผลต่อความหยาบผิวเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ด้วยกระบวนการ PMEDM, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.2557
- [17] ชรรค์ชัย โฆสิต. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด,หน้า 55-56. 18
- [18] Pardeep Kumar and Jatinder Kumar “Modeling and investigating for Cutting Speed and dimensional Deviation in WEDM of WC-24% Co Composite using Response Surface Methodology and Desirability Function” International Journal of Advanced Mechanical Engineering.ISSN 2250-3234 Volume 4, Number 6 (2014), pp. 657-666.19
- [19] Sanjiv Kumar and Jatinder Kumar “Modeling and Experimental Investigation of Process Parameters in WEDM of WC-6%Co Composite using Response Surface Methodology ” International Journal of Advanced Mechanical Engineering. ISSN 2250-3234 Volume 4, Number 5 (2014), pp. 573-581.20

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] นิวัฒน์ มูเก็ม. การประยุกต์การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ในการตัดไทเทเนียม.
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2557.21





ภาคผนวก

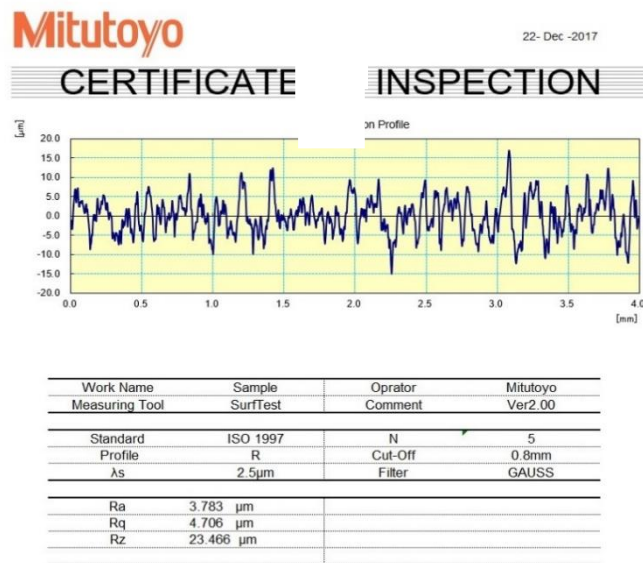
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลบุรีรัมย์



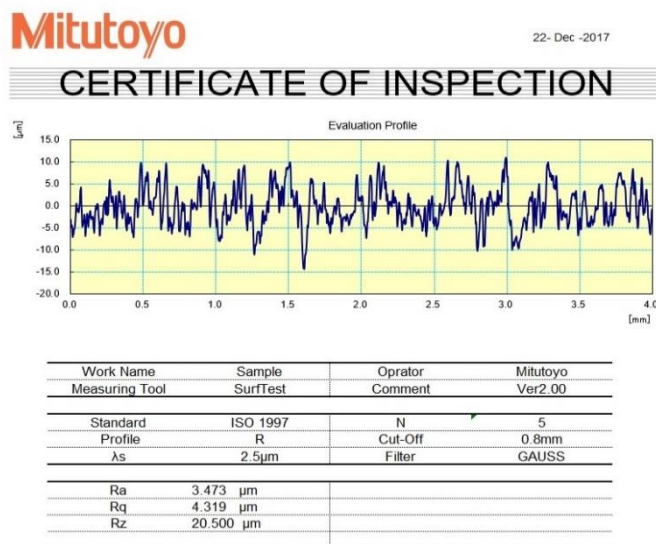
ภาคผนวก ก

ผลการวัดค่าความหยابผิวชิ้นงาน

ก.ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงาน



รูปที่ ก.1 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้า ดิสชาร์จ 58 โวลต์ และอัตราป้อน 4.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1



รูปที่ ก.2 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้า ดิสชาร์จ 60 โวลต์ และอัตราป้อน 5.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

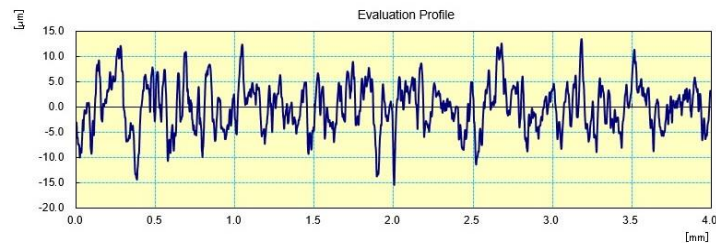
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
As	2.5μm	Filter	GAUSS
Ra	3.473 μm		
Rq	4.319 μm		
Rz	20.500 μm		

รูปที่ ก.3 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซาร์จ 2 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้า คิซาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
As	2.5μm	Filter	GAUSS
Ra	3.815 μm		
Rq	4.692 μm		
Rz	23.528 μm		

รูปที่ ก.4 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซาร์จ 3 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้า คิซาร์จ 60 โวลต์ และอัตราป้อน 4.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

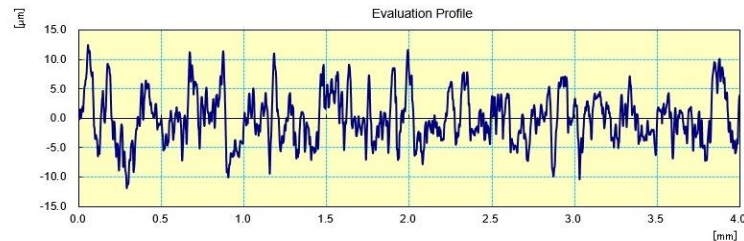
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.408 µm		
Rq	4.319 µm		
Rz	22.409 µm		

รูปที่ ก.5 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 3 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้า ดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 5.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

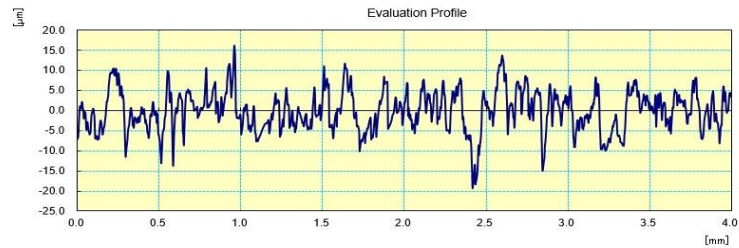
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.411 µm		
Rq	4.175 µm		
Rz	19.957 µm		

รูปที่ ก.6 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 3 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้า ดิสชาร์จ 58 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

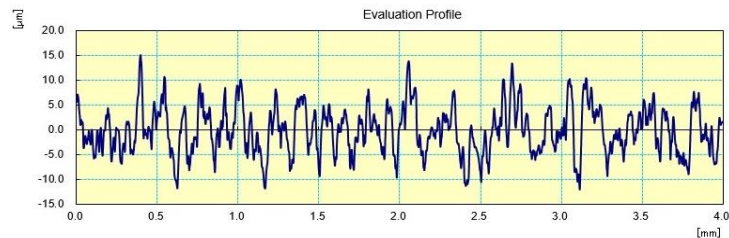
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.954 µm		
Rq	4.987 µm		
Rz	24.251 µm		

รูปที่ ก.7 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซาร์จ 4 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้า คิซาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 4.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

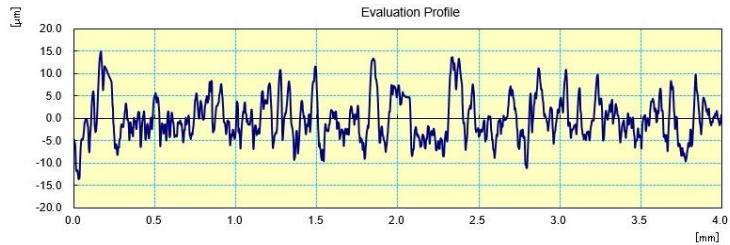
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.854 µm		
Rq	4.754 µm		
Rz	23.084 µm		

รูปที่ ก.8 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซาร์จ 4 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้า คิซาร์จ 58 โวลต์ และอัตราป้อน 5.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

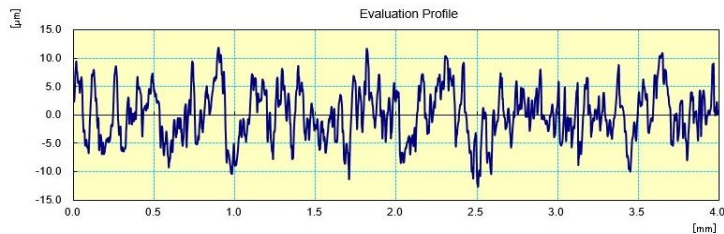
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.890 µm		
Rq	4.840 µm		
Rz	22.945 µm		

รูปที่ ก.9 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 4 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้า ดิสชาร์จ 60 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

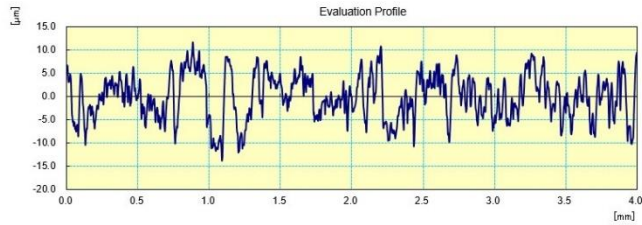
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.726 µm		
Rq	4.577 µm		
Rz	21.476 µm		

รูปที่ ก.10 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 แอมแปร์. แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 58 โวลต์ และอัตราป้อน 4.1 มม./นาทีชิ้นที่ 2

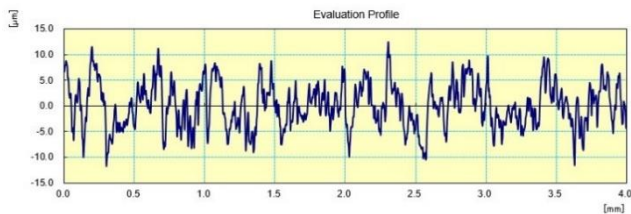
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	4.000 µm		
Rq	4.766 µm		
Rz	20.696 µm		

รูปที่ ก.11 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 60 โวลต์ และอัตราป้อน 5.1 มม./นาทีชิ้นที่ 2

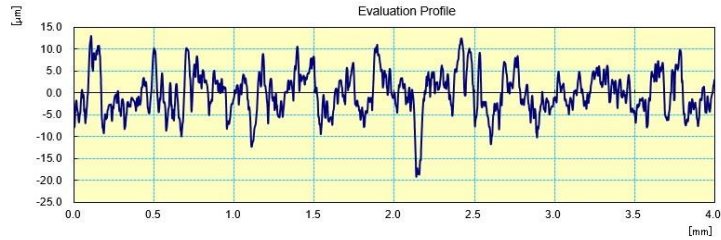
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.570 µm		
Rq	4.359 µm		
Rz	20.969 µm		

รูปที่ ก.12 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาทีชิ้นที่ 2

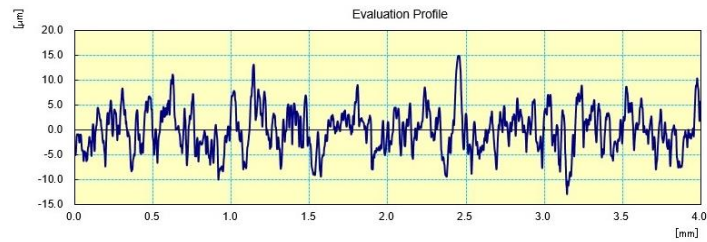
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.817 µm		
Rq	4.786 µm		
Rz	23.614 µm		

รูปที่ ก.13 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซชาร์จ 3 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าคิซชาร์จ 60 โวลต์ และอัตราป้อน 4.1 มม./นาทีขึ้นที่ 2

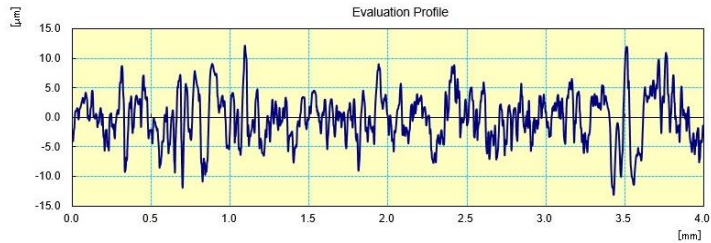
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.401 µm		
Rq	4.261 µm		
Rz	21.524 µm		

รูปที่ ก.14 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซชาร์จ 3 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าคิซชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 5.1 มม./นาทีขึ้นที่ 2

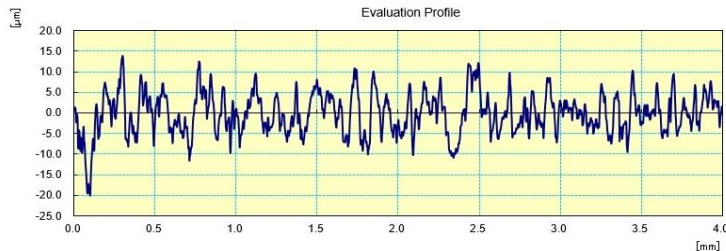
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
As	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.259 µm		
Rq	4.037 µm		
Rz	20.537 µm		

รูปที่ ก.15 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 3 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 58 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
As	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	4.002 µm		
Rq	4.934 µm		
Rz	22.817 µm		

รูปที่ ก.16 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 4 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 4.1 มม./นาทีชิ้นที่ 1

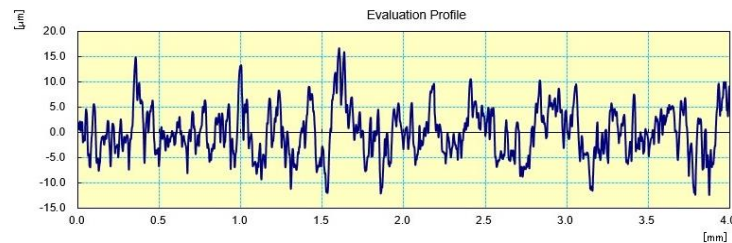
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.886 µm		
Rq	4.817 µm		
Rz	23.486 µm		

รูปที่ ก.17 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 4 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 58 โวลต์ และอัตราป้อน 5.1 มม./นาทีขั้นที่ 2

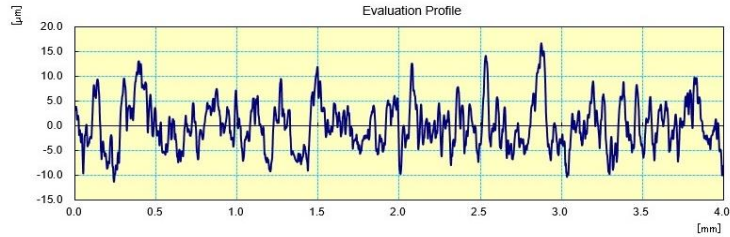
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.884 µm		
Rq	4.826 µm		
Rz	24.940 µm		

รูปที่ ก.18 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 4 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 60 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาทีขั้นที่ 1

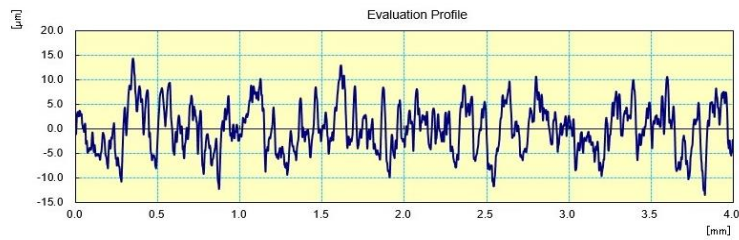
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.841 µm		
Rq	4.782 µm		
Rz	23.018 µm		

รูปที่ ก.19 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซชาร์จ 2 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าคิซชาร์จ 58 โวลต์ และอัตราป้อน 4.1 มม./นาทีขึ้นที่ 3

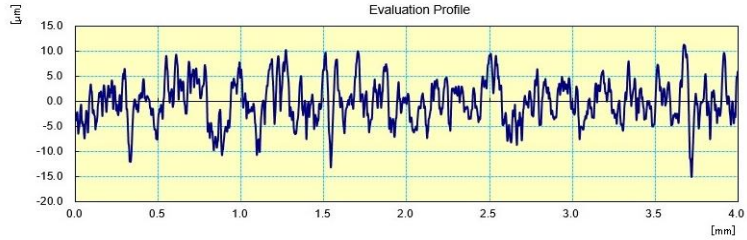
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.970 µm		
Rq	4.837 µm		
Rz	23.455 µm		

รูปที่ ก.20 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซชาร์จ 2 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าคิซชาร์จ 60 โวลต์ และอัตราป้อน 5.1 มม./นาทีขึ้นที่ 3

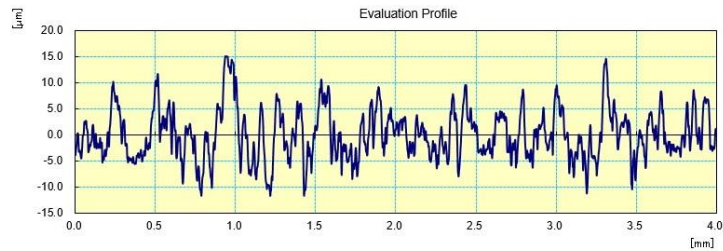
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.375 µm		
Rq	4.192 µm		
Rz	21.333 µm		

รูปที่ ก.21 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 2 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาทีขึ้นที่ 3

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.819 µm		
Rq	4.700 µm		
Rz	22.778 µm		

รูปที่ ก.22 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 3 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 60 โวลต์ และอัตราป้อน 4.1 มม./นาทีขึ้นที่ 3

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5μm	Filter	GAUSS
Ra	3.427 μm		
Rq	4.346 μm		
Rz	22.147 μm		

รูปที่ ก.23 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 3 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 5.1 มม./นาทีขึ้นที่ 3

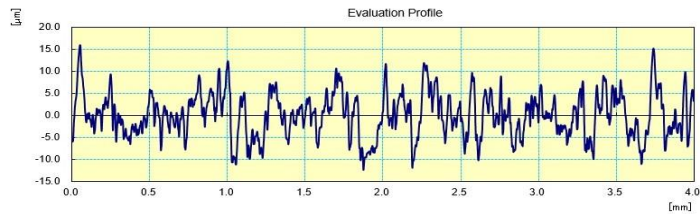
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5μm	Filter	GAUSS
Ra	3.368 μm		
Rq	4.147 μm		
Rz	22.186 μm		

รูปที่ ก.24 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 3 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 58 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาทีขึ้นที่ 3

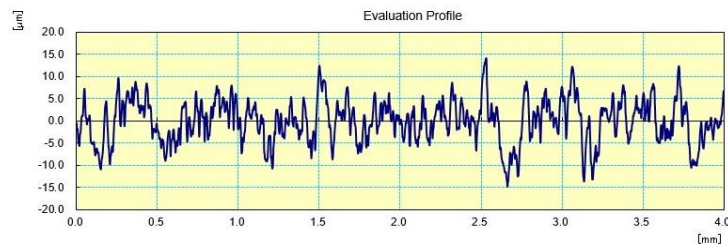
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	4.044 µm		
Rq	4.991 µm		
Rz	23.654 µm		

รูปที่ ก.25 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 4 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 4.1 มม./นาทีขึ้นที่ 3

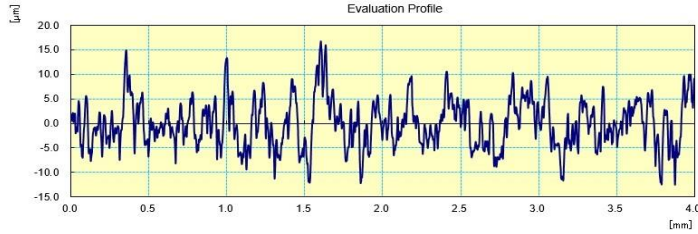
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.822 µm		
Rq	4.748 µm		
Rz	22.385 µm		

รูปที่ ก.26 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ 4 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ 58 โวลต์ และอัตราป้อน 5.1 มม./นาทีขึ้นที่ 3

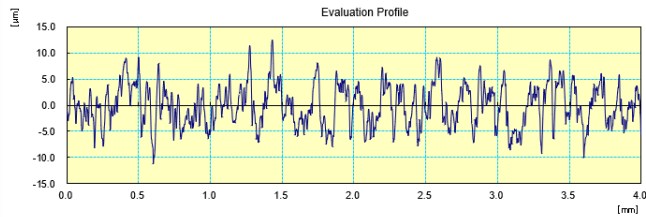
CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.884 µm		
Rq	4.826 µm		
Rz	24.940 µm		

รูปที่ ก.27 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซซาร์จ 4 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าคิซซาร์จ 60 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาทีขึ้นที่ 3

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	3.247 µm		
Rq	3.903 µm		
Rz	18.343 µm		

รูปที่ ก.27 ผลการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ตัดด้วย กระแสไฟฟ้าคิซซาร์จ 3 แอมแปร์.
แรงดันไฟฟ้าคิซซาร์จ 62 โวลต์ และอัตราป้อน 6.1 มม./นาที



ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



รายงานสืบเนื่อง จากการประชุมวิชาการ ระดับชาติ ราชภัฏหมู่บ้านจอมบึงวิจัย

ครั้งที่

6

“การเกษตรก้าวไกล
สังคมไทยยั่งยืน”

วันพฤหัสบดีที่ 1 มีนาคม 2561
ณ อาคารศูนย์ภาษาและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง และเครือข่ายเจ้าภาพร่วม

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติควบคุมการทำงานด้วยอาร์ดูโนและเว็บแอปพลิเคชัน ปิยวดี ยาบุษดี ภูเบศร์ พิพิธวิทยการ รุ่งโรจน์ มีแก้ว พฤทธิพงษ์ บุญประจันต์	251
ลักษณะโครงข่ายแก้วและสมบัติการเปล่งแสงที่ปรับเปลี่ยนได้ของแก้วลิเทียมแลนทานัมบอเรต ที่เจือด้วยไอออนของเพอร์ซิโอติเมียม เอกพล แก้วนวม จักรพงษ์ แก้วขาว	260
การออกแบบและพัฒนาชุดผลิตไบโอดีเซลแบบอัตโนมัติ พิชัย สิริรัตนพลกุล สุชาติ วิภูษณะพันธ์ ศิริวัฒน์ สุนทรโรทก วรสุข แจ่มสว่าง	269
การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติด้วยแมกน ประพนธ์ เลิศลอยปัญญาชัย วรณา กติกาโชคสกุล ศุภกิจตรา ทาทอง นิชากร ปทุมรังสรรค์	277
สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลภาคตัดขวางเชิงอะตอมและอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุทันตกรรม เรซินคอมโพสิตและฟันปลอม ฐานสพล ปรีชาญาณ ณัฐกฤตา จันทิมา วุฒิชัย ไชยภักษา	285
การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้รถแท็กซี่ไฟฟ้าด้วยวิธีเอ็มซีดีด้วยเส้นสวด จิรายุ ตรีศรีเครือ ชัยยะ ประณีตพลกรัง	292
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี	
บทความวิชาการ	
ซีเมนต์สำหรับเคลือบเซรามิกส์ อรุณช จินดาสกุลยนต์	300
สาขาการเกษตรและสิ่งแวดล้อม	
บทความวิจัย	
การพัฒนาบรรจุภัณฑ์สำหรับสับปรดสดและผลิตภัณฑ์แปรรูปสับปรดจังหวัดราชบุรี สุจิตตรา จันทรลอย สุธิดา ปรีชานนท์	308
การศึกษาลักษณะทางกายภาพและสารพิษของสับปรดพันธุ์ MD2 ที่ปลูกในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์และในจังหวัดราชบุรี นิชากร ปทุมรังสรรค์ กุลสตรี หนึ่งนอาจ นฤมล จิรานูวัฒน์	324
การใช้เทคโนโลยีการผลิตอ้อยของเกษตรกรในอำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี ภาณุพล ลักษณะวีระ อานินทร์ คงศิลา	330

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด
 Investigation on the Effect of Wire-EDM Process
 Parameters of Mold Steel Cutting

จิรายุ ศรีอริเวโร¹ ชัยยะ ปราณีตพลกรัง²

¹ นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด (Wire-EDM) โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยทากูชิ สำหรับตัวแปรที่ทำการศึกษามี 3 ตัวแปร ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ (IP) แรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ (VG) และอัตราการป้อน (FA) โดยวิเคราะห์ตัวแปรในการตัดที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ซึ่งใช้ลวดทองเหลืองเป็นอิเล็กโทรด ผลการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ (IP) มีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ (VG) และอัตราการป้อน (FA) ไม่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวในการทดลองครั้งนี้และเงื่อนไขในการทดลองที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดสำหรับการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวดของผลการศึกษาครั้งนี้ คือ กระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ (IP) ที่ 3 ampere แรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ (VG) 62 volt และอัตราการป้อน (FA) ที่ 6.1 mm/min

คำสำคัญ : เหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80, วิธีอีดีเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด, ความหยาบผิว

ABSTRACT

This research aimed to study a NAK 80 mold steel cutting by wire electric discharge machining (Wire-EDM) using Taguchi experimental design method. In this study, three parameters; discharge current (IP), gap voltage (VG) and feed rate address (FA), were investigated. For the experiment, brass electrode was used for analysis the effect of the parameters that affect to the surface roughness of NAK 80 mold steel. The experimental results at 95% confident interval found that the discharge current (IP) was significant to the surface roughness of NAK 80 mold steel while gap voltage (VG) and electrode feed rate (FA) was non-significant to the surface roughness of NAK80 mold steel. The optimal factor values of discharge current (IP), gap voltage (VG) and feed rate address (FA) in this study are 3 ampere, 62 volt and 6.1 millimeter/second, respectively.

Keywords: Mold Steel NAK 80, Wire – EDM, surface roughness



บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีต่างๆ ทางวิศวกรรมถูกสร้างขึ้นเพื่อสร้างสรรค์สิ่งทีก่อให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด ดังนั้นด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีจึงก่อให้เกิดการพัฒนาและค้นพบนวัตกรรมใหม่ๆ ทางด้านวัสดุศาสตร์ซึ่งมีส่วนช่วยทำให้เกิดทางเลือกใหม่สำหรับการเลือกรูปแบบของวัสดุเพื่อนำไปใช้งาน ความเป็นไปได้ในการออกแบบและเลือกใช้วัสดุเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานก็มีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 นับเป็นวัสดุชนิดใหม่ซึ่งได้รับความนิยมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่นการทำเครื่องมือหรือชิ้นส่วนในงานขึ้นรูปต่างๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น เช่น มีความเหนียวและความแข็งดีเยี่ยม มีความทนทานสูง รวมถึงสามารถขึ้นรูปด้วย EDM และ Wire-cut ได้ดี ในด้านการผลิตนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำในการผลิตค่อนข้างสูงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมามีคุณภาพตามข้อกำหนด จึงมีการนำเอาเทคโนโลยีต่างๆ มาประยุกต์ใช้งานตั้งแต่การออกแบบ การเขียนแบบจนถึงการสร้าง จากการศึกษาสภาพโดยทั่วไปของเทคโนโลยีเครื่องจักรกลที่นำเข้ามาใช้ในสถานประกอบการ ผลการศึกษาพบว่า โดยรวมทุกสถานประกอบการมีการนำเทคโนโลยีเครื่องจักรกลเข้ามาช่วยในการทำงานทางด้านต่างๆ โดยเฉพาะทางด้านการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบเขียนแบบและโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการควบคุมเครื่องจักรอัตโนมัติ อย่างเช่นเครื่องตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire Electric Discharge Machining : Wire - EDM) มาเป็นส่วนหนึ่งในด้านการผลิต [1-2]

กระบวนการตัดวัสดุด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire-EDM) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งในกลุ่มการตัดเนื้อวัสดุแบบใหม่ (Non-traditional machining processes) ที่นิยมใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน เช่น งานสร้างแม่พิมพ์ เนื่องจากสามารถตัดวัสดุที่มีความแข็งสูงได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงความแข็งของวัสดุ แต่วัสดุที่นำมาตัดจะต้องนำไฟฟ้า [3-5] ในกระบวนการตัดกระแสไฟฟ้าจะถูกปล่อยจากเส้นลวดอิเล็กโทรดที่มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาไปยังชิ้นงานโดยไม่มีการสัมผัสกับวัสดุชิ้นงานที่นำมาตัด ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้วัสดุเกิดการหลอมละลายหรือกลายเป็นไอและถูกพัดพาออกไปจากบริเวณนั้นโดยของเหลวไดอิเล็กตริก ดังนั้นวิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่สามารถตัดงานที่มีความซับซ้อนและมีความเที่ยงตรงสูงได้ดี [6]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาผิวในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีตัดเนื้อชิ้นตัดด้วยเส้นลวด เพื่อหาค่าตัวแปรในการตัดชิ้นงานที่ให้ค่าความหนาผิวที่น้อยที่สุด โดยการกำหนดปัจจัยที่จะใช้ ในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าคิซาร์จ (IP) แรงดันไฟฟ้าคิซาร์จ (VG) และอัตราการป้อน (FA) โดยใช้วิธีการทดลองแบบทากูชิ [7] และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความหนาผิวของชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบกันระหว่างตัวแปร 3 ชนิดแต่ละตัวแปร 3 ระดับ ที่ทำการตัดขึ้นรูปด้วยวิธี Wire - EDM เพื่อให้การใช้ งานของเครื่อง Wire - EDM เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีตัดเนื้อชิ้นตัดด้วยเส้นลวด
2. ศึกษาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการตัดชิ้นงานเหล็กกล้าแม่พิมพ์ Nak80

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบบของปัจจัยในกระบวนการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วยวิธีตัดเนื้อชิ้นตัดด้วยเส้นลวด เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ได้ทำการกำหนดขอบเขตไว้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 ด้วยวิธีตัดเนื้อชิ้นตัดด้วยเส้นลวดประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้
 - 1.1 เครื่อง Wire-EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA20S Advance
 - 1.2 ใช้ลวดอิเล็กโทรดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm
2. วัสดุที่ใช้การทดสอบคือเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 มี ขนาดความกว้าง 10 มม. ยาว 10 มม. และหนา 10 มม.

3. วัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธีการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi Method) เปรียบเทียบกันระหว่างตัวแปร 3 ชนิดแต่ละตัวแปร มี 3 ระดับโดยกำหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังนี้
 - 3.1 กระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์ค (IP) มีค่า 2, 3 และ 4 A
 - 3.2 แรงดันไฟฟ้า (VG) มีค่า 58, 60 และ 62 Volt
 - 3.3 อัตราการป้อน (FA) มีค่า 4.1, 5.1 และ 6.1 mm/min

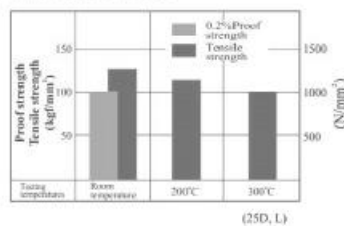
วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้วัสดุที่ใช้ คือ เหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 มีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1 นับเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่ได้รับการนิยมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่นการทำเครื่องมือ ชิ้นส่วนในงานขึ้นรูปต่างๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น อาทิเช่น มีความเหนียวแรงดีเยี่ยม ลดความเสี่ยงต่อความเสียหายและบดงอที่เกิดจากการชุบแข็ง มีความทนทานสูง นำมาตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด หรือกระบวนการ Wire-EDM ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FA205 Advance โดยลวดอเล็กโทรดที่ใช้จะเป็นลวดทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 mm ชิ้นงานที่ตัดจะมีขนาด 10 x 10 x 10 mm³ ให้มีรูปร่างและขนาดตามภาพที่ 2 ทำการออกแบบการทดลองแบบออร์ทอกอนัลเออร์รี่ L9 โดยกำหนดตัวแปรจำนวน 3 ตัวแปร คือ กระแสไฟฟ้าสปาร์ค (IP) แรงดันไฟฟ้าสปาร์ค (VG) และอัตราการป้อน (FA) แต่ละตัวแปรมี 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแต่ละการทดลองมีการทำซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของผลที่ได้ หลังจากการตัดนำชิ้นงานมาวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานด้วยเครื่องวัดค่าความหยาบผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ310 แสดงตัวอย่างการวัดดังภาพที่ 3

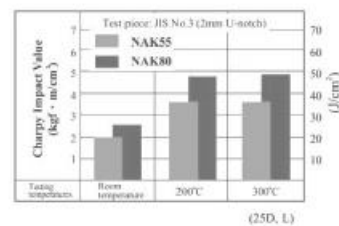
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์ [1]

เหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK80 (%)						
C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Al
0.15	0.30	1.5	1.9	1	3	1

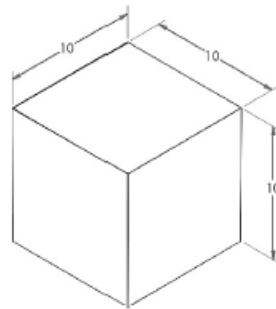
● Tensile strength (initial hardness 40 HRC)
... NAK 55, NAK 80



● Toughness (initial hardness 40 HRC)



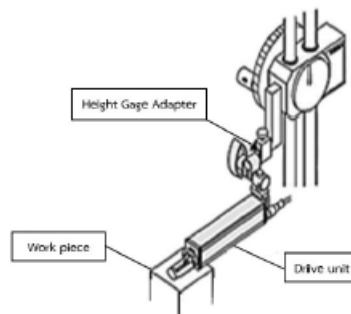
ภาพที่ 1 ภาพแสดงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้า NAK80 [1]



ภาพที่ 2 ภาพแสดงขนาดของชิ้นงาน

ตารางที่ 2 แสดงระดับของตัวแปรในการทดลอง

ระดับของปัจจัย	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง		
	กระแสไฟฟ้าดีสชาร์ต (IP) (Amp)	อัตราการป้อน (FA) (mm/sec)	แรงดันไฟฟ้า (VG) (Volt)
1	2	4.1	58
2	3	5.1	60
3	4	6.1	62



ภาพที่ 3 แสดงการวัดค่าความหนาผิว



ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีอ้อมเป็นชนิดตัดด้วยเส้นลวด เพื่อหาค่าตัวแปรในการตัดชิ้นงานที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด โดยการกำหนดปัจจัยที่จะใช้ ในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าตัดสชาร์จ (IP) อัตราการป้อน (FA) และแรงดันไฟฟ้าตัดสชาร์จ (VG) ใช้วิธีการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi Method) และทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยวิธีนี้จะพิจารณาจากอัตราส่วน S/N Ratio นำข้อมูลจากตารางที่ 3 นำมาใช้ในการหาค่า Signal - to Noise Ratio (S/N Ratio) ซึ่งค่า S/N Ratio จำนวนได้จากสูตรที่ใช้จะเป็นชนิด Smaller - the - better type problem (ค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด) [7] ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4-6 และจากกฎของทากูชิสำหรับผลตอบสนองในกรณีตัวแปรที่เหมาะสมพิจารณาได้จากค่า S/N ratio เบลีย์ของแต่ละปัจจัยที่มีค่ามาก

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าความหยาบผิว

ลำดับการทดลอง	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง			RA (μm)
	IP (Amp)	FA (mm/min.)	VG (Volt)	
1	2	4.1	58	3.783
2	2	5.1	60	3.986
3	2	6.1	62	3.473
4	3	4.1	60	3.817
5	3	5.1	62	3.412
6	3	6.1	58	3.346
7	4	4.1	62	4.000
8	4	5.1	58	3.854
9	4	6.1	50	3.886

ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N Ratio) ที่ได้จากการทดลอง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง			RA (μm)	S/N Ratio
	IP (Amp)	FA mm/min.	VG (Volt)		
1	2	4.1	58	3.783	-11.557
2	2	5.1	60	3.986	-12.011
3	2	6.1	62	3.473	-10.814
4	3	4.1	60	3.817	-11.634
5	3	5.1	62	3.412	-10.660
6	3	6.1	58	3.346	-10.491
7	4	4.1	62	4.000	-12.041
8	4	5.1	58	3.854	-11.718
9	4	6.1	60	3.886	-11.790

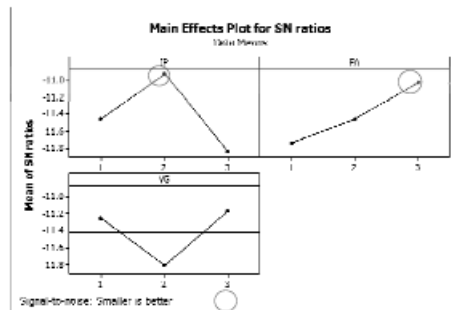


1. การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย

ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ผลต่างของ S/N Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมที่แตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio ใช้ข้อดีของผลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่มีค่าตอบสนอง (ความหยาบผิว) ในรูปแบบของ S/N Ratio โดยเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio กล่าวคือ ถ้าค่า S/N Ratio ของแต่ละระดับปัจจัยควบคุมมีค่ามาก หมายถึง ระดับของปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้ชิ้นงานมีความหยาบผิวน้อย ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาจากค่า S/N Ratio เฉลี่ยของ IP จากตารางที่ 5 พบว่าระดับที่ 2 มีค่า S/N Ratio เฉลี่ยมากที่สุด หมายความว่า IP ระดับที่ 2 เป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองจะมีผลทำให้ชิ้นงานมีความหยาบผิวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ IP ระดับที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองเดียวกัน ส่วน FA และ VG มีค่า S/N Ratio เฉลี่ยมากที่สุดคือ ระดับที่ 3 และระดับที่ 3 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ ของระดับต่างๆของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิว (Ra) พบว่าเงื่อนไขของแต่ละปัจจัยที่ให้ค่า S/N Ratio เฉลี่ยมากที่สุดประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าดีสชาร์จ (IP) ที่ 3 ampere อัตราการป้อน (FA) ที่ 6.1 mm/min และแรงดันไฟฟ้าดีสชาร์จ (VG) 62 volt

ตารางที่ 5 แสดงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N Ratio) เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบความหยาบผิว (Ra)

ระดับของปัจจัย	ค่า S/N Ratio เฉลี่ย		
	IP (Amp)	FA mm/min.	VG (Volt)
1	-11.460	-11.740	-11.260
2	-10.930	-11.460	-11.810
3	-7.293	-11.030	-11.170



ภาพที่ 3 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของระดับต่างๆของปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิว (Ra)

ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM) ผลต่างของ S/N-Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมที่แตกต่างไปจากค่าเฉลี่ยรวมของ S/N-Ratio หรือเรียกว่าอิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุม ข้อดีของผลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยควบคุมที่มีต่อค่าตอบสนอง ในรูปของ S/N-Ratio โดยเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยรวมของ S/N-Ratio ถ้าค่าอิทธิพลของระดับของปัจจัยควบคุมใดมีค่าไปทางบวก หมายความว่าถ้าใช้ระดับของปัจจัยควบคุมนั้นเป็นองค์ประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองก็จะไม่ผลทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยรวม



ของ S/N-Ratio และถ้าค่าอิทธิพลของระดับของปัจจัยควบคุมใดมีค่าไปทางลบ หมายความว่าถ้าใช้ระดับของปัจจัยควบคุมนั้นประกอบของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ก็จะมีผลทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยรวมของ S/N-Ratio ผลต่างของ S/N-Ratio เฉลี่ย [8] แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 อิทธิพลของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิว (Ra)

ระดับของปัจจัย	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง		
	IP	FA	VG
	(Amp)	mm/min.	(Volt)
1	-0.0471	-0.3271	0.1529
2	0.4829	-0.0471	-0.3971
3	-0.4371	0.3829	0.2429

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของค่าความหยาบผิว ดังแสดงในตารางที่ 7 วิเคราะห์ด้วยวิธี General Linear model ในโปรแกรม Minitab16 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือความเชื่อมั่นที่ 95% โดยพิจารณาว่า P-value ถ้า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะยอมรับสมมติฐานนั้นคือ ที่ปัจจัยใดๆ ที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จะเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองของการทดลอง ยกเว้นอัตราการป้อน (FA) และแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) ที่ไม่มีนัยสำคัญต่อความกว้างของรอยตัด เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05 สรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 7 แสดงค่าความแปรปรวนของความหยาบผิว (Ra)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
IP	2	0.22779	0.22779	0.113895	20.04	0.048
FA	2	0.1357	0.22779	0.067852	11.94	0.077
VG	2	0.12827	0.12827	0.064136	11.28	0.081
Error	2	0.01137	0.01137	0.005684		
Total	8	0.50314				

S = 0.1587 R-Sq = 98.2% R-Sq (adj) = 92.9%

3. การทดลองเพื่อยืนยันผล

จากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการตัดชิ้นงาน ที่ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) ที่ 3 ampere อัตราการป้อน (FA) ที่ 6.1 mm/min และแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) 62 volt พบว่าเงื่อนไขในการทดลองดังกล่าวไม่ตรงตามเงื่อนไขในการทดลองจึงทำการทดลองตามเงื่อนไขที่วิเคราะห์ได้เพื่อยืนยันผลจากการทดลองค่าความหยาบผิวที่ได้คือ 3.247 μm เมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่วิเคราะห์ ด้วยวิธีการ Predict Taguchi Results ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบผลของค่าความหยาบผิว

ผลการพยากรณ์ (μm)	การยืนยันผลการทดลอง (μm)	ค่าผิดพลาด (%)
3.264	3.247	1.0015



สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาผิวในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีตัดเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด เพื่อหาค่าตัวแปรในการตัดชิ้นงานที่ให้ค่าความหนาผิวน้อยที่สุด โดยการกำหนดปัจจัยที่จะให้ในการทดลองจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) แรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) และอัตราการป้อน (FA) ใช้วิธีการทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi Method) ผลการทดลองสรุปได้ว่า เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการตัดชิ้นงานที่ส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีค่าความหนาผิวน้อยที่สุด ได้แก่ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) ที่ 3 ampere อัตราการป้อน (FA) ที่ 6.1 mm/min และแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) 62 volt ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาผิว (Ra) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ คือ กระแสไฟฟ้าดิสชาร์จ (IP) ส่วนแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ (VG) และอัตราการป้อนลวด (FA) ไม่มีนัยสำคัญต่อความหนาผิว (Ra) เนื่องจากมีค่า α มากกว่า 0.05

อภิปรายผลการวิจัย

ผลการทดลองศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาผิวในการตัดเหล็กกล้าแม่พิมพ์ NAK 80 ด้วยวิธีตัดเอ็มชนิดตัดด้วยเส้นลวด เพื่อหาค่าตัวแปรในการตัดชิ้นงานที่ให้ค่าความหนาผิวน้อยที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และ Tai [9] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวแปรการตัด ในกระบวนการตัดด้วยวิธีจ่ายประจุไฟฟ้าด้วยเส้นลวด EDM และรอยแตกที่พื้นผิวกับเหล็กกล้าเครื่องมือโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยมีตัวแปรในการตัดได้แก่ กระแสในการตัดและเวลาในการเปิดปิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าความหนาผิวเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของกระแสในการตัด ในส่วนของ Lee T.C. และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวงานและชิ้นงานที่ถูกทำลาย ภายหลังจากกรรมวิธีตัดเอ็ม จากการทดลองสรุปได้ว่าชิ้นผิวที่ถูกทำลายจะสัมพันธ์กับพลังงานดิสชาร์จ แต่กระแสไฟฟ้าจะมีอิทธิพลต่อความหนาผิวของชิ้นงาน

เอกสารอ้างอิง

- Copyright 1980 Daido Steel Co.Ltd, NAK55 NAK80 40 HRC Pre-hard Type High Performance, High Precision Plastic Mold Steel, 1980 Daido Steel Co.Ltd
- ศราวุธ ทองอุทัย, 2544, การศึกษาสภาพ ความต้องการและปัญหาของการใช้คอมพิวเตอร์ของสถานประกอบการอุตสาหกรรม แม่พิมพ์เขตกรุงเทพและปริมณฑล, วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- N. M. Abbas, D. G. Solomon, and M. F. Bahari, "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)", International Journal of Machine Tools and Manufacture 47, 2007, pp. 1214-1228.
- J.A. Sanchez, J.L. Rodil, A. Herrero, L.N. Lopez de Lacalle and A. Lamikiz, "On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting", Journal of Materials Processing Technology 182, 2007, pp. 574-579.
- N. Tosun, C. Cogun and G. Tosun, "A study on kerf and material removal rate in wire electrical Discharge machining based on Taguchi method", Journal of Materials Processing Technology 152, 2004, pp. 316-322.
- S. Sarkar, S. Mitra and B. Bhattacharyya, "Parametric analysis and optimization of wire electrical discharge machining of γ -titanium aluminize alloy", Journal of Materials Processing Technology 159, 2005, pp. 286-294.8
- ปรเมศ ชูดีมา, 2545, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, บริษัท ด้านสุทธาการพิมพ์ จำกัด, หน้า 269-273.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจिरายุ ศรีอเคราะห์
วัน เดือน ปีเกิด	9 กันยายน 2533
ที่อยู่	85 ม.8 ต.บ้านม่วง อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี 70110
การศึกษา	ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต เทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (แม่พิมพ์พลาสติก) วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ตั้งแต่ พ.ศ.2557 ถึงปัจจุบัน
อีเมล	jjirayu_k@mail.rmutt.ac.th , hang_xl@hotmail.co.th
เบอร์โทรศัพท์	0953629695

